



Adrian Werner Josef STERNJAK, BSc., IWE

# **Bewertung von zerstörungsfreien Verfahren zur serientauglichen Prüfung von lasergeschweißten Batteriezellen**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian  
Samsung SDI Battery Systems GmbH

Dipl.-Ing. Dr.techn. Kemal Mucic  
Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik

Beurteiler

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger  
Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik

Graz, im März 2019

## **EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG** *AFFIDAVIT*

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

*I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.*

---

Datum / Date

---

Unterschrift / Signature

## KURZFASSUNG

Lithium-Ionen-Energiespeicher haben sich verglichen mit anderen Batterietypen bezüglich ihrer hohen Leistungsfähigkeit als Spitzenreiter in der E-Mobilität durchgesetzt. Sie werden als Schlüsselkomponente für eine emissionsfreie Mobilitätsanwendung gehandhabt. Qualität und Art der Lithium-Ionen-Batteriemodulen beeinflussen maßgebend die erreichbare Lebensdauer. Einer fehlerfrei ausgeführten elektrischen Kontaktierung von Zelle mit Busbar (Stromleiterschiene) mittels Laserschweißung kommt dabei eine große Bedeutung zu. Innerhalb der Modulfertigung kommt es trotz zahlreicher qualitätssichernder Maßnahmen immer wieder zu Fehlstellen (Unregelmäßigkeiten) in den lasergeschweißten Nähten, welche die Qualität der Module beeinträchtigen können. In der vorliegenden Masterarbeit wurden zerstörungsfreie, serientaugliche Verfahren zur Prüfung der lasergeschweißten Fügstellen untersucht. Für die Auswahl geeigneter ZfP-Verfahren wurde zunächst die Ausgangssituation seitens Samsung SDI bezüglich des Schweißprozesses erhoben. Das Hauptaugenmerk lag auf ZfP-Verfahren, die während (In(-situ)-Prozess) bzw. unmittelbar nach (Post-Prozess) dem Laserstrahlschweißen online eine Fehlerdetektion ermöglichen. Für die Bewertung der Verfahren hinsichtlich ihrer möglichen Fehlererkennung wurden Proben mit absichtlich eingebrachten Fehlerszenarien (Poren, Spalt zwischen Zellpol und Busbar etc.) untersucht. Unterstützt wurden die praktischen Schweißversuche direkt von den Herstellern dieser ZfP-Methoden sowie auch von diversen Forschungseinrichtungen.

Die in dieser Masterarbeit erzielten Erkenntnisse zeigen auf, anhand welcher ZfP-Methoden festgestellt werden kann, ob die Laserschweißnähte am Zellen-Busbar in Ordnung sind.

## **ABSTRACT**

Lithium-ion energy storage systems have become the leader in terms of high performance compared to other common battery types used in e-mobility. They are handled as key component for an emissions-free mobility application. The quality and type of lithium-ion battery modules significantly influence the achievable service life. An error-free electrical contact between the cell and the busbar (current conductor) via laser welding has a great significance. In spite of numerous quality assurance measures, defects in the laser-welded seams which may affect the quality of the modules often occur during module production.

Non-destructive, series-production ready methods for testing the laser-welded joints were investigated in this master thesis. For the selection of suitable NDT methods, the initial situation of Samsung SDI regarding the welding process was surveyed. The main focus was on NDT methods that enable error detection during or immediately after (online) the laser welding process. For the assessment of the methods with regard to their possible error detection, samples with intentionally introduced fault scenarios (pores, gap between cell pole and busbar, etc.) were investigated. The practical welding tests were supported by the manufacturers of these NDT methods as well as by various research facilities.

The findings of this master's thesis shows, which NDT methods can be used to determine that the laser welds on the cell busbar are manufactured properly and further can be classified to be in order.

## DANKSAGUNG

*“Wer immer tut, was er schon kann, bleibt immer das, was er schon ist.“*

**Henry Ford**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner 6 monatigen Diplomantenstelle bei Samsung SDI Battery Systems in Premstätten. Die fachliche Unterstützung wurde durch das Institut für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik (TU Graz) gewährleistet.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die durch ihre persönliche und fachliche Unterstützung zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen haben.

Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Christof Sommitsch, den Leiter des Institutes für Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik, gilt mein besonderer Dank für die Ermöglichung dieser Masterarbeit sowie Nutzung der Infrastruktur des Institutes.

Mein aufrichtiger Dank gebührt Herrn Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger, der mich mit Hingabe wissenschaftlich betreut hat. Ohne seine Unterstützung und seinen fachlichen Input wäre diese Masterarbeit nie möglich gewesen. Ergänzend zur Unterstützung in fachlichen Belangen, möchte ich mich auch noch für die netten Gespräche innerhalb diverser Sprechstunden während meiner aktiven Studienzzeit bedanken. Seine wohlwollenden Worte waren mitunter ein Ansporn für den Beginn der IWE (International Welding Engineer)-Ausbildung, welche ich vor Beginn dieser Diplomarbeit erfolgreich absolvierte. Ich möchte mich auch für die interessanten Diskussionen innerhalb der Fügetechnik Gruppenmeetings bedanken.

Weiteres möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Kemal Mucic bedanken, der mir mit wertvollen Hilfestellungen und Tipps zur Seite stand.

Bedanken möchte ich mich auch bei allen Angestellten des Werkstoffkunde, Fügetechnik und Umformtechnik Institutes für die herzliche Aufnahme.

Für die Vergabe dieses äußerst spannenden Themas seitens Samsung SDI Battery Systems möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Jürgen Fabian bedanken. Seine fachliche sowie auch moralische Unterstützung seinerseits leistete einen maßgeblichen Beitrag zur Fertigstellung dieser Diplomarbeit. Neben der Unterstützung in wissenschaftlichen Fragen stand mir Dr. Fabian auch in der Planung sämtlicher organisatorischer Tätigkeiten wie etwa das Versenden der Schweißproben oder das Planen meiner Forschungsreisen zur Seite. Ergänzend möchte ich hier auch anmerken, dass ich bereits bei meiner Bachelorarbeit von ihm betreut wurde, als er noch am Institut für Fahrzeugtechnik angestellt war. Es hat sich während diesen zahlreichen gemeinsamen Stunden eine echte Freundschaft entwickelt.

Ebenfalls möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. IWE Andre Bstieler, den zuständigen Schweißingenieur in der Projektentwicklung bei Samsung SDI Battery Systems, für die fachliche Unterstützung meiner Arbeit bedanken.

Weiteres möchte ich mich auch bei allen involvierten Angestellten bei Samsung SDI für die Unterstützung und zahlreichen Informationen bedanken.

Ein herzliches Dankeschön an die Firmen und Forschungseinrichtungen IPG Laser GmbH, plasmo Industrietechnik GmbH, Lessmüller Lasertechnik GmbH, der Montanuniversität Leoben und dem Österreichischem Gießerei-Institut (ÖGI) für die Unterstützung bei den durchgeführten Untersuchungen.

Mein größter Dank gilt meiner gesamten Familie. Es wäre nie zu dieser Arbeit gekommen, hätten mich meine lieben Eltern Irene und Werner während meinen schwierigen Lebensabschnitten nicht so bedingungslos unterstützt. Danke auch, dass Ihr mir meine akademische Ausbildung und dadurch den Weg zur Sponsion finanziell ermöglicht habt. Meiner Schwester Sabrina möchte ich auch ein großes Dankeschön für die zahlreichen motivierenden Telefonate sowie den persönlichen Gesprächen aussprechen. Ich möchte meiner lieben Familie diese Arbeit widmen und mich somit für eure Unterstützung bedanken.

Danke an alle!

Graz, 05.03.2019

Adrian Werner Josef STERNJAK

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1</b>	<b><i>EINLEITUNG</i></b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivation .....	1
1.2	Ziel der Untersuchung .....	1
1.3	Aufbau der Arbeit .....	2
<b>2</b>	<b><i>AUSGANGSSITUATION</i></b> .....	<b>3</b>
2.1	Allgemeines .....	3
2.2	Aufbau eines Lithium-Ionen-Batteriesystems .....	4
2.3	Schweißprozessablauf .....	7
2.3.1	Allgemein .....	7
2.3.2	Lasersystemtechnik .....	7
2.3.3	Laserstrahlschweißen von Batteriemodulen .....	9
2.3.4	Werkstoff .....	14
2.3.5	Normen .....	16
2.3.5.1	Klassifizierung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten nach ÖNORM EN ISO 6520-1 [3] .....	16
2.3.5.2	Bewertungsgruppe für Laserstrahl-Schweißverbindungen nach DIN EN ISO 13919-2 [10] .....	18
2.3.5.3	Schweißanweißung (WPS) nach DIN EN ISO 15609-4 [18] .....	19
2.3.5.4	Merkblätter DVS 3203 Teil 1 bis Teil 4 .....	19
2.3.6	Auftretende Unregelmäßigkeiten bei lasergeschweißten Batteriezellen .....	20
2.3.6.1	Klassifizierte Unregelmäßigkeiten laut ÖNORM EN ISO 6520-1 .....	20
2.3.6.2	Produktionsbedingte Unregelmäßigkeiten .....	24
2.3.7	Qualitätssicherung der Fügeverbindung .....	27
2.3.7.1	Zielgrößen .....	28
2.3.7.2	Derzeitige Qualitätssicherung .....	29
2.3.7.3	Rahmenbedingungen für die Prozessüberwachung während bzw. nach der Laserschweißung .....	30
2.4	Zusammenfassung .....	31
<b>3</b>	<b><i>LITERATURSTUDIE</i></b> .....	<b>32</b>
3.1	Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen .....	32
3.2	In(-situ)-Prozess-Erfassung .....	35
3.2.1	Relevante Prozessemissionen innerhalb der In(-situ)-Prozess-Überwachung .....	35
3.2.2	Relevante In(-situ)-Prozessüberwachungssysteme für die Batteriefertigung .....	40
3.3	Post-Prozessüberwachung .....	47
3.3.1	Relevante Post-Prozessüberwachungssysteme für die Batteriefertigung .....	47
3.4	Zusammenfassung .....	52
<b>4</b>	<b><i>PRAKTISCHE UNTERSUCHUNGEN</i></b> .....	<b>53</b>
4.1	Proben .....	53
4.2	Dokumentation der Untersuchungen .....	56
4.2.1	Wirbelstromprüfung (ET) .....	56
4.2.2	Thermografie .....	59
4.2.3	Interferometrie – LDD-700 Sensor .....	63
4.2.4	Interferometrie – OCT (Optische Kohärenztomografie) .....	79
4.2.5	plasma fast processobserver .....	84
<b>5</b>	<b><i>GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE</i></b> .....	<b>96</b>
<b>6</b>	<b><i>ZUSAMMENFASSUNG</i></b> .....	<b>98</b>
<b>7</b>	<b><i>AUSBLICK</i></b> .....	<b>99</b>
<b>8</b>	<b><i>LITERATURVERZEICHNIS</i></b> .....	<b>100</b>
<b>9</b>	<b><i>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</i></b> .....	<b>103</b>

<b>10</b>	<b>TABELLENVERZEICHNIS</b> .....	<b>107</b>
<b>11</b>	<b>ANHANG</b> .....	<b>109</b>
11.1	ÖNORM EN ISO 6520-1 – Unregelmäßigkeiten laut Hauptgruppen .....	109
11.2	Genannte Firmen und Forschungseinrichtungen .....	115
11.3	Oberflächenbilder der Proben .....	117
11.4	CT-Bilder der Proben.....	119
11.5	OCT-Bilder .....	121

# 1 EINLEITUNG

## 1.1 Motivation

*“Die Leute werden in einigen Jahren auf Benzinmotoren zurückblicken so wie wir heute auf Dampfmaschinen und sagen: Es war eine gute Zeit, aber sie ist vorbei.”*

**Elon Musk, CEO Tesla Motors [1]**

Der weltweite Ressourcen- sowie Umweltschutz wird die zukünftige Mobilität massiv beeinflussen. Dieser Gedanke zählt in der Zwischenzeit bereits als elementarer Treiber für die Entwicklung von Innovationen. Die Elektromobilität – als emissionsarme und energieeffiziente Technologie – bekommt in diesem Zusammenhang eine besondere Schlüsselrolle zugeschrieben. Besonders Lithium-Ionen-Akkumulatoren versprechen dabei großes Potential, den technischen Anforderungen einer langen Lebensdauer und hohen Energiedichte Genüge zu leisten. Ein Hochvolt-Batteriesystem ist jedoch als ein komplexes Bauteil handzuhaben, in welchem diverse Entwicklungsbereiche in einer Komponente vereint werden (Mechanik, Elektrochemie, Elektrik, Elektronik, Thermaldesign sowie funktionale Sicherheit). Darüber hinaus ist das Batteriesystem hochvernetzt im Fahrzeuggesamtverbund bzw. Fahrzeugantriebsstrang eingebettet. Durch die ständig steigenden Anforderungen in der Automobilindustrie ist jede einzelne Batterieentwicklung eine neue Herausforderung und weit entfernt von routinemäßigen Tätigkeiten. [2]

Dabei liegt der Fokus auf der Realisierung einer wirtschaftlichen und vor allem qualitätsgerechten Produktion der Lithium-Ionen-Batterien. Um die hohen Qualitätsstandards zu gewährleisten kommt der elektrischen Kontaktierung bzw. der fügetechnischen Verbindung von Batteriekomponenten – speziell der lasergeschweißten Fügestelle zwischen Zellpol und Zellverbinder – eine besondere Bedeutung hinzu. Nicht sachgemäß durchgeführte Verschweißungen führen zu schwerwiegenden Fehlern und im extremsten Fall zum Komplettausfall der gesamten Batterie. Ein zukunftsweisender Einsatz von Lithium-Ionen-Batterien erfordert daher neue und mit hoher Qualität im Vordergrund stehende Fertigungsprozesse um die bestmögliche elektrische Kontaktierung zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird nach industriellen, serientauglichen Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung (kurz ZfP-Methoden; english: non-destructive testing (NDT)) der Fügeverbindungen zwischen Zellpol und Zellverbindern gesucht. Mit der Widerstandsmessung, wie sie derzeit bei der Modulfertigung für die Prozessüberwachung der Laserstrahlschweißung bei Samsung SDI Battery Systems angewendet wird, können Fehler nur teilweise quantifiziert werden. Damit kann aber keine qualitative Aussage über die Fügeverbindung getroffen werden.

## 1.2 Ziel der Untersuchung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für die elektrische Kontaktierung (Zellpole mit Zellverbindern) von Lithium-Ionen-Batterien – welche mittels Laserstrahlschweißung durchgeführt wird – nach serientauglichen, zerstörungsfreien Prüfmethoden zu suchen. Hierfür muss zunächst ein Gesamtüberblick über die Lithium-Ionen-Batterien-Produktion (von der Zelle bis zum Komplettbatteriesystem (Batteriepack)) sowie den auftretenden Fehlertypen bzw. Unregelmäßigkeiten in der Fügestelle laut ÖNORM EN ISO 6520-1 [3] geschaffen werden, welcher als Grundbaustein für weitere Untersuchungen dient.

Anschließend sollen geeignete Proben – in welche gezielt fertigungsbasierende Fehler eingebracht werden – für die Durchführung von praktischen Prinzipversuchen (Post-Prozessüberwachung) für adäquate ZfP-Verfahren hergestellt werden. Für die Durchführung der praktischen Prinzipversuchen, muss nach Firmen bzw. Forschungseinrichtungen gesucht werden, die geeignete Verfahren für diese qualitätssichernde Prüfaufgabe bzw. Prozessüberwachung anbieten. Das Ganze sollte durch eine ausführliche Literaturstudie unterstützt werden, wo gängige ZfP-Verfahren vorab bezüglich ihrer Eignung diskutiert bzw. beschrieben werden. Abschließend soll festgestellt werden, ob es geeignete serientaugliche ZfP-Verfahren für die vorliegende Prüfaufgabe gibt, diese wirtschaftlich und vom technischen Aufwand her umsetzbar sind oder ob eine stichprobenartige Prüfung der einzelnen Fügestellen innerhalb der Batteriefertigung zielführend ist.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

In der vorliegenden Masterarbeit wird zunächst in Kapitel 2 die Ausgangssituation bzw. der Istzustand der Lithium-Ionen-Batterieproduktion bei Samsung SDI Battery Systems beschrieben.

Dabei soll zunächst ein Überblick über den Produktentwicklungszyklus eines automotiven Batteriesystems von der Zelle bis zum Komplettbatteriesystem in Serienfertigung geschaffen sowie das dazugehörige markterhältliche Produkt-Portfolio von Samsung SDI Battery Systems vorgestellt werden. Darauf aufbauend wird die dafür verwendete Füge-technologie (Laserstrahlschweißen) sowie der Schweißprozessablauf für die Herstellung der elektrischen Kontaktierung der lasergeschweißten Fügestelle zwischen Zellpol und Zellverbinder erläutert. Es werden auch die in Verwendung befindlichen Werkstoffe für Zellverbinder (engl. Busbar) und Zellpol bezüglich ihrer Eigenschaften (elektrisch, mechanisch), sowie die für das Laserschweißen bei Samsung SDI Batterie Systems angewandten Normen vorgestellt. Darüber hinaus werden die auftretenden Unregelmäßigkeiten in der lasergeschweißten Fügestelle laut ÖNORM EN ISO 6520-1 [3] klassifiziert. Abschließend wird ein kurzer Überblick über die derzeitige Qualitätssicherung der Fügeverbindung gegeben.

Kapitel 3 fasst das in der Literatur vorhandene Wissen über die unterschiedlichen zerstörungsfreien Prüfverfahren (kurz ZfP-Verfahren) sowie deren wichtigsten Vor- und Nachteile zusammen. Dabei wird innerhalb einer Diskussion am Ende dieses Kapitels festgestellt bzw. argumentiert, warum diese ZfP-Verfahren für die zerstörungsfreie, serientaugliche Prüfung von lasergeschweißten Batteriezellen in Frage kommen würden. Ausgehend von diesen Basisinformationen werden im Kapitel 4 die Ergebnisse der praktischen Untersuchungen, welche in Zusammenarbeit mit Firmen oder Forschungseinrichtungen durchgeführt wurden, dokumentiert. Die Eignung der untersuchten Verfahren bezüglich Serientauglichkeit und Nachweisbarkeit der in Kapitel 2.3.6 festgestellten Fehler bzw. Unregelmäßigkeiten werden in Ergebnismatrizen gegenübergestellt. Das letzte Kapitel dieser Masterarbeit hat eine Zusammenfassung sowie einen Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen zum Inhalt.

## 2 AUSGANGSSITUATION

### 2.1 Allgemeines

Die Firma Samsung SDI Battery Systems GmbH ist globaler Technologieführer im Bereich der Elektromobilität und entwickelt in enger Zusammenarbeit mit der Automobilindustrie innovative Lithium-Ionen-Akkumulatoren. [4] Höhere Energiedichte, längere Lebensdauer und deutlich bessere Zuverlässigkeit im Vergleich zu den Mitstreitern Blei-, Nickel-Cadmium- und Nickel-Metall-Hydrid-Batterien wird garantiert. Immer mehr Automobilhersteller führen durch das Fortschreiten der Batterietechnologie neue elektrifizierte Modelle mit Batterien ein. Dies ist ein sicheres Zeichen dafür, dass sich die Mobilität derzeit im Umbruch befindet und die Ära der Fahrzeugelektrifizierung eingeläutet ist. [2]

Die Herstellung von Lithium-Ionen-Batterien ist ein extrem komplexer Prozess, der verschiedene Chemikalien, Materialien, Hardware und Software enthält und einen höheren Umfang an Qualitätskontrollen erfordert. Strikte und konsequente Qualitätskontrolle ist anspruchsvoll, da fehlerbehaftete Produkte innerhalb der gesamten Verarbeitungskette auf mehr als einen Faktor ableitbar sind, wie zum Beispiel fehlerbehaftete Ausrüstung, fehlerbehaftete Materialien oder Produktionsfehler. Abgesehen von Standardwerkzeugen für die Automobilindustrie wie Sub-Supplier-Management-Systemen und FMEA (Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse) hat Samsung SDI darüber hinaus zukunftsorientierte interne Prozesse wie das Manufacturing Execution System (MES) entwickelt und erfolgreich integriert, um 100% Rückverfolgbarkeit sowie die höchste Qualität seiner Produkte zu gewährleisten. So wird während des Produktionsprozesses jede produzierte Batteriezelle an hunderten von Messpunkten überprüft und ermöglicht so eine individuelle Nachverfolgbarkeit. Dies garantiert, dass Kunden von Samsung SDI während der gesamten Fahrzeuglebensdauer immer Batteriezellen mit der langlebigsten und höchsten Leistungsfähigkeit beziehen. [2]

Batteriesysteme, welche in elektrifizierten Fahrzeugen verbaut werden, werden auch Traktionsbatterien genannt und bestehen aus mehreren sogenannten sekundären, also wiederaufladbaren Lithium-Ionen-Zellen. Die Begriffe Lithium-Ionen-Zelle, Lithium-Ionen-Batterie, Lithium-Ionen-Akkumulator oder kurz auch Lithium-Ionen-Akku haben alle dieselbe Bedeutung und werden als kleinstes Element innerhalb eines Batteriesystems definiert. [5] In der Fachliteratur jedoch wird der Begriff Lithium-Ionen-Zelle bevorzugt verwendet, weshalb dieser Begriff auch in dieser Masterarbeit fortlaufend verwendet wird. Ebenfalls wichtige Begriffe wie Batteriemodul oder Batteriesystem werden in Kapitel 2.2 genauer erläutert. Außerdem wird innerhalb dieser Masterarbeit auf die elektrochemische Funktionsweise der Lithium-Ionen-Zelle nicht weiter eingegangen, da das Hauptaugenmerk auf die ZfP-Verfahren gerichtet ist.

Zentrales Anliegen dieses Kapitels ist es einen Einblick in die Grundlagen der Lithium-Ionen-Batteriesystemherstellung zu bekommen sowie den Stand der Technik bei Samsung SDI bezogen auf den Schweißprozessablauf genauestens aufzuzeigen.

## 2.2 Aufbau eines Lithium-Ionen-Batteriesystems

Es gibt eine Vielzahl von Lithium-Ionen-Zellen in unterschiedlichsten Bauformen, welche in der Elektromobilität Anwendung finden. In dieser Masterarbeit geht es hauptsächlich um Zellen mit prismatischem Format, (siehe Abbildung 2-1) wie sie Samsung SDI Battery Systems für Automobilanwendungen anbietet. Zum Vergleich sind in Abbildung 2-2 auch die weiteren am Markt erhältlichen Zelltypen dargestellt.



Abbildung 2-1: Zelle mit prismatischer Bauform [4]

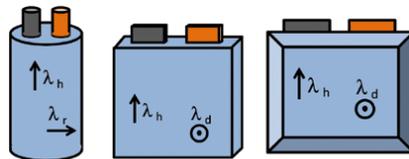


Abbildung 2-2: Derzeit verwendete Zelltypen in Lithium-Ionen-Batteriesystemen; Rundzelle (links); Prismatische Zelle (mittig); Pouch-Zelle (rechts) [6]

Der Aufbau der Zellen setzt sich aus zwei Anschlüssen (positives und negatives Terminal) sowie ein Berstventil zusammen und ist in Abbildung 2-3 inklusive Abmessungen dargestellt. Aufgabe des Berstventils ist es ein Aufreißen des Zellmantels durch zu hohen Gasinnendruck zu verhindern.

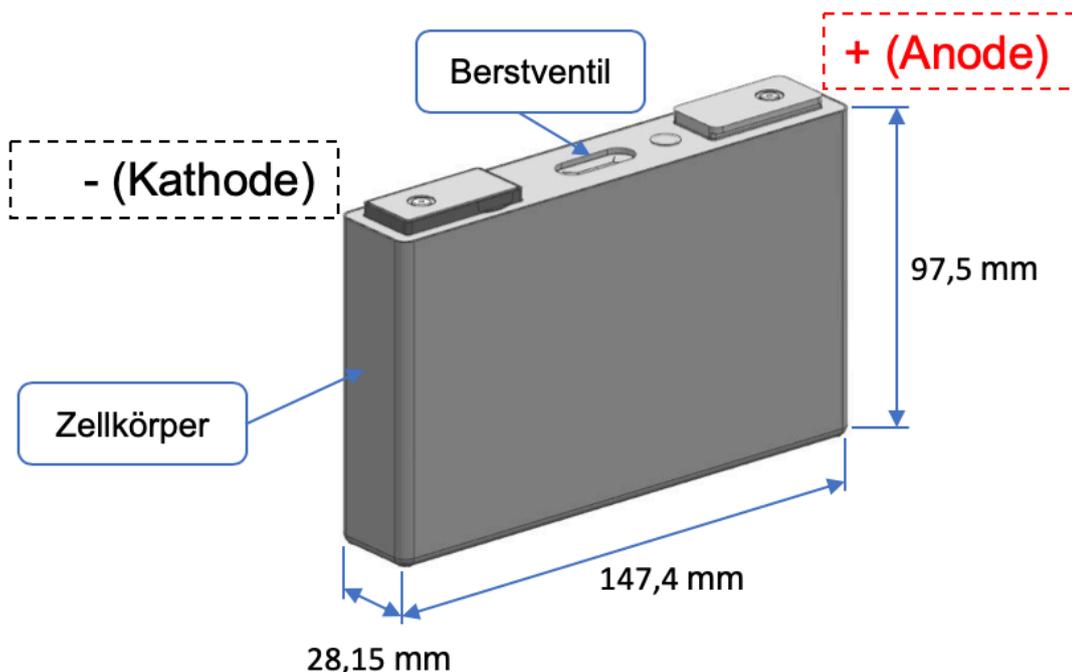


Abbildung 2-3: Aufbau einer prismatischen Samsung SDI Lithium-Ionen-Zelle [SDIBS, confidential]

Die technischen Daten der prismatischen Samsung SDI Lithium-Ionen-Zelle sind in Tabelle 2-1 für einen besseren Überblick aufgelistet.

Tabelle 2-1: Technische Daten einer prismatischen Samsung SDI Lithium-Ionen-Zelle [SDIBS, confidential]

	Einheit	Spezifikation
Abmessung (Breite)	mm	147,74 ± 0,3
Abmessung (Dicke)	mm	28,35 ± 0,4 28,75 (Max. Ausdehnung)
Abmessung (Höhe) exklusive Pole	mm	97,585 ± 0,3
Gewicht (Zelle)	kg	Max. 0,990 (Median 0,970)
Nennspannung	V	3,67
Ladepkapazität	Ah	60

Ein Batteriesystem (siehe Abbildung 2-4), welches in Elektro- und Hybridfahrzeugen eingesetzt wird, besteht aus einzelnen Lithium-Ionen-Zellen und Batteriemodulen, die in reihe und/oder parallel verschaltet sind. [2]

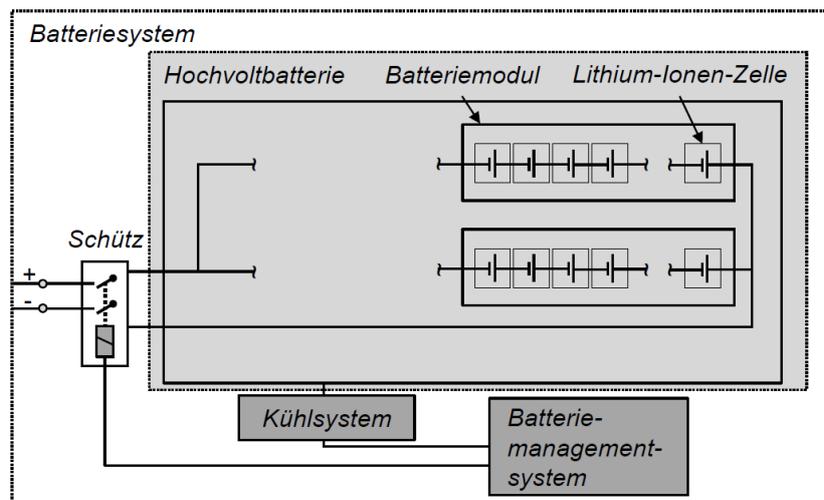


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Batteriesystems [7]

Die Zelle ist die kleinste Einheit der Batterie, bestehend aus vier Hauptkomponenten einschließlich Anode, Kathode, Separator und Elektrolyt. [2] Ein Batteriemodul besteht aus mehreren in Reihe und/oder parallel verschalteten Zellen, welche in einer mechanischen Struktur eingebettet sind. Die stapelbare und kompakte Ausführung der prismatischen Samsung SDI-Batteriezellen gewährleistet eine einfache Zellmodularität und ist bestens für verschiedene Konfigurationen einsetzbar. [2] Ein endgültiges Batteriesystem wird zusammengesetzt indem mehrere Batteriemodule in Serie und/oder parallel mit passenden Reglern und Sensoren, einschließlich Thermal- sowie Batteriemangement, in Verbindung gebracht werden und anschließend in eine Gehäusestruktur eingebettet werden. [2] Um diese Batterie ordnungsgemäß betreiben zu können, sind weitere Komponenten notwendig. Dies sind Anschlussterminals

(Plus/Minus), Modulbefestigung, Modul Controller (CMC), elektrische Zellverschaltung, Kühlung, sowie eine mechanische Struktur, welche die Lithium-Ionen-Zellen trägt. [8] Die Module sind so aufgebaut, dass die prismatischen Lithium-Ionen-Zellen in einer Ebene stehen und mit Zellverbindern den sogenannten Busbars (siehe Abbildung 2-5) elektrisch verschaltet werden. Eine weitere Aufgabe der Busbars ist die mechanische Ausdehnung der Zellen auszugleichen bzw. die Kräfte auf die Zellpole zu minimieren. Die thermische Ausdehnung der Busbars ist relativ klein im Vergleich zur mechanischen Ausdehnung der Zellen, weshalb sie vernachlässigbar ist. [8]

Zellverbinder (Busbar)



Abbildung 2-5: Zellen mit Zellverbindern verbunden (Batteriemodul) [SDIBS, confidential]

Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7 zeigen im Überblick den Produktentwicklungszyklus eines automotiven Batteriesystems von der Zelle bis zum Batteriepaket in Serienfertigung und das dazugehörige markterhältliche Produkt-Portfolio von Samsung SDI Battery Systems. [2]

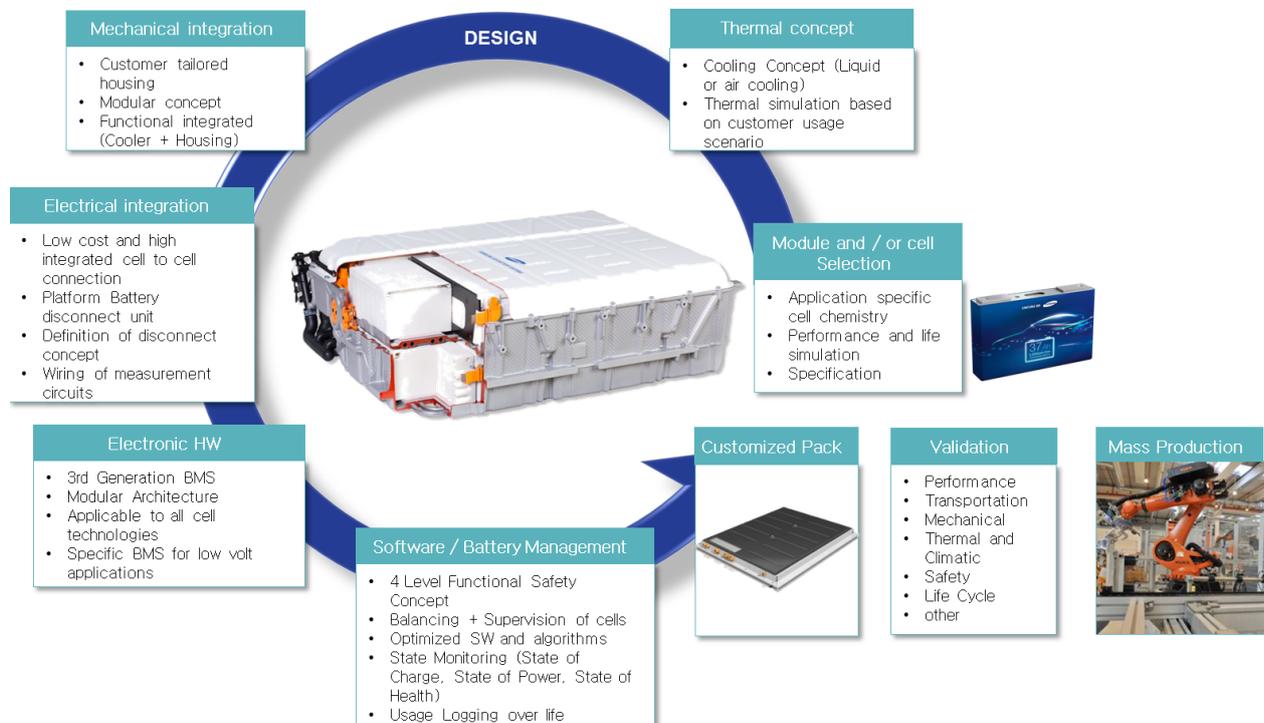


Abbildung 2-6: Produktentwicklungszyklus eines automotiven Batteriesystems von der Zelle bis zum Batteriepaket in Serienfertigung [2]

	12V	48V	PHEV	BEV Pack
				
	Serial Production	Serial Development	Serial Production	Serial Production (D/C)
Energy Content	0,15 - 0,5 kWh	0,2 - 3 kWh	6 - 18 kWh	36 - 100 kWh
Power	3 - 6 kW	12 - 25 kW	50 - 120 kW	100 - 500 kW
Voltage	12 V	48 V	400 V	400 V / 800 V
Weight	4 - 5 kg	< 10 kg	80 - 210 kg	400 - 600 kg
Cooling	passive	passive / air / liquid	liquid	passive / liquid
First SOP	2013	2018	2013	2010

Abbildung 2-7: Produktportfolio markterhältlicher Batteriesysteme von SAMSUNG SDI Battery Systems [2]

Um die Wirtschaftlichkeit von Elektrofahrzeugen ausschlaggebend zu verbessern, ist die Lebensdauer der einzelnen Module von größter Bedeutung. Die Laserschweißungen werden durch äußere Einwirkungen im Betrieb, aber auch wegen innerer Belastungen hervorgerufen durch Volumenänderungen welche aus den Lade-/Entladevorgängen resultieren beansprucht. Unvollständige bzw. fehlerhafte Schweißungen können zu schwerwiegenden Fehlern und im ungünstigen Fall zum Komplettausfall der gesamten Batterie führen. [8]

Auf Grund dessen ist eine dauerhafte sowie fehlerfreie Verbindung der einzelnen Zellen mittels Busbars durch eine Laserschweißung sicher zu stellen. [8]

## 2.3 Schweißprozessablauf

### 2.3.1 Allgemein

In diesem Abschnitt werden die für die vorliegende Masterarbeit relevanten Informationen rund um den Schweißprozessablauf genauer aufgezeigt.

Als Fügeverfahren für die Verbindung (elektrische Kontaktierung) der Zellpole mittels Zellverbinder wird wie bereits zuvor schon erwähnt von Samsung SDI das Laserstrahlschweißen eingesetzt, was auch dem aktuellen Stand der Technik für diese Fügeaufgabe entspricht. Im Gegensatz zu den ebenfalls häufig verwendeten Schraubverbindungen haben Verbindungen mittels Laserstrahlschweißung bessere elektrische sowie mechanische Eigenschaften. [9]

### 2.3.2 Lasersystemtechnik

Für die Herstellung der elektrischen Kontaktierung (Fügeverbindung) setzt sich die Lasersystemtechnik bei Samsung SDI aus einer Strahlquelle, einer Optik und einem Kamerasystem zusammen. Hierzu kommt als Strahlenquelle ein Ytterbium Faser Laser System YLS-2000 von IGP Laser GmbH zum Einsatz. Die Laserquelle emittiert eine maximale durchschnittliche Leistung von 2 kW bei einer Wellenlänge von 1064nm. Eine wichtige Eigenschaft dieses Faser Lasers ist, dass sich stark reflektierende Werkstoffe – im Fall bei Samsung SDI Aluminiumwerkstoffe – sehr gut bearbeiten lassen.

Mithilfe einer durch einen Industrieroboter (Kuka AG) geführten Scanneroptik Arges Fiber Rhino, welche mit einem Objektiv von Sill Optics GmbH & Co. KG ausgestattet ist und

dem Einsatz eines Abstandssensors des Automatisierungstechnikherstellers KEYENCE wird der Laserstrahl bezüglich der Füge­stelle positioniert. Durch den Einsatz einer Scanner-Fokussieroptik wird der Schweißprozess wirtschaftlicher, da man den Laserstrahl so deutlich schneller führen kann. Die Schweißoptik wird vor aufsteigenden Prozessdämpfen sowie Spritzern durch einen sogenannten Crossjet – einen aufgefächerten Gasstrom – geschützt. Um den Schweißprozessablauf außerhalb der Laserschutzkabine zu überwachen, wurde in die Scanneroptik von Arges ein Kamerasystem integriert. Die beschriebene Lasersystemtechnik wird in Abbildung 2-8 dargestellt.

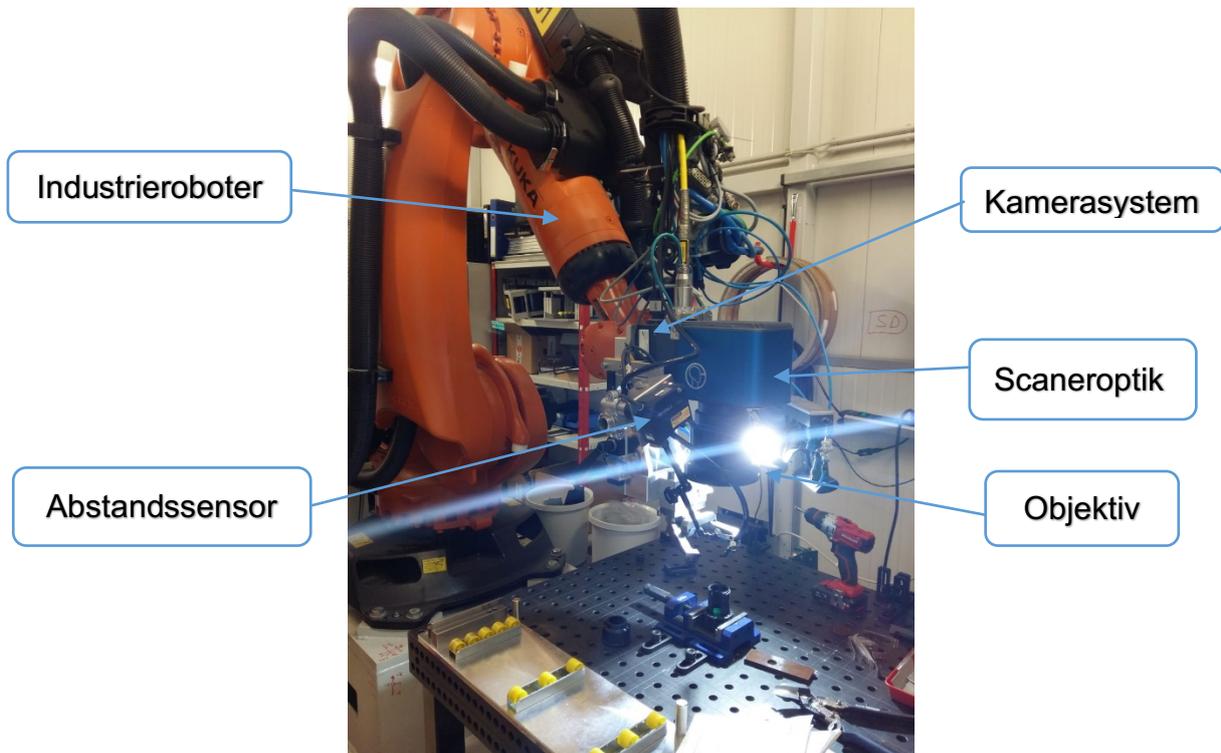


Abbildung 2-8: Aufbau der Roboterzelle mit Ytterbium Faser Laser System YLS-2000, [SDIBS, confidential]

Die beschriebenen Kenngrößen der Lasersystemtechnik sind in Tabelle 2-2 zusammengefasst.

Tabelle 2-2: Kenngrößen von Strahlquelle und Objektiv

<b>Strahlquelle</b>	
Ytterbium Faser Laser System YLS-2000 (IGP Laser GmbH)	
Max. Laserleistung $P_L$	2 kW
Wellenlänge $\lambda_{Yb}$	1064 nm
Kerndurchmesser des Lichtwellenleiters $d_{LWL}$	50 $\mu\text{m}$
<b>Objektiv</b>	
S4LFT1330/328 standard F-Theta (Sill Optics GmbH & Co. KG)	
Brennweite $f_f$	340 mm
Arbeitsabstand	203,4 mm
Scanfeldgröße	215 mm x 215 mm

### 2.3.3 Laserstrahlschweißen von Batteriemodulen

Bei der Durchführung der Laserstrahlschweißung elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Zellen, wird auf höchste Qualitätsansprüche geachtet. Ziel von Samsung SDI ist es, eine fehlerfreie sowie wirtschaftliche Ausführung der Schweißnaht durch den Laserschweißprozess zu garantieren. In diesem Kapitel ist der Laserstrahlschweißprozess von Batteriemodulen näher beschrieben.

Die einzelnen Verbindungsstellen zwischen den prismatischen Zellen werden in Abbildung 2-9 dargestellt. Untersuchungsgegenstand dieser Masterarbeit ist die Zellpolverbindung mittels Zellverbinder, wobei Samsung auf artgleiche Werkstoffe (siehe Kapitel 2.3.4) der Zellpole und Zellverbindern setzt.

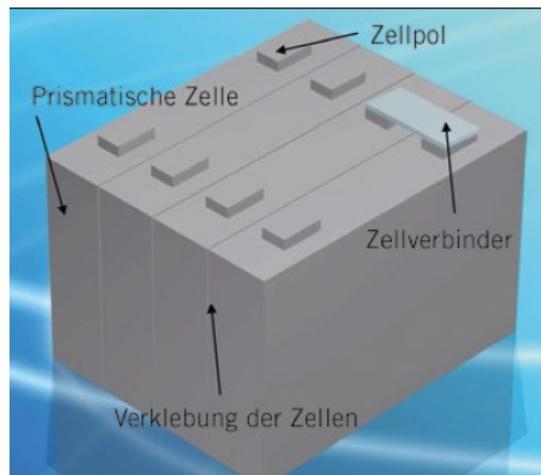


Abbildung 2-9: Verbindungsstellen zwischen den Zellen [9]

Eines der Hauptaugenmerke bei der Laserstrahlschweißung der elektrischen Kontaktierung welche als Überlappverbindung (Stoßart der Schweißnaht) ausgeführt wird ist, dass es nicht zu einer Schädigung der Lithium-Ionen-Zelle – hervorgerufen z.B. durch eine falsch eingestellte Laserleistung – oder einer mangelnden elektrischen Kontaktierung (unzureichende Einschweißtiefe etc.) kommt. Beispiele von Schädigungen sind eine zu hohe Temperaturbelastung der Zell-Pole oder im schlechtesten Fall eine Durchschweißung des Zellpoles, was einen Komplettausfall bzw. eine Zerstörung der Lithium-Ionen-Zelle bewirken würde. Ein weiteres Hauptaugenmerk sind natürlich die auftretenden Ungängen bzw. Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht, welche innerhalb der Toleranzen laut DIN EN ISO 13919-2 [10] (siehe Kapitel 2.3.5) liegen sollten.

Damit es aber nicht zu Schädigung der Lithium-Ionen-Zelle sowie Unregelmäßigkeiten außerhalb der Toleranzgrenzen kommt, wurden diverse Untersuchungen der Schweißnähte bezüglich der richtigen Schweißparameter während der Laserschweißung, der Nahtform (Einschweißtiefe, Schweißnahtdurchmesser etc.), der Nahtlage am Busbar sowie des Schweißbereiches am Zellpol anhand von Sichtüberprüfungen, Schliiffuntersuchungen sowie Zugversuche (Prüfen der Abziehkraft) durchgeführt. Die Untersuchungen bezüglich der Schweißnähte, welche nicht Teil dieser Masterarbeit sind, wurden vorab von der Technischen Universität Graz, der Montanuniversität Leoben sowie von Samsung SDI Battery Systems durchgeführt.

### Schweißparameter:

Das Ergebnis beim Laserstrahlschweißen im Besonderen die Schweißnahtgeometrie hängt von einer Vielzahl von Parametern ab. Wie bereits zuvor schon erwähnt, ist es zur Ermittlung idealer Prozessparameter beim Laserschweißen notwendig, diverse Untersuchungen durchzuführen, bei denen relevante Schweißparameter wie Laserleistung, Vorschub, Fokusslage etc. variiert werden, um diese im Anschluss meist mit zerstörender Werkstoffprüfung wie z.B. der Erstellung von Schlißbildern auszuwerten. Des Weiteren sollte noch erwähnt werden, falls die Verwendung von Schutzgas – bei Samsung SDI meist Stickstoff – notwendig ist, muss der Laserstrahlprozess und somit auch die Schweißparameter ebenfalls darauf abgestimmt sein. Der prozessbedingte Aufwand beim Ablauf der Schweißparameterfindung wird in Abbildung 2-10 dargestellt.



Abbildung 2-10: Entwicklung der idealen Schweißparameter [Dokument: FCA\_PROCESS\_CCU-WELDING\_V1.1, SDIBS, confidential]

Die Prozessparameter für das Laserstrahlschweißen von Batteriemodulen werden in Tabelle 2-3 aufgelistet. Im darauffolgenden Absatz sind die wichtigsten Parameter aus dieser Tabelle erläutert.

Tabelle 2-3: Schweißparameter für das Laserstrahlschweißen von Batteriemodulen [SDIBS, confidential]

Parameter	Wert
Strahlleistung P	2 kW
Fokusslage	$z = -1$ mm
Laserstrahldurchmesser (Fokusslage)	160 $\mu$ m
Brennweite	$f = 203,4$ mm
Schweißgeschwindigkeit	57 mm/s
Schutzgas	Kein Schutzgas L/min
Amplitude Wobbling	0,25 mm
Frequenz Wobbling	350 Hz
Vorwärmen	Kein Vorwärmen
Slop-In	0,7 mm
Slop-Out	0,8 mm
Slop-In Startleistung	40 %
Slop-Out Endleistung	0 %
Schweißnahtform	Kreis

Wie bereits in Kapitel 2.3.2 erwähnt handelt es sich bei der Strahlenquelle um ein Ytterbium Faser Laser System YLS-2000 von IPG Laser GmbH mit einer Strahlleistung von 2kW. Bei der Durchführung der Schweißung wird das volle Leistungspotential des Lasers ausgenutzt um die weiter unten beschriebene Verfahrensvariante Tiefschweißen sicher zu stellen. Für den Tiefschweißprozess sollte die Fokusslage ca. 1/3 der Materialstärke unterhalb der Werkstückoberfläche liegen, was auch den negativen z-Wert in obiger Tabelle erklärt. Für das Verständnis der Fokusslage (siehe Abbildung 2-11) sollen die geometrischen Kenngrößen zur Fokussierung von Laserstrahlen Brennweite, Strahldurchmesser und Fokustiefe eingeführt sowie einfach und verständlich erläutert werden. Diese Kenngrößen werden für die Beschreibung der „Form des Laserstrahles“ – auch als Strahlkaustik bezeichnet [11] – herangezogen.

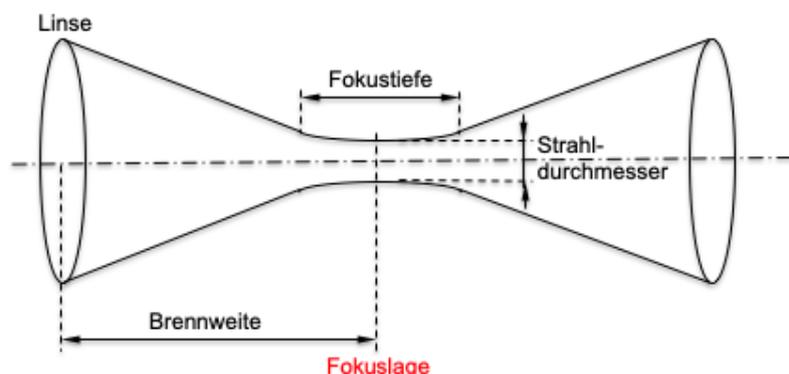


Abbildung 2-11: Darstellung wichtiger geometrischer Kenngrößen von Laserstrahlen; in Anlehnung an [11]

Erste wichtige Kenngröße zur Beschreibung der Strahlkaustik ist die Brennweite unter der man den Abstand zwischen Linse und dem kleinsten Strahldurchmesser (Fokuslage) versteht. Die Fokustiefe oder auch Rayleighlänge beschreibt den Abstand zwischen den beiden Strahlquerschnittsflächen, welche die doppelte Strahlquerschnittsfläche wie jene in der Fokuslage aufweisen. Diese Kenngröße ist maßgebend für die maximal mögliche Schweißtiefe sowie für die Prozessstabilität. Der Strahldurchmesser beschreibt den Durchmesser des Laserstrahls, welcher vor und nach der Fokuslage immer größer wird. [11]

Zum besseren Verständnis wird in Abbildung 2-12 der Einfluss der Fokuslage auf die Schweißnahtgeometrie dargestellt.

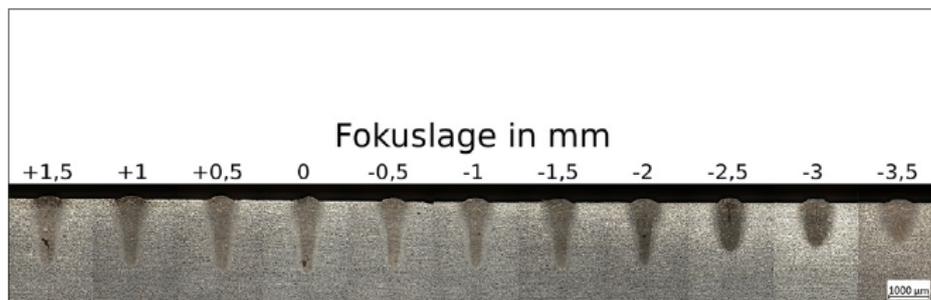
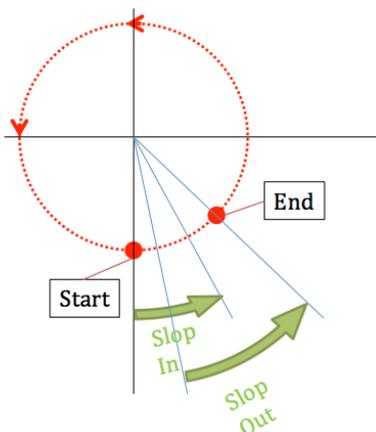


Abbildung 2-12: Einfluss der Fokuslage auf die Schweißnahtgeometrie (Makroschliff) [12]

Als beste Schweißnahtform hinsichtlich der Lebensdauer und mechanischen Eigenschaften ging aus den durchgeführten Untersuchungen seitens Samsung SDI eine kreisförmige Naht hervor, welche in Abbildung 2-13 mit weiteren wichtigen Geometrieangaben dargestellt ist. Die Strahlleistung steigt zu Beginn der Schweißung langsam an (Slop-In) und am Ende der Schweißung fällt diese kontinuierlich ab (Slop-Out). Zusätzlich zum Schweißen mit Leistungsrampen (Slop-In, Slop-Out) sollte die Endposition der Laserstrahlschweißung  $30^\circ$  nach der Anfangsposition definiert werden, um eine saubere Schweißnaht als Ergebnis zu erhalten.



#### **Schweißnahtgeometrie:**

Geometrie:	Kreis
Durchmesser D [mm]:	10,7 mm
Weldangle [mm/°]:	$360^\circ + 30^\circ$
Schweißposition:	PA; Wannanlage
Stoßart:	Überlappstoß

Abbildung 2-13: Schweißnahtausführung [Dokument: FCA\_PROCESS\_CCU-WELDING\_V1.1, SDIBS, confidential]

Weiteres wird die Laserschweißung im Überlapp (englisch: wobbeln, taumeln) ausgeführt, was ein besseres Entgasen des Schmelzbades hervorruft. [13] Für erfolgreiche Laserschweißungen im Überlapp sind folgende Parameter ausschlaggebend:

- die Geometrie
- die Amplitude
- die Frequenz. [13]

Erster obiger Parameter beschreibt dabei den Mikrofpfad, welcher vom Laser auf dem Werkstück abgebildet wird. Realisierbar sind zum Beispiel Achten oder Kreise. Unter der Amplitude versteht man die halbe Breite orthogonal zur Vorschubrichtung des Makropfades des Lasers auf dem Werkstück. Die Frequenz legt die Anzahlen der Wobbelgeometrie pro Sekunde fest. Der Überlapp der Einzelkreise spiegelt dabei das Ergebnis aus Geometrie, Amplitude, Frequenz sowie Vorschubgeschwindigkeit wider. [13]

In Abbildung 2-14 wird ein Beispiel einer kreisförmigen Wobbelgeometrie bei 0,5 mm Amplitude verdeutlicht.

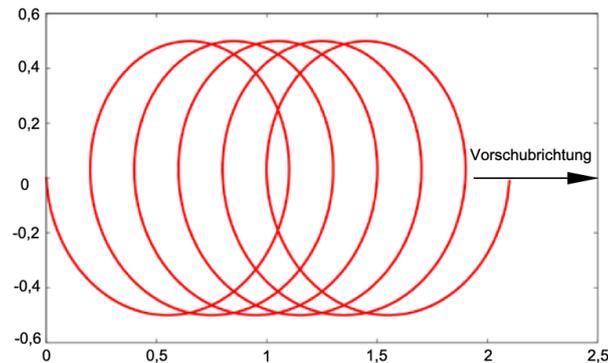


Abbildung 2-14: Beispiel: Kreisförmige Wobbelgeometrie bei 0,5 mm Amplitude [13]

Ausschlaggebend für die Geometrie der Schweißnaht ist auch der Schweißbereich direkt auf den Polen des sogenannten Zelldeckel der Lithium-Ionen-Zelle.

In Abbildung 2-15 wird der Zelldeckel der Lithium-Ionen-Zelle mit den definierten Schweißbereichen auf den Zellpolen dargestellt. Die Laserschweißung sollte innerhalb der vorgegebenen Schweißbereiche liegen, um den Übergangswiderstand zwischen Zellpol und Zellverbinder möglichst gering zu halten.

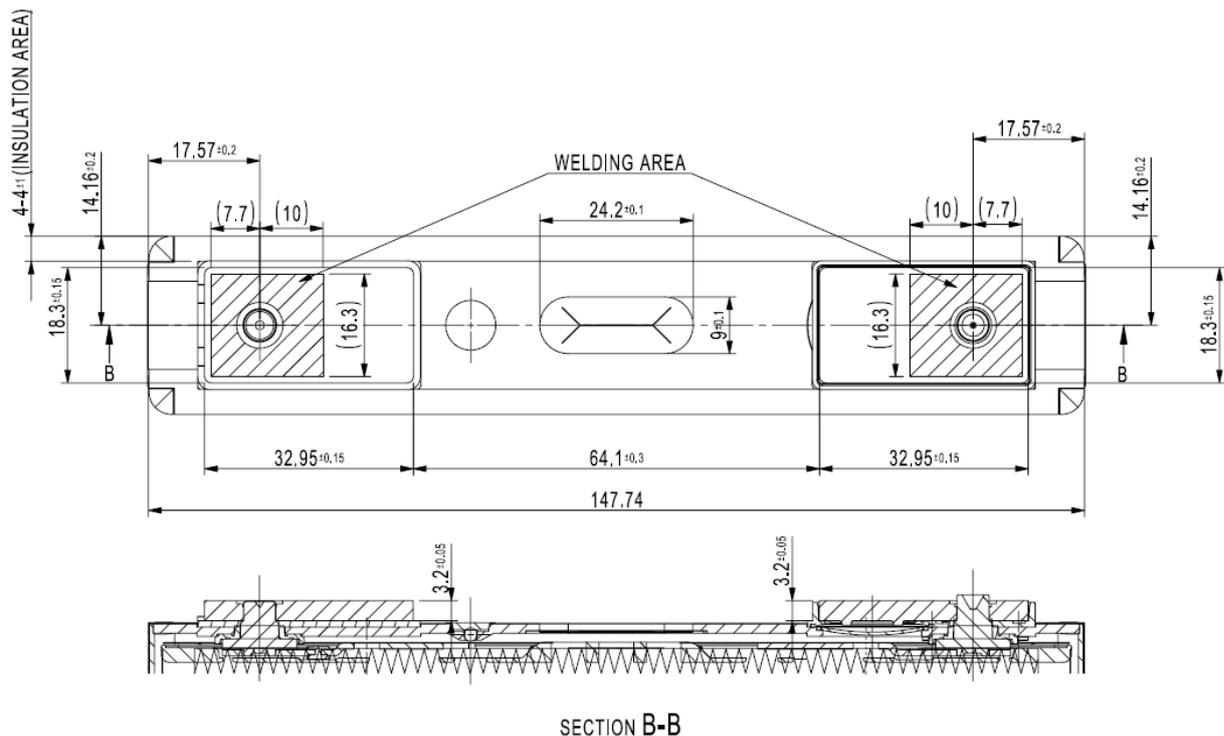


Abbildung 2-15: Schweißbereich auf den Zellpolen [SDIBS, confidential]

Zum Abschluss dieses Kapitels ist die angestrebte Verfahrensvariante, welche sich durch die vorgestellten Parameter beim Laserstrahlschweißen einstellen sollte erläutert.

### Verfahrensvariante – Tiefschweißen:

Beim Laserstrahlschweißen unterscheidet man zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen (siehe Abbildung 2-16), wobei letztere Verfahrensvariante bei der Laserstrahlschweißung der Rundnaht eingesetzt wird und folgenden Zusammenhang umfasst.

Der Laserstrahl-Tiefschweißeffekt tritt ab einer Leistungsdichte von  $10^6 \text{ W/cm}^2$  auf. [14] Ab dieser Leistungsdichte tritt ein starker Verdampfungsprozess ein d.h. es wird an der Werkstückoberfläche lokal die Verdampfungstemperatur erreicht. Dies hat zur Folge, dass der Laserstrahl ein feines Loch in die Werkstückoberfläche bohrt. Es kommt zur Ausbildung der sogenannten Dampfkapillare (Keyhole), deren Durchmesser in etwa der des Laserstrahles auf der Werkstückoberfläche entspricht (0,2-1 mm). Die Tiefe des Keyholes entspricht in etwa der Einschweißung. Aufgrund dieser Kapillarbildung kann der Laserstrahl nun tiefer in das Werkstück eindringen, weshalb diese Verfahrensvariante auch als Tiefschweißen bezeichnet wird. Der Laserstrahl kann im Keyhole nahezu vollständig in Wärme umgewandelt werden. Die Dampfkapillare ist von flüssiger Phase umgeben und wird durch den Druck des verdampfenden Materials – also dem aus dem Kanal ausströmenden Metalldampf – aufrechterhalten. [15], [16]

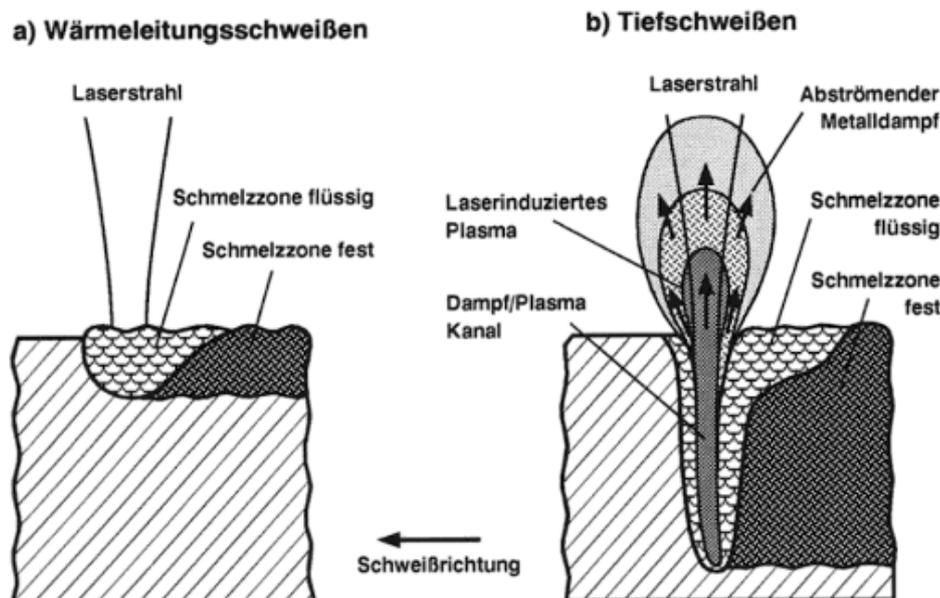


Abbildung 2-16: Verfahrensvarianten Laserstrahlschweißen [16]

### 2.3.4 Werkstoff

Bei der elektrischen Kontaktierung von Lithium-Ionen-Zellen mittels Laserstrahlschweißung handelt es sich innerhalb dieser Masterarbeit um eine artgleiche Werkstoffpaarung, wobei als Busbarwerkstoff EN AW-1050A-H14 mit einem Aluminiumanteil von 99,5% und als Zellpolwerkstoff EN AW-3003-H14 mit einem Aluminiumanteil von  $> 95\%$  verwendet wird. Diese Materialien werden üblicherweise wegen ihrer Reinheit (hoher Aluminiumanteil) als Leiterwerkstoffe in Hochvoltspeichern eingesetzt. Durch die Zugabe von Legierungselementen werden die Schweißbarkeit und die mechanischen Eigenschaften gesteigert, können aber die elektrische Leitfähigkeit

verringern [5]. Das Fügen artgleicher Werkstoffe gilt als metallurgisch unproblematisch, ist aber im Hinblick auf die Qualitätsanforderung durchaus anspruchsvoll. Die elektrischen sowie die mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe sind in Tabelle 2-4 aufgelistet.

Tabelle 2-4: Elektrische Leitfähigkeit und Mechanische Eigenschaften nach DIN EN 485-2 von Busbarwerkstoff und Zellpolwerkstoff

<b>Elektrische und mechanische Eigenschaften</b>	<b>Busbarwerkstoff EN AW-1050A-H14</b>	<b>Zellpolwerkstoff EN AW-3003-H14</b>
Zugfestigkeit $R_m$	105 MPa	145 MPa
E-Modul E	70 GPa	70 GPa
0,2 % Dehngrenze $R_{p0,2}$	85 MPa	125
Querkontraktionszahl $\nu$	0,33 [5]	0,33 [5]
Elektrische Leitfähigkeit $\sigma$	34,7 m/( $\Omega$ mm <sup>2</sup> ) [5]	34,7 m/( $\Omega$ mm <sup>2</sup> ) [5]
Bearbeitungszustand	H14: Kaltverfestigt - 1/2 hart	H14: Kaltverfestigt - 1/2 hart

Verglichen mit dem Werkstoff Stahl erschweren die physikalischen Eigenschaften von Aluminium den Laserschweißprozess deutlich. Beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen kommt es aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit des Materials zu einer schnellen Ableitung der eingebrachten Energie aus der Wärmeinflusszone. Um den Tiefschweißprozess (siehe Kapitel 2.3.3) aufrecht zu erhalten, muss deshalb lokal sehr viel Energie in das Werkstück eingebracht werden. Ist das nicht der Fall, so kollabiert das Keyhole und es kann zur Bildung von Schmelzbadauswürfen sowie Schweißspritzern kommen. Eine weitere Problematik bezüglich der physikalischen Eigenschaften von Aluminium stellt die geringe Oberflächenabsorption von lediglich 11% und der damit verbundenen Reflexion der übrigen Strahlung dar. [17]

In Tabelle 2-5 werden die physikalischen Eigenschaften von reinem Aluminium im Vergleich zu Eisen dargestellt.

Tabelle 2-5: Vergleich physikalischer Eigenschaften von Aluminium und Eisen [5], [17]

<b>Physikalische Eigenschaften</b>	<b>Aluminium</b>	<b>Eisen</b>
Schmelztemperatur $T_s$	660 °C	1530 °C
Dichte $\rho$	2,7 g/cm <sup>3</sup>	7,86 g/cm <sup>3</sup>
Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	221 W/(m·K)	67 W/(m·K)
Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha$	23,5 * 10 <sup>-6</sup> 1/K	11,8 * 10 <sup>-6</sup> 1/K
Spezifische Wärmekapazität $c_p$	896 J/(kg·K)	460 J/(kg·K)
Absorptionsgrad	11 %	31 %

Ein weiteres Problem beim Schweißen von Aluminium ist die sehr hohe Affinität zu dem in der Luft enthaltenen Sauerstoff. Ohne Schutzgas (Helium oder Argon) hat dies eine Oxidschichtbildung während des Schweißprozesses als Folge, was zu einer negativen Beeinträchtigung des Schweißprozesses sowie der Nahtoberraupenqualität führt. [17] Mit der Problematik beim Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen hat sich der Autor aus [17] auseinandergesetzt.

### 2.3.5 Normen

Um die Qualität der Schweißnaht sowie einen stabilen Schweißprozess zu gewährleisten, werden von Samsung SDI die in Tabelle 2-6 tabellarisch aufgelisteten Normen und Merkblätter für die Durchführung der Laserschweißung herangezogen.

Tabelle 2-6: Verwendete Normen für den Laserschweißprozess bei Samsung SDIBS

DIN EN ISO 13919-2	Elektronen- und Laserschweißverbindungen – Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten Teil 2: Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen
DIN EN ISO 15609-4	Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe – Schweißanweisung Teil 4: Laserschweißen
Merkblatt DVS 3203-1	Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Verfahren und Laserstahlschweißanlage
Merkblatt DVS 3203-2	Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Prüfen von Schweißparametern
Merkblatt DVS 3203-3	Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Schweißseignung von metallischen Werkstoffen
Merkblatt DVS 3203-4	Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Nahtvorbereitung und konstruktive Hinweise
Merkblatt DVS 3214	Unregelmäßigkeiten an Laserschweißnähten – Ursachen und Abhilfemaßnahmen
ÖNORM EN ISO 6520-1	Schweißen und verwandte Prozesse – Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen Teil 1: Schmelzschweißen

Die Normen DIN EN ISO 13919-2 sowie ÖNORM EN ISO 6520-1 werden in den Kapiteln 2.3.5.1 und 2.3.5.2 näher erläutert, da die Klassifizierung von Unregelmäßigkeiten sowie die Einteilung in Bewertungsgruppen (B,C,D) die Basis für die Durchführung von zerstörungsfreien Prüfungen schafft, da vorab festgestellt werden muss, nach was überhaupt gesucht wird und wie man es bewertet. Auf das Merkblatt DVS 3203 bestehend aus Teil 1 bis Teil 4 wird nur überblicksmäßig in Kapitel 2.3.5.4 eingegangen, da das Hauptaugenmerk dieser Masterarbeit auf der richtigen Bestimmung der Unregelmäßigkeiten laut Norm sowie in weiterer Folge der Nachweis dieser anhand geeigneter, serientauglicher ZfP-Methoden liegt und nicht in der Beschreibung der sachgemäßen Durchführung der Laserstrahlschweißung bei gegebenem Werkstoff.

#### 2.3.5.1 Klassifizierung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten nach ÖNORM EN ISO 6520-1 [3]

Die genaue Klassifizierung und Bezeichnung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Schweißverbindungen wird in der ÖNORM EN ISO 6520 Teil 1: Schmelzschweißen beschrieben. Hierfür sind die Unregelmäßigkeitsarten zusammen mit Erklärungen und wenn notwendig mit hinzugefügten Skizzen definiert. Metallurgische Unregelmäßigkeiten sind nicht in dieser Norm enthalten. Diese Norm enthält ebenfalls

keine einzuhaltenden Grenzwerte für die darin angeführten Unregelmäßigkeiten, dient aber als Basis für weitere Normen, in denen solche Grenzwerte festgelegt sind.

Für die Anwendung dieser Norm sind folgende Begriffe von Bedeutung:

- **Unregelmäßigkeit:** Fehlstelle in der Schweißung oder eine Abweichung von der vorgesehenen Geometrie [3]
- **Fehler:** Unzulässige Unregelmäßigkeit [3]

Im Folgenden wird auf den Inhalt der ÖNORM EN ISO 6520-1 eingegangen. Man unterscheidet sechs Hauptgruppen von geometrischen Unregelmäßigkeiten, die in Tabelle 2-7 angegeben bzw. erläutert sind.

Tabelle 2-7: Hauptgruppen von geometrischen Unregelmäßigkeiten in ÖNORM EN ISO 6520-1, Auszug aus [3]

Referenz Nr.	Benennung	Erklärungen
100	Risse	Riss: Unregelmäßigkeit, die örtlich durch Trennungen im festen Zustand erzeugt wird und bei der Abkühlung oder infolge von Spannungen auftreten kann
200	Hohlräume	Gaseinschluss: Hohlraum, der durch eingeschlossenes Gas gebildet wurde (Poren, Porosität, Porennester etc.) Lunker: Hohlraum infolge Schrumpfung beim Erstarren
300	Feste Einschlüsse	fester Einschluss: feste Fremdstoffeinlagerung im Schweißgut
400	Bindefehler und ungenügende Durchschweißung	Bindefehler: unzureichende Bindung zwischen Schweißgut und Grundwerkstoff oder zwischen den nachfolgenden Schweißgutschichten
500	Form- und Maßabweichungen	Formfehler: unvollkommene Form der äußeren Oberfläche der Schweißung oder mangelhafte Geometrie der Verbindung
600	Sonstige Unregelmäßigkeiten	Unregelmäßigkeiten, die nicht in die Gruppen 1 bis 5 eingeordnet werden konnte z.B. Zündstellen, Spritzer, Schleifkerben, Nahtversatz, Anlauffarben

Neben der Benennung und der Erklärung ist in der ÖNORM EN ISO 6520-1 für jede Unregelmäßigkeit auch eine Referenz Nr. als Kurzbezeichnung angegeben. Ein Beispiel für den Aufbau dieser Referenz Nr. für die Kurzbezeichnung von Rissen ist in Tabelle 2-8 angegeben. Demnach wäre z.B. die Nummer 1021 ein Querriss im Schweißgut.

Tabelle 2-8: Kurzbezeichnung diverser Rissarten in ÖNORM EN ISO 6520-1 [3]

Hauptgruppe 1. und 2. Stelle der Referenz Nr.	Art der Unregelmäßigkeit 3. Stelle der Referenz Nr.	Lage der Unregelmäßigkeit 4. Stelle der Referenz Nr.
10: Riss	1: Längsrichtung 2: Querrichtung 3: Sternförmige Risse 4: Endkraterriss 5: Rissanhäufung 6: Verästelte Risse	1: im Schweißgut 2: in der Schmelzlinie 3: in der Wärmeeinflusszone 4: im Grundwerkstoff 5: Endkraterriss: längs 6: Endkraterriss: quer 7: Endkraterriss: sternförmig

Jeder der 6 Hauptgruppen von geometrischen Unregelmäßigkeiten sind nochmals weiter unterschiedliche Unregelmäßigkeiten zugeordnet. Die wichtigsten Unregelmäßigkeiten werden im Anhang 11.1 bezogen auf die 6 Hauptgruppen tabellarisch angeführt.

### 2.3.5.2 Bewertungsgruppe für Laserstrahl-Schweißverbindungen nach DIN EN ISO 13919-2 [10]

Diese Europäische Norm kann im Rahmen eines ausführlichen Qualitätssystems zur Fertigung zufriedenstellender laserstrahlgeschweißter Schweißverbindungen von Aluminium und seinen Legierungen angewendet werden und legt drei Bewertungsgruppen (siehe Tabelle 2-9) für Unregelmäßigkeiten fest, wobei abhängig vom Schweißprozess und vom Grundwerkstoff nur gewisse Unregelmäßigkeiten aus der ÖNORM EN ISO 6520-1 erfasst werden. [10]

Tabelle 2-9: Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten; Auszug aus [10]

Kurzzeichen	Bewertungsgruppe
D	niedrig
C	mittel
B	hoch

Die Bewertungsgruppen sind mit D, C und B benannt worden, wobei die Qualitätsanforderungen von niedrig (Bewertungsgruppe D) bis hoch (Bewertungsgruppe B) ansteigen. Bei der Wahl der Bewertungsgruppe für eine bestimmte Anwendung sollten die nachfolgenden Verfahren (z.B. Oberflächenbehandlung), die Konstruktionsgegebenheiten, die Beanspruchungsarten (z.B. statisch oder dynamisch), die Auswirkungen von Unregelmäßigkeiten sowie die Betriebsbedingungen (z.B. Temperatur) berücksichtigt werden. Es sollten auch wirtschaftliche Faktoren wie Kosten für das Schweißen, Beaufsichtigen, Prüfen und Ausbessern einbezogen werden. Die Unregelmäßigkeiten werden der tatsächlichen Größe entsprechend angegeben, und ihre Bewertung sowie ihr Nachweis können die Inanspruchnahme einer oder mehrerer zerstörungsfreier Prüfverfahren notwendig machen. [10]

Die Grenzwerte der jeweiligen Unregelmäßigkeiten werden in Tabellen angeführt. Diese Tabellen ermöglichen es, die Qualität einer Schweißung auf der Basis von Größe, Art und Anzahl der vorhandenen Unregelmäßigkeit zu beschreiben. Tabelle 2-10 zeigt ein Beispiel einer solchen Tabelle für Risse.

Tabelle 2-10: Beispiel Unregelmäßigkeit – Riss; Auszug aus [10]

Nr	Unregelmäßigkeit, Benennung	EN ISO 6520-1 Verweis	Bemerkungen	Grenzwerte für die Unregelmäßigkeiten bei Bewertungsgruppen		
				niedrig D	mittel C	hoch B
1	Riss	100	Alle Arten von Rissen mit Ausnahme von Mikrorissen (Rissfläche < 1 mm <sup>2</sup> ). Endkraterisse siehe Nr 2.	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig

Die Bewertungsgruppe ist im Normalfall auf eine einzelne Schweißnaht bezogen und nicht auf das gesamte Schweißbauteil. Es kann aber durchaus vorkommen, dass in einer einzelnen Schweißnaht unterschiedliche Bewertungsgruppen für verschiedene Unregelmäßigkeiten verlangt sind. [10]

Die Laserschweißverbindungen werden bei Samsung SDIBS anhand der Bewertungsgruppe D (niedrig) bewertet.

### 2.3.5.3 Schweißanweisung (WPS) nach DIN EN ISO 15609-4 [18]

Diese Internationale Norm verlangt vom Hersteller, dass vor Beginn der Fertigung eine vorläufige Schweißanweisung (pWPS) bzw. Schweißanweisung (WPS, english: welding procedure specification) angelegt wird. [18]

Die Schweißanweisung muss alle notwendigen Angaben über die Schweißaufgabe enthalten wie z.B.:

- Teilevorbereitung zur Durchführung der Schweißaufgabe
- Gestaltung der Verbindung
- Werkstoffe
- Vorwärmen
- Schweißprozess (Laserschweißen – EN ISO 4036: Prozess 52) sowie Schweißparameter
- Nachbearbeitung der Schweißverbindung (schleifen etc.)
- Wärmebehandlung (während der Fertigung oder im Anschluss). [18]

Schweißanweisungen können für einen festgelegten Dickenbereich der zu verbindenden Fügeteile sowie für einen Bereich der Zusatz- und Grundwerkstoffe gelten. Hersteller können es darüber hinaus bevorzugen, Arbeitsanweisungen für jede einzelne Schweißaufgabe als Teil der genauen Fertigungsplanung anzufertigen. [18]

### 2.3.5.4 Merkblätter DVS 3203 Teil 1 bis Teil 4

Das Merkblatt DVS 3203, besteht aus 4 Teilen:

- Teil 1 Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Verfahren und Laserstahlschweißanlage [19]
- Teil 2 Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Prüfen von Schweißparametern [11]
- Teil 3 Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Schweißseignung metallischer Werkstoffe [20]
- Teil 4 Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen – Nahtvorbereitung und konstruktive Hinweise [21]

Innerhalb des Merkblattes DVS 3203 sind Anleitungen und Hinweise über das Schmelzschweißen mit Laserstrahlen enthalten. Es wurde in Zusammenarbeit mit

Forschungsinstituten sowie Herstellern und Anwendern von Laserstrahlschweißanlagen aufgestellt. Zweck dieses Merkblattes ist Schweißaufsichts- und Prüfpersonal, das mit Qualitätssicherungs- und Fertigungsaufgaben betraut ist, als auch Konstrukteuren und Arbeitsvorbereitern bei der Anwendung des Schmelzschweißens mit Laserstrahlen zu unterstützen. Der erste Teil dieses Merkblattes bietet eine Übersicht über das Schweißen mit Laserstrahlen, beschreibt die wichtigsten Verfahrensmerkmale sowie den prinzipiellen Aufbau (Hauptkomponenten) einer Laserschweißanlage. [19]

Teil 2 enthält Anleitungen zur einheitlichen und vergleichbaren Prüfung von Parametern für das Laserstrahlschweißen. Innerhalb von Teil 3 wird die Schweißseignung verschiedener Werkstoffe diskutiert, sowie Maßnahmen für die Erleichterung der Schweißaufgabe und erprobten Nahttiefen definiert. Der 4. und letzte Teil dieses Merkblattes enthält Empfehlungen zum fachgerechten Konstruieren und zur Vorbehandlung von Werkstücken zum Laserstrahlschweißen. [11], [19]–[21]

### **2.3.6 Auftretende Unregelmäßigkeiten bei lasergeschweißten Batteriezellen**

Ein fehlerfreier Produktionsprozess von Batteriemodulen erfordert einiges an angesammeltes Know-how und sollte ständig weiterentwickelt werden, da ständig neuartige Probleme innerhalb der Batteriemodulfertigung auftreten und auch die Qualitätsanforderungen seitens der Kunden immer höher werden.

Innerhalb dieses Kapitels wird zuerst ein Überblick über die auftretenden Unregelmäßigkeiten in der Batterieproduktion geschaffen. Hauptaugenmerk wird dabei auf die praktische Anwendung der in Kapitel 2.3.5 vorgestellten Normen gelegt d.h. es sind die während der Laserschweißung der elektrischen Kontaktierung auftretenden Unregelmäßigkeiten laut ÖNORM EN ISO 6520-1 klassifiziert und kurz erläutert. Dazu passend sind beispielhaft Schliffbilder mit Unregelmäßigkeiten dargestellt, welche mithilfe der Bewertungsgruppe D laut DIN EN ISO 13919-2 als IO (in Ordnung) und NIO (nicht in Ordnung) bewertet sind (siehe Kapitel 2.3.6.1). Darauf folgend wird aufgezeigt, dass nicht alle Unregelmäßigkeiten mithilfe von Normen klassifizierbar sind, sondern, dass es auch produktionsbedingte Unregelmäßigkeiten gibt, welche eigens dafür angelegte Grenzwerte bzw. Bewertungsmethoden benötigen, die von den zuständigen Schweißaufsichtspersonen – meistens Personen mit einer IWE-(International Welding Engineer) Ausbildung – in diversen praktischen Untersuchungen zu definieren sind (siehe Kapitel 2.3.6.2).

#### **2.3.6.1 Klassifizierte Unregelmäßigkeiten laut ÖNORM EN ISO 6520-1**

In der Tabelle 2-11 werden mithilfe der in Kapitel 2.3.5 vorgestellten ÖNORM EN ISO 6520-1 die bei lasergeschweißten Batteriezellen auftretenden Fehler bzw. Unregelmäßigkeiten klassifiziert. Festgestellt wurden diese Unregelmäßigkeiten durch zahlreiche zerstörungsfreie Werkstoffprüfungen, wie der Sichtprüfung (englisch: visual testing (VT)) für Fehler bzw. Unregelmäßigkeiten, die sich auf der Werkstückoberfläche befinden sowie durch zerstörende Werkstoffprüfungen wie das Anfertigen von Schliffbildern für Fehler bzw. Unregelmäßigkeiten innerhalb des Werkstoffes. Diese Klassifizierung dient als Grundlage für spätere Untersuchungen innerhalb dieser Diplomarbeit, da vorab schon genauestens definiert werden sollte, welche Unregelmäßigkeiten überhaupt in den Fügeverbindungen auftreten, welche Auswirkungen diese Unregelmäßigkeiten auf das Schweißergebnis mit sich bringen und wie die in Kapitel 2.3.5 vorgestellten Normen in der Praxis Anwendung finden.

Tabelle 2-11: Unregelmäßigkeiten laut Norm EN ISO 6520-1 [3]

Nr.	Benennung, Unregelmäßigkeit	EN ISO 6520-1 Referenz Nr.
1	Riss	100
2	Endkraterriss	104
3	Porosität, Poren	200
4	Porennester, Porenzellen	2013; 2014
5	Lunker, Endkraterlunker	202; 2024
6	Feste Einschlüsse	300
7	Bindefehler	401
8	Randkerben	5011; 5012
9	Nahtüberhöhung	502
10	Nahtunterwölbung	511
11	Schweißspritzer	602

In den folgenden Absätzen werden die Auswirkungen bzw. die Erkenntnisse (Ursachen für die Entstehung) durch das Auftreten dieser Unregelmäßigkeiten erläutert, um einen besseren Überblick der Fehlergesamtsituation zu bekommen. Für eine bessere Vorstellung über das Aussehen dieser Unregelmäßigkeiten, werden falls vorhanden originale Fehlerbilder z.B. in Form von Schlibbilder aus diversen Untersuchungen von Samsung SDIBS hinzugefügt, welche im Anschluss mithilfe des passenden Auszuges aus der Norm DIN EN ISO 13919-2 als IO bzw. NIO bewertet werden.

- **Risse:**

Treten meist in Form von Erstarrungsrisse bzw. Heißrisse hervor, welche unter Wirkung schrumpfungsbewingter Zugspannungen am Ende der Erstarrung auftreten. Risse sind generell sehr schlecht und haben großen Einfluss auf die Betriebslebensdauer der Schweißnaht. Risse treten vermehrt bei größeren Schmelzbädern auf, da die Schmelze von außen nach innen abkühlt und dadurch Abkühlspannungen im Zentrum der Naht auftreten. Abbildung 2-17 zeigt zwei im Schweißgut auftretende Erstarrungsrisse, welche als NIO (nicht in Ordnung) innerhalb der Batterieproduktion bei Samsung SDIBS (Bewertungsgruppe D nach DIN EN ISO 13919-2 siehe Abbildung 2-18) klassifiziert wurden sowie vereinzelt auftretende Poren und Porennester, welche hier nur vollständigheitshalber erwähnt werden. Wie aus der Bewertungsgruppe D hervorgeht, sind alle Arten von Rissen nicht zulässig mit Ausnahme von Mikrorissen und örtlichen Endkraterrissen.

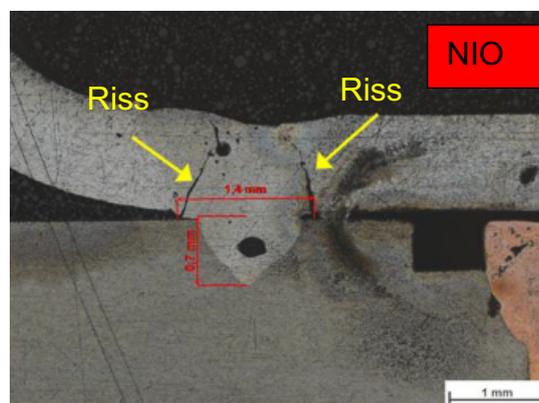


Abbildung 2-17: Erstarungs- bzw. Heißrisse in der Fügeverbindung (NIO), [SDIBS, confidential]

Nr	Unregelmäßigkeit, Benennung	EN ISO 6520-1 Verweis	Bemerkungen	Bewertungsgruppe niedrig D
1	Riss	100	Alle Arten von Rissen mit Ausnahme von Mikrorissen (Rissfläche < 1 mm <sup>2</sup> ). Endkraterisse siehe Nr 2.	nicht zulässig
2	Endkrateriss	104		örtliche Endkraterisse zulässig

Abbildung 2-18: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Risse [10]

- **Poren:**

Zu niedrige Frequenzen (Laserschweißparameter) erhöhen die Porenanzahl. Es werden Poren in das Schmelzbad eingerührt. Es sollte das Tiefschweißen (siehe Kapitel 2.3.3) angestrebt werden, da Wärmeleitungsschweißen mehr Unregelmäßigkeiten (Poren sowie auch Risse) hervorruft und eine zu geringe Einschweißtiefe liefert. Wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben wird, ist die Laserschweißung im Überlapp (Wobbeln) ausgeführt, was eine bessere Entgasung der Schmelze und somit kleinere Poren sowie eine geringe Anzahl an Poren hervorruft. Poren im Schweißgut bedeuten nicht immer etwas negatives, sondern können auch je nach Größe und Lage sich ausbreitende Risse im Schweißgut stoppen und somit durchaus positiv erwünschte Effekte haben. In Abbildung 2-19 werden vereinzelte Poren sowie in der Mitte ein klarer Erstarrungsriss dargestellt. Diese Schweißung wurde aufgrund der in der Nahtwurzel viel zu großen Pore als NIO nach DIN EN ISO 13919-2 Bewertungsgruppe D eingestuft. Die Abmessung  $l$  der Pore beträgt 0,9 mm und dürfte laut Bewertungsgruppe D nur einen Wert von  $0,5 \times 1 = 0,5$  mm aufweisen.

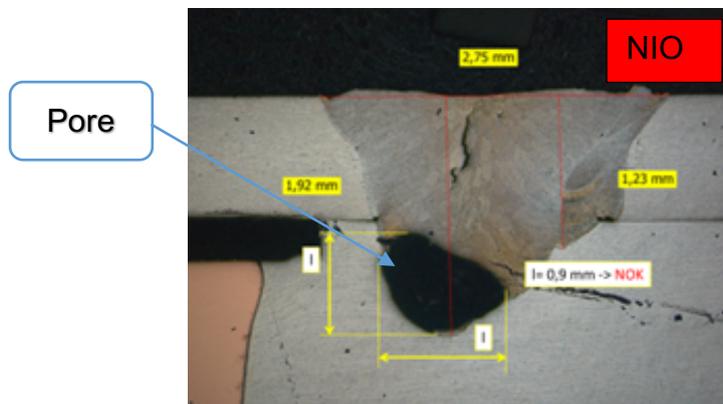


Abbildung 2-19: Längsschliff Zellpol: vereinzelte Poren sowie eine sehr große Pore in der Nahtwurzel (NIO), [SDIBS, confidential]

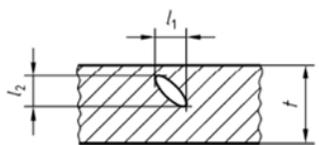
Nr	Unregelmäßigkeit, Benennung	EN ISO 6520-1 Verweis	Bemerkungen	Bewertungsgruppe niedrig D
3	Porosität und Poren	200	<p>Die folgenden Bedingungen sind zu erfüllen und Grenzen für Unregelmäßigkeiten einzuhalten:</p> <p>a) maximale Abmessung <math>l</math> (<math>l_1</math>; <math>l_2</math> oder <math>h</math>) für eine Einzelpore</p> <p>b) maximale Summe der Projektionsfläche der Unregelmäßigkeiten</p> <p>Die Projektion ist in Richtung parallel zur Oberfläche und rechtwinklig zur Schweißnahtachse. Sie wird bezogen auf eine Fläche <math>t</math> multipliziert mit der Schweißlänge, wobei die Schweißlänge die tatsächliche Länge der Naht ist oder 100 mm, aber immer der kleinere Wert ist zutreffend.</p> 	<p><math>l</math> oder <math>h \leq 0,5 t</math> max. 6 mm</p> <p>Elektronenstrahlschweißen: <math>f \leq 6 \%</math></p> <p>Laserstrahlschweißen: <math>f \leq 10 \%</math></p>

Abbildung 2-20: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Poren [10]

Poren kommen nicht nur im Schweißgut vor, sondern können auch als sogenannte Oberflächenporen auftreten d.h. eine zur Werkstückoberfläche sichtbare, offene Pore. Zulässig sind diese Oberflächenporen solange ihre Maximalgröße unterhalb von 20% bezogen auf die Schweißnahtlänge liegt, sie nicht durchgehend sind und <2mm sind.

- **Nahtüberhöhung:**

Da ohne Zusatzwerkstoff geschweißt wird, sollte die Naht relativ eben sein. Nahtüberhöhung deutet auf Lunker bzw. Poren hin. Das verdrängte Volumen des Lunkers bzw. der Pore wird an die Oberfläche gedrückt und kann so anhand einer Sichtprüfung (VT) sofort detektiert werden.

Anhand von Schweißversuchen wurde festgestellt, dass Verunreinigungen ebenfalls Nahtüberhöhungen hervorrufen. Beispiel einer Verunreinigung wären Kunststoffreste in Form von Kleberesten zwischen Zellpol und Busbar. Der Kunststoff gast aus bzw. verdampft, wodurch Hohlräume (Poren) entstehen. Abbildung 2-21 zeigt einen extremen Fall, wo die gesamte Schmelze herausgeschleudert wurde und es gar nicht mehr zur Nahtüberhöhung gekommen ist, sondern nur mehr ein materialfreies Loch überblieb. Diese Schweißnaht wurde gemäß DIN EN ISO 13919-2 (siehe Abbildung 2-22) eindeutig als NIO bewertet.

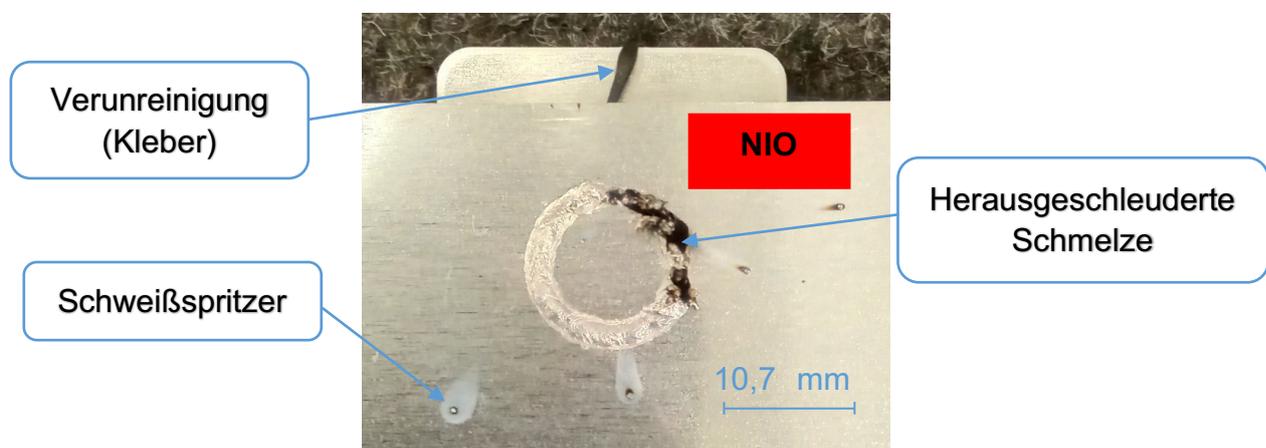


Abbildung 2-21: Ausgeschleuderte Schmelze infolge einer Kunststoffverunreinigung, [SDIBS, confidential]

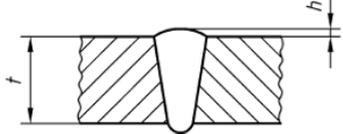
Nr	Unregelmäßigkeit, Benennung	EN ISO 6520-1 Verweis	Bemerkungen	Bewertungsgruppe niedrig D
12	Nahtüberhöhung	502	 <p>anzuwenden bei Überhöhung der Oberraupe</p>	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,3 t$ max. 5 mm

Abbildung 2-22: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Nahtüberhöhung [10]

• **Nahtunterwölbung:**

Nahteinfall bedeutet nichts anderes als, dass Material verloren gegangen ist. Entweder ist der Schweißspalt unter der Busbar zu groß oder das Material ging über einen Auswurf oder einer hohen Anzahl an Schweißspritzern verloren.

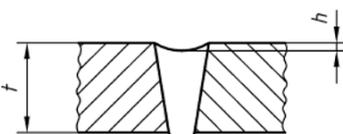
Nr	Unregelmäßigkeit, Benennung	EN ISO 6520-1 Verweis	Bemerkungen	Bewertungsgruppe niedrig D
16	Nahtunterwölbung	511		$h \leq 0,15 t$ max. 2 mm

Abbildung 2-23: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Nahtunterwölbung [10]

• **Schweißspritzer:**

Unregelmäßigkeiten in Form von Schweißspritzern treten z.B. infolge von Verunreinigungen (Öl, Fett, Klebereste etc.) des Zellpoles auf oder wenn ohne Leistungsrampen am Anfang und Ende der Schweißnaht geschweißt wird. Eine weitere Ursache für Schweißspritzer kann auch ein unruhiges Schmelzbad sein, was durch richtig eingestellten Fokusabstand – meist durch Defokussieren (Fokus im Material z.B. z=-1) – verbessert bzw. das Schmelzbad beruhigt werden kann. Laut Bewertungsgruppe D (siehe Abbildung 2-24) ist die Zulässigkeit von Schweißspritzern abhängig vom Anwendungsfall. Innerhalb der Batterieproduktion gilt: lose Schweißspritzer sollten vor der Weiterbearbeitung des Batteriemoduls entfernt werden.

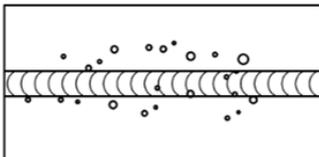
Nr	Unregelmäßigkeit, Benennung	EN ISO 6520-1 Verweis	Bemerkungen	Bewertungsgruppe niedrig D
20	Schweißspritzer	602		Die Zulässigkeit hängt vom Anwendungsfall ab. Gilt für Spritzer, die identisch sind mit dem Grundwerkstoff und dem Schweißzusatz.

Abbildung 2-24: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Risse [10]

**2.3.6.2 Produktionsbedingte Unregelmäßigkeiten**

Wie bereits erwähnt treten beim Laserstrahlschweißen von Batteriemodulen auch diverse weitere Unregelmäßigkeiten auf, die sich nicht nach ÖNORM EN ISO 6520-1 klassifizieren sowie mithilfe von Bewertungsgruppen laut DIN EN ISO 13919-2 als IO

oder NIO beurteilen lassen. Diese Unregelmäßigkeiten haben ihre Ursache in Störungen oder prozessbedingt hervorgerufenen Abweichungen, die während des Schweißprozesses auftreten wie etwa:

- **Unausreichende Schweißnahttiefe bzw. Einbrandtiefe**

Ein Nichteinhalten der vom Hersteller verlangten Einschweißtiefe (vgl. Zielgrößen Kapitel 2.3.7) zwischen Mindesteinschweiß- sowie Maximaleinschweißtiefe wird ebenfalls als Fehler bewährt. Prozesstechnische Ursachen für das Abweichen von der genau definierten Einschweißtiefe sind:

- Veränderung der Laserleistung (Hervorgerufen z.B. durch Verschmutzung der Schutzglasoptik (siehe Abbildung 2-25) infolge Schweißspritzer trotz Einsatzes eines Crossjets)

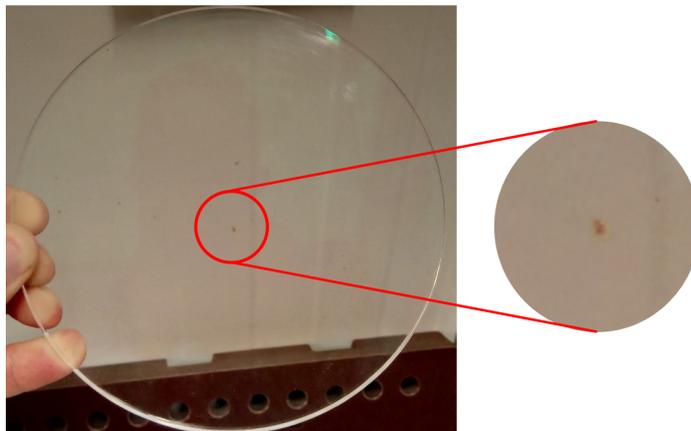


Abbildung 2-25: Verschmutzte Linse der Schweißoptik infolge eines Schweißspritzers, [SDIBS, confidential]

- Fokuslage  $z$  kann sich verändern (z.B. falsche Werkstückposition, Roboterarm hat sich verstellt oder das Gewinde bei der Linse der Fokussierungsoptik ist nicht vollständig angezogen)
- Kleber oder andere Verunreinigungen wie Fett oder Öl könnte sich zwischen Busbar und Zellverbinder befinden (siehe hierzu oben Abbildung 2-21 Nahtüberhöhung).

- **Unterschreitung der minimalen Scherkraft**

Wird die vom Hersteller der Lithium-Ionen-Zellen (Samsung SDI Standort Korea) definierte minimale Scherkraft von  $F_s = 1000 \text{ N}$  (vgl. Zielgrößen Kapitel 2.3.7) unterschritten, so ist dies ebenfalls als Fehler zu werten.

- **Unterschreitung des Mindestquerschnitt für die elektrische Kontaktierung**

Liegt der Zellverbinder nicht eben auf dem Zellpol auf d.h. man hat einen Spalt zwischen Zellverbinder und Zellpol so muss der gesamte Strom über die Schweißnaht bzw. Kreisnaht fließen. Hierfür wird eine Mindestquerschnittfläche für die elektrische Kontaktierung zwischen Zellpol und Zellverbindern vom Hersteller der Lithium-Ionen-Zellen von  $A_{\min} = 22,8 \text{ mm}^2$  (vgl. Zielgrößen Kapitel 2.3.7) vorgeschrieben. Wird die Mindestquerschnittfläche unterschritten, so ist das als Fehler zu werten. Weiters ist auch ein Maximalwert für den Spalt zwischen Zellpol und Zellverbinder von  $X_{\max} = 0,2 \text{ mm}$  (siehe Abbildung 2-26) – was 20 % der Zellverbinderdicke entspricht – definiert.



Abbildung 2-26: Maximalabstand  $X_{\max}$  zwischen Zellpol und Zellverbinder, [SDIBS, confidential]

- **Mindestabstand zwischen Schweißnaht und Befestigungsniete für den Zellpol**

Es ist sicherzustellen, dass ein Mindestabstand von  $S_{\min} = 0,2$  mm zwischen der Schweißnaht und der Befestigungsniete (siehe Abbildung 2-27) für den Zellpol vorliegt. Wird der Mindestabstand  $S_{\min}$  unterschritten, so ist dies als Fehler zu werten.

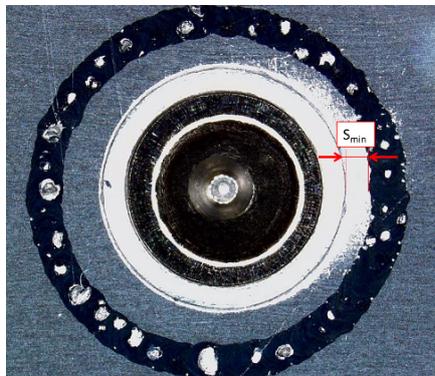


Abbildung 2-27: Querschliffbild Zellpol: Mindestabstand  $S_{\min}$  zwischen Schweißnaht und Befestigungsniete, [SDIBS, confidential]

- **Abstand zwischen Schweißnaht und Isolation des Zellpoles**

Für diesen Fehler ist kein Zahlenwert bezüglich eines Mindestabstandes definiert. Hier ist zu beachten, dass es nicht zum An- bzw. Wegschmelzen der Isolationsschicht des Zellpoles kommt, da dies sonst als Fehler gewertet werden muss.

- **Höhendifferenz Zellpol zu Zellpol innerhalb eines Batteriemodules**

Durch das Verkleben der einzelnen Lithium-Ionen-Zellen mit der Kühlplatte kommt es produktionsbedingt zu ungewollten Höhendifferenzen zwischen den benachbarten Zellpolen (siehe Abbildung 2-28). Dadurch würde der Zellverbinder am Zellpol nicht korrekt aufliegen und somit hätte man kein ideales Ergebnis für die elektrische Kontaktierung. Deswegen ist es auch hier sehr wichtig, die oben bereits beschriebene geforderte Mindestquerschnittsfläche von  $A_{\min} = 22,8$  mm einzuhalten. Die maximal erlaubte Höhendifferenz  $Z_{\max}$  beträgt 0,1 mm und darf nicht überschritten werden.



Abbildung 2-28: Maximale Höhendifferenz  $Z_{\max}$  zwischen den Zellpolen, [SDIBS, confidential]

### 2.3.7 Qualitätssicherung der Fügeverbindung

Bei der Zell- und Batteriefertigung werden die grundsätzlichen Qualitätseigenschaften der Lithium-Ionen-Batterie, welche als Energiequelle für Elektroautos dienen, festgelegt. Der qualitätsgerechten Ausführung der Fügeverbindung – Zellpol mit Busbar – kommt eine sehr große Bedeutung zu. Aufgrund der hohen thermischen und elektrischen Leitfähigkeit und den weiteren in Kapitel 2.3.4 erläuterten schweißtechnischen Eigenschaften der verwendeten Aluminiumwerkstoffe stellt die zerstörungsfreie Prüfung der Fügeverbindung bzw. die Prozessüberwachung der Laserstrahlschweißung eine entsprechende Herausforderung dar. Bei Samsung SDI kommt hier gegenwärtig ausschließlich die Widerstandsmessung als ZfP-Verfahren zum Einsatz. Zusätzlich werden in genau definierten Abständen stichprobenartige Überprüfungen (siehe Kapitel 2.3.7.2) durchgeführt. Aufgrund der geringen Auflösung bzw. Genauigkeit der Widerstandsmessung ist eine nachvollziehbare Bestrebung von Samsung SDI andere zerstörungsfreie, serientaugliche Prüfverfahren für die Qualitätssicherung der Fügestellen zusätzlich zu den stichprobenartigen Überprüfungen einzusetzen bzw. in diesem Bereich zu forschen um so die in Kapitel 2.3.6 auftretenden Unregelmäßigkeiten besser quantifizieren zu können. Eine Evaluierung der Widerstandsmessung ist nicht Ziel dieser Arbeit und wird deshalb auch nicht weiter behandelt. Die Widerstandsmessung wird z.B. vom Autor in [3] ausführlich behandelt. Innerhalb dieser Arbeit wird nach alternativen ZfP-Verfahren gesucht.

Bevor aber nach anderen Möglichkeiten bzw. Verfahren zur zerstörungsfreien, serientauglichen Prüfung der Fügestellen Zellpol mit Busbar gesucht werden kann, wird vorab noch genauestens definiert, was wichtige Zielgrößen bzw. qualitätsrelevante Anforderungen für das Schweißergebnis sind. Basierend auf diesen Anforderungen werden von Samsung SDI je nach Gegenstand der Prüfung täglich, wöchentlich und monatlich stichprobenartig das Schweißergebnis bezüglich der Schweißparameter, der Schweißnahtgeometrie, Einhaltung der definierten Schweißbereiche sowie natürlich auch die einzuhaltenden Zielgrößen überprüft.

Um einen besseren Überblick dieses Kapitels zu gewährleisten werden die folgenden drei Unterkapitel separat behandelt:

- Zielgrößen
- Derzeitige Qualitätssicherung
- Rahmenbedingungen für die Prozessüberwachung während bzw. nach der Laserschweißung.

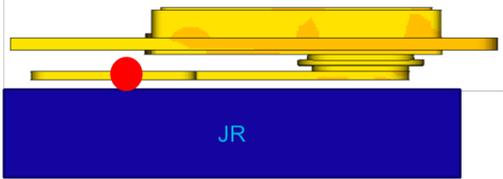
### 2.3.7.1 Zielgrößen

Unter Zielgröße versteht man innerhalb dieses Kontextes genau definierte und für die Qualität des Batteriemodules ausschlaggebende Größen. Werden die vorgegebenen Grenzen der sogenannten Zielgrößen nicht eingehalten so ist dies als NIO zu werten und das Batteriemodul darf nicht zu einem Batteriesystem weiterverarbeitet werden. Die Zielgrößen umfassen Werte für:

- die minimale Abscherkraft bzw. Abziehkraft für die Zellverbinder von den Zellpolen,
- die maximal erlaubten Temperaturen innerhalb der Lithium-Ionen-Zelle während der Laserstrahlschweißung,
- Toleranzen bezüglich der Nahtgeometrie,
- die maximal erlaubte Stromstärke an den Zellpolen sowie Werte für
- eine Mindestanzahl an Lastwechseln der Fügestelle.

Für einen besseren Überblick sind die Zielgrößen in Tabelle 2-12 dargestellt.

Tabelle 2-12: Übersicht der Zielgrößen, [Dokument: FCA\_PROCESS\_CCU-WELDING\_V1.1, SDIBS, confidential]

Zielgrößen	Werte	Bemerkungen
Busbar Abscherkraft	$F_s = 1000 \text{ N}$	Wird mithilfe eines Zugversuches ermittelt.
Busbar Abziehkraft	500 N	
Max. Temperatur innerhalb der Zelle	$T_{\max} = 60^\circ\text{C}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Allowed temperatures due to welding (heat dissipation)                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• <math>T_{\max, \text{general}}</math>: <math>60^\circ\text{C}</math></li> <li>• <math>T &gt; 50^\circ\text{C}</math>: for max. 10s</li> <li>• <math>T &gt; 40^\circ\text{C}</math>: for max. 30s</li> </ul> </li> </ul> <div style="border: 1px solid blue; background-color: #00aaff; color: white; padding: 2px; display: inline-block; margin-left: 20px;">First proposal!</div> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Measurement point for temperature evaluation:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>• At inner side of cell</li> <li>• Current collector - J/R tab welding area</li> </ul> </li> </ul>  <p>Abbildung 2-29: Maximale Temp. Innerhalb der Zelle, [SDIBS, confidential]</p>
Kreisnahtbreite	$B_{\min} = 0,6 \text{ mm}$ $B_{\max} = 1,3 \text{ mm}$	
Kreisnahtdurchmesser (innen, außen)	$\varnothing_{\min} = 8,5 \text{ mm}$ $\varnothing_{\max} = 12,5 \text{ mm}$	
Mindestanbindungsfläche	$A_{\min} = 22,8 \text{ mm}^2$	Falls ein Spalt vorliegt, muss der gesamte Strom über die Schweißnaht fließen.
Max. erlaubte Stromstärke	$I_{\max} = 100 \text{ A}$	Die 100 Ampere beziehen sich auf 1 Zellpol.
Lastwechsel der Fügestelle	$N = 4000$	4000 Lastwechsel entsprechen in etwa einer Kilometerleistung des Elektrofahrzeuges von 300 000 km. Die Lastwechsel simulieren mitunter das Be- und Entladen der Batteriezellen, wodurch es zu einer Belastung der Fügestelle kommt.

### 2.3.7.2 Derzeitige Qualitätssicherung

Die derzeitige Qualitätssicherung der Füge­stelle umfasst vier Hauptgruppen. Jeder dieser Hauptgruppen beinhaltet unterschiedliche Prüfaufgaben sowie eigens dafür abgestimmte Prüfintervalle (siehe Tabelle 2-13).

Tabelle 2-13: Überblick über die derzeitige Qualitätssicherung, [SDIBS, confidential]

Hauptgruppe	Überprüfung	Intervall
Prüfung vor der Schweißung	Höhendifferenz Zellpol zu Zellpol	1 x täglich (bei Schichtstart)
	Sauberkeit des Schweißbereiches	1 x täglich (zufälliger Zeitpunkt)
Mechanische Eigenschaften	Busbar Abscherkraft $F_s > 1000N$	1 x täglich (bei Schichtstart) 2 Proben
Visuelle Prüfung	Schweißspritzer und Unregelmäßigkeiten auf der Schweißnahtoberfläche	1 x täglich (bei Schichtstart)
Mikrografische Überprüfung	Schliffbildern für den Nachweis von Unregelmäßigkeiten im Schweißgut	1x wöchentlich

Wird eine unzulässige Unregelmäßigkeit detektiert so wird die in Abbildung 2-30 dargestellte Verifikationsprozedur durchlaufen, um wieder die gewünschte Ausgangsqualität zu erreichen.

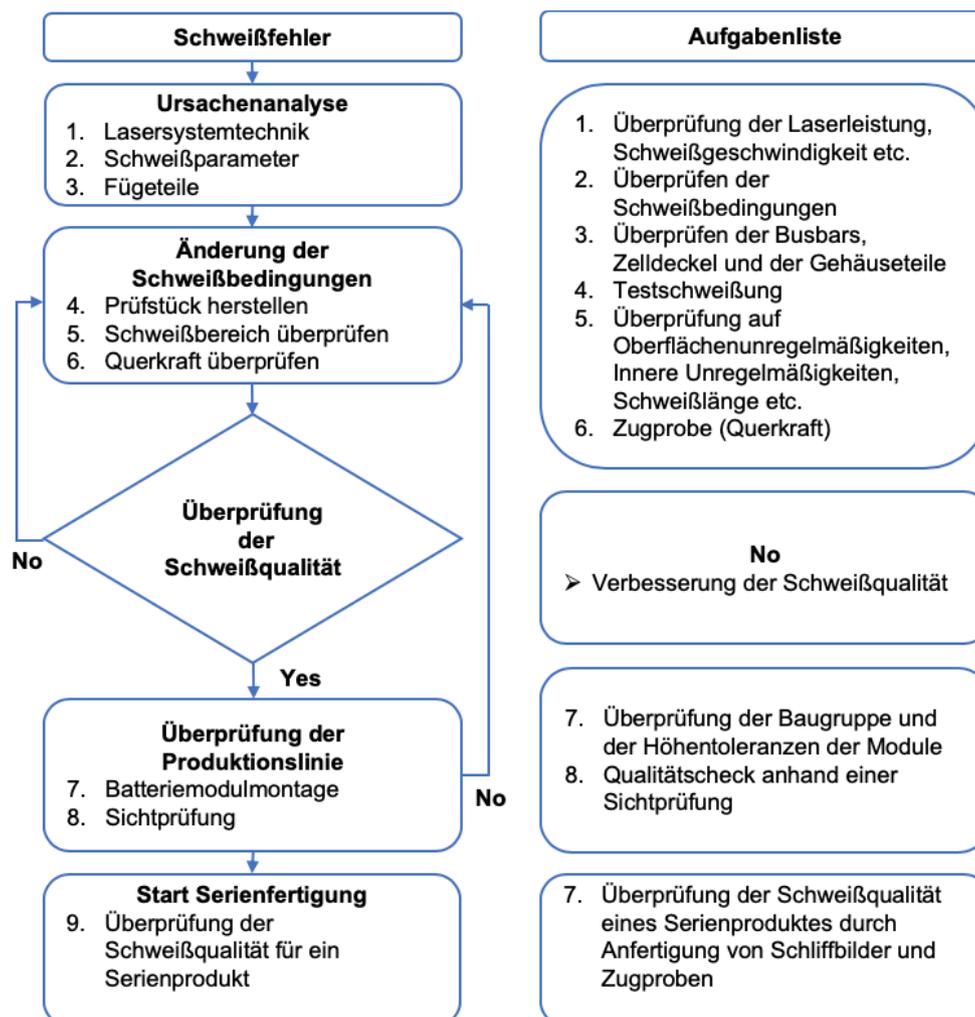


Abbildung 2-30: Verifikationsprozedur für Schweißfehler und NOK Bewertungen, [Dokument: FCA\_PROCESS\_CCU-WELDING\_V1.1, SDIBS, confidential]

### **2.3.7.3 Rahmenbedingungen für die Prozessüberwachung während bzw. nach der Laserschweißung**

Im folgenden Absatz sollen die Rahmenbedingungen bzw. die Taktzeit/Prüfzeit pro Batterie dargebracht werden.

Eine Zelle besteht aus zwei Polen und somit aus zwei zu überprüfenden Fügeverbindungen. 24 Zellen ergeben eine Batteriemodul, wobei hier 48 Schweißnähte geprüft werden müssen. Bei einer Sekunde Prüfzeit pro Fügeverbindung liegt die Prüfung bei 48 Sekunden. Die Schweißzeit pro Modul liegt in etwa bei 15 Sekunden (für 48 Positionen). Somit ergibt sich eine gesamte Taktzeit mit Manipulation von ca. 60 Sekunden. Es sollte auch gleich vermerkt werden, dass sich die Prüfzeit von einer Sekunde pro Fügeverbindung auf die Widerstandsmessung bezieht. Da die Widerstandsprüfung sehr schnell durchgeführt wird, ist das ein Idealwert von dem andere zerstörungsfreie Prüfverfahren definitiv abweichen werden. Zum Werkstoff der Zellverbinder lässt sich sagen, dass die Aluminiumoberfläche gebürstet ist und nach der Schweißung keinen Zunder aufweist, es sind lediglich vereinzelt fest haftende Schweißspritzer vor Ort. Die Werkstücktemperatur nach dem Schweißen beträgt 50-100 °C.

## 2.4 Zusammenfassung

Die Produktion elektrischer Komponenten – innerhalb dieser Masterarbeit insbesondere des Batteriesystems – für Elektrofahrzeuge unterscheidet sich sehr grundlegend von den Produktionsprozessen für Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen. Das Batteriesystem von Elektrofahrzeugen wird – gleich wie die Verbrennungskraftmaschine in Kraftfahrzeugen – als Kernkomponente angesehen. Ziel von Samsung SDI ist es vor allem sichere, nachhaltige, qualitative und langlebige Batteriekomplettsysteme für Elektroautos zu produzieren bzw. zu entwickeln. Um im Spannungsfeld Qualität, Kosten, Zeit und Komplexität bestehen zu können, müssen die derzeitigen Produktionsabläufe – innerhalb dieser Masterarbeit die Laserstrahlschweißung – ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Hierzu ist es notwendig die Komplexität von Produkten, Prozessabläufen einerseits zu verstehen und andererseits zu beherrschen, um den steigenden Ansprüchen an die Flexibilität der Prozesse gerecht zu werden.

Mit den obigen Kapiteln wurde das hohe Potential der Lasersystemtechnik bzw. die Erfüllbarkeit der geforderten Rahmenbedingungen für die elektrische Kontaktierung von Batteriezellen durch die Laserstrahlschweißung bereits aufgezeigt. Das Laserstrahlschweißen findet eine zunehmend breite Anwendung, was auch durch das Thema Elektromobilität immer stärker forciert wird. Es wurde auch ersichtlich, dass der Schweißprozess durch eine Vielzahl an Parametern mitunter auch die vom Hersteller geforderten Zielgrößen beeinflusst wird. Die stetige Ausweitung der Anforderung an die Nahtqualität drängen den Laserstrahlprozess jedoch zu immer enger werdenden Grenzen, wodurch sich die Anfälligkeit gegenüber Unregelmäßigkeiten erhöht. Durch diese Unregelmäßigkeiten kommt es zu einer Reduzierung der Kapazität sowie der Spitzenleistung des Batteriesystems oder im schlechtesten Fall auch zu mit NOK bewerteten Batteriesystemen. Weiteres führt das Auftreten von Unregelmäßigkeiten zum Bedarf an innovativen Prozessüberwachungssystemen um die geforderte Qualität sicher stellen zu können. Der Einsatz von Prozessüberwachungssystemen während der Laserstrahlschweißung setzt aber einen perfekt geregelten Laserstrahlschweißprozess voraus, ist dies nicht der Fall können selbst diese Systeme keine zufriedenstellende Erhöhung der Prozesseffizienz garantieren, weshalb das Schweißen mit Laser als ein sich ständig weiterzuentwickelndes Verfahren anzusehen ist.

Basierend auf der Ausgangssituation bei Samsung SDIBS wurde eine solide Ausgangsbasis für weitere Untersuchungen geschaffen. Um die Qualität dauerhaft sicherzustellen, ist eine ständige Überwachung und Regelung des Schweißprozesses anzustreben, weshalb in den nachfolgenden Kapiteln anhand von praktischen Untersuchungen ZfP-Verfahren evaluiert werden sollen.

### 3 LITERATURSTUDIE

Beim Laserstrahlschweißen innerhalb der Batteriemodulherstellung seitens Samsung SDI kann bis dato noch nicht auf die zerstörende Werkstoffprüfung verzichtet werden. Der Nachweis der innerhalb des Kapitels 2.3.6 aufgezeigten Unregelmäßigkeiten ist mit konventioneller zerstörungsfreier Werkstoffprüfung (z.B. Magnetpulverprüfung) teilweise schwierig bis gar nicht durchführbar sowie mit hohem manuellem Aufwand verbunden. Probleme bereitet hier z.B. die Zugänglichkeit innerhalb der kompakt ausgeführten Schweißkabine sowie auch die in Kapitel 2.3.7.3 vorgegebene Prüfzeit pro Batterie.

Aus Kapitel 2.3.4 geht hervor, dass das Laserstrahlschweißen von Aluminium im Vergleich zu Eisen mit einigen Herausforderungen verbunden ist, welche den Nachweis von Unregelmäßigkeiten zusätzlich erschweren.

Das Laserstrahl-tiefschweißen, wie es für die Herstellung der elektrischen Kontaktierung zwischen Zellpol und Busbar Anwendung findet, bietet im Vergleich zu konventionellen Schweißverfahren zusätzliche Ansätze zur Prozessüberwachung auf Basis von ZfP-Methoden. Innerhalb der Literaturstudie werden zerstörungsfreie Prüfverfahren vorgestellt und erläutert, welche zur Überwachung der Qualität von Laserschweißnähten in der Batteriefertigung in Frage kommen könnten.

#### 3.1 Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen

Prozessüberwachungssysteme werden zum einen nach ihrer Anordnung in der Fertigungsprozesskette unterschieden, wobei hierfür laut [22] drei unterschiedliche Positionen möglich sind. Bezeichnet werden diese innerhalb der deutschen Fachliteratur mit den Begriffen

- Offline-Erfassung,
- Inline-Erfassung,
- sowie Online-Erfassung

und werden innerhalb dieser Masterarbeit so weiterverwendet. Die Indikatorerfassung (z.B. reflektierte Laserleistung bei der Inline-Erfassung, siehe Kapitel 3.2.1) ist abhängig von der Positionierung innerhalb der Fertigungsprozesskette und hat somit direkten Einfluss auf die möglichen Maßnahmen bei einer detektierten Abweichung vom Soll-Schweißergebnis. Die Offline-Erfassung wird stichprobenartig außerhalb der Fertigungsprozesskette durchgeführt und kann eventuell noch mit einer statistischen Prozessregelung kombiniert werden. Demgegenüber findet die Inline-Erfassung für jedes lasergeschweißte Bauteil im Anschluss an den Schweißprozess aber noch innerhalb der Prozesskette statt. Vergleicht man jetzt die Offline-Erfassung mit der Inline-Erfassung wird sofort ersichtlich, dass Fehler im Schweißprozess erst detektiert werden, wenn das Bauteil bereits geschweißt wurde. Somit muss bei diesen Positionen für die Indikatorerfassung mindestens ein Bauteil fehlerhaft hergestellt werden um einen Fehler detektieren sowie dementsprechende Maßnahmen einleiten zu können. Bei der Online-Erfassung wird der Schweißprozess direkt überwacht und ermöglicht somit einen Eingriff in den aktiven Schweißprozess. Dadurch wird der Ausschussanteil ausschlaggebend reduziert, weshalb die Online-Erfassung bevorzugt Anwendung findet. Nachteilig ist die meist komplexere Erfassung der Indikatoren sowie die benötigte verzögerungsarme Datenverarbeitung, welche Voraussetzung für einen schnellen Prozesseingriff sind. [23] Eine Übersicht der Offline-, Inline-, und Online-Erfassung von Indikatoren innerhalb eines Schweißprozesses wird in Abbildung 3-1 dargestellt.

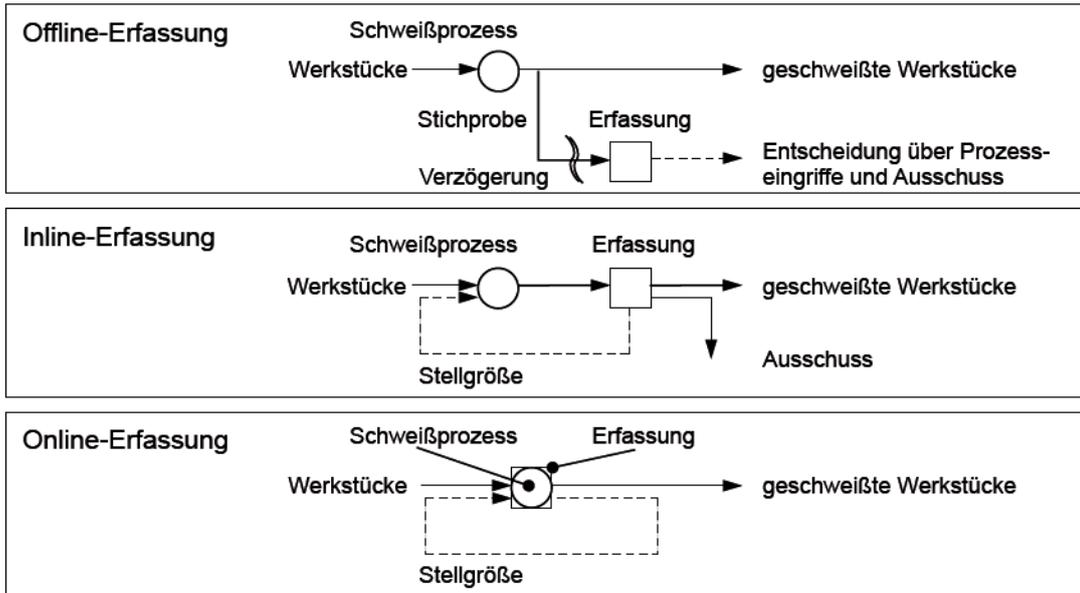


Abbildung 3-1: Offline-, Inline- und Online-Erfassung von Indikatoren innerhalb eines Fertigungsprozesses [22]

Zum anderen werden die am Markt verfügbaren und in Fachzeitschriften bzw. -büchern diskutierten Prozessüberwachungssysteme für die Online-Erfassung noch in drei weitere Kategorien unterteilt. Abhängig von der Erfassungsposition innerhalb des Schweißprozesses während der Online-Erfassung werden unterschiedliche Indikatoren aufgezeichnet und aus diesen unterschiedlichen Informationen abgeleitet. Aus diesem Grund ist die Online-Erfassung beim Laserstrahlschweißen in eine Prä-Prozess- (englisch: pre-process), In(-sito)-Prozess- und Post-Prozess-Erfassung (englisch: post-process) unterteilt. Die Unterteilung (siehe Abbildung 3-2) resultiert aus der Position der Online-Erfassung relativ zur erweiterten Wechselwirkungszone zwischen dem Laser und dem Werkstück. Im Gegensatz zur direkten Wechselwirkungszone, welche alle Vorgänge in der Dampfkapillare umfasst, befindet sich die erweiterte Wechselwirkungszone in einem Bereich mit der Größe von ca.  $b_{WZ} \approx 5 \text{ mm}$  und  $l_{WZ} \approx 10 \text{ mm}$  um die Dampfkapillare. Die erweiterte Wechselwirkungszone setzt sich aus der Naht, dem Erstarrungsbereich, dem Schmelzbad und dem Bereich vor der Aufschmelzfront zusammen. [23]

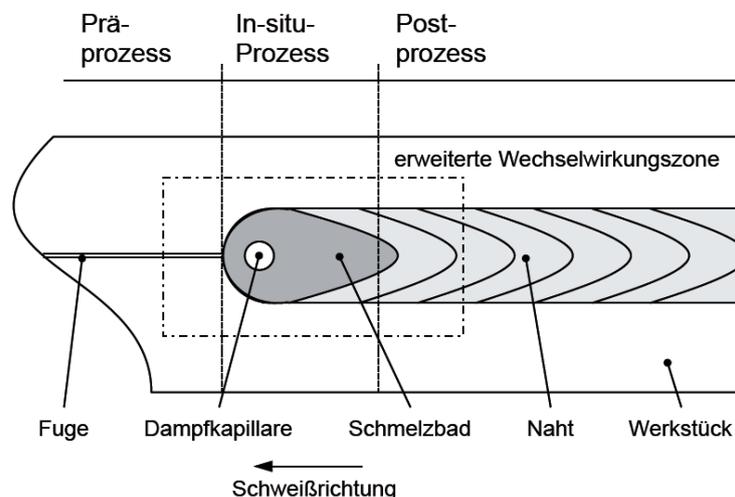


Abbildung 3-2: Unterteilung in Präprozess, In-situ-Prozess und Postprozess [23]

Zur besseren Differenzierung werden die drei Kategorien im Folgenden separat aufgeschlüsselt:

- **Prä-Prozess-Erfassung**

Zur Präprozess-Erfassung zählen alle Verfahren, die vor der Aufschmelzfront also vor dem Laserstrahlprozess Anwendung finden. Die Indikatoraufzeichnung im Präprozess dient der Überwachung des Werkstücks (Lage und Position) sowie der Erfassung der Fugengeometrie um eine optimale Nahtführung zu ermöglichen. [15], [23] Eine Detektion von Verunreinigungen und nicht eben aufliegende Bleche im Überlappstoß ist nicht möglich. [24] Für die Nahtführung kommen z.B. taktile Sensoren (berührende bzw. tastende Sensoren) zum Einsatz. [25]

- **In(-situ)-Prozess-Erfassung**

Innerhalb dieser Kategorie werden die prozessspezifischen Emissionen (optische Emissionen, akustische Emissionen etc.), insbesondere das Prozessleuchten in der direkten Wechselwirkungszone aufgezeichnet. Anhand dieser können Rückschlüsse auf den Schweißvorgang getroffen werden (siehe Kapitel 3.2.1). [15], [23]

- **Post-Prozess-Erfassung**

ZfP-Verfahren welche zur Qualitätssicherung nach dem Laserschweißprozess (Erstarrungsbereich und Naht) Anwendung finden, zählen zur Post-Prozess-Erfassung. Diese Verfahren können direkt an den Laserschweißprozess anschließen wie z.B. Ansätze mittels Thermografie oder in größeren zeitlichen Abständen z.B. durch eine Wirbelstromprüfung erfolgen. [15]

Natürlich besteht auch die Möglichkeit einer allumfassenden Prozessüberwachung mittels ZfP-Verfahren über alle Prozessphasen, um auch bei höchst anspruchsvollen Fügeprozessen eine optimale Schweißnahtqualität zu gewährleisten. Hierzu erfassen z.B. taktile Sensoren prozessvorlaufend (Prä-Prozess) die Fugengeometrie und garantieren somit eine präzise Nahtführung. Für die Sicherstellung der geforderten Stabilität während des Laserstrahlschweißprozesses und um Schwankungen in den Prozessparameter (Schutzgaszufuhr, Fokuslage etc.) aufzudecken, kommt eine In-Prozess-Erfassung zum Einsatz. Mittels einer Post-Prozess-Erfassung oder Offline-Überwachung kann die Schweißnahtqualität der entstandenen Naht (z.B. äußere Nahtfehler) schnell und effizient analysiert werden. [26]

Eine Kombination der Prä-, In(-situ)-, Post-Prozess-Erfassung ermöglicht somit eine Laserstrahlprozessregelung mit unterschiedlichen Maßnahmen im aktiven Prozess.

Da im Rahmen dieser Masterarbeit nach industriellen, serientauglichen Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung der Fügeverbindung zwischen Zellpol und Busbar – als Überlappverbindung ausgeführt – gesucht wird, beschränkt sich die weitere Betrachtung innerhalb dieser Masterarbeit auf Verfahren und Systeme welche über eine Online-Erfassung Indikatoren aus dem In(-situ)-Bereich sowie den Post-Bereich ermitteln. Innerhalb des Merkblatt DVS 3219 [25] werden diese Systeme noch anhand der detektierbaren Emissionen in optische und akustische Verfahren unterteilt. Da in der Automobilindustrie hauptsächlich optische Überwachungskonzepte eingesetzt werden [26], sollen auch diese im weiteren untersucht werden. Eben nur diese Verfahren und Systeme sind aufgrund ihrer Funktionalität zur Detektierung der in Kapitel 2.3.6 beschriebenen und innerhalb der Batteriefertigung auftretenden Unregelmäßigkeiten (Poren, Risse, Nahteinfall etc.) relevant.

## 3.2 In(-situ)-Prozess-Erfassung

### 3.2.1 Relevante Prozessemissionen innerhalb der In(-situ)-Prozess-Überwachung

In(-situ)-Prozess-Überwachungssysteme nutzen die durch die Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Werkstück auftretenden prozessspezifischen Emissionen (Indikatoren). Somit sind diese in der Lage während der Laserstrahlschweißung bzw. unmittelbar danach online Echtzeitinformationen über die Schweißnahtqualität bzw. den Verlauf des Schweißprozesses zu liefern. Mithilfe entsprechender Auswerteeinheiten kann man anhand dieser Signale (Echtzeitinformationen) Rückschlüsse auf das Schweißergebnis schließen. [15], [27]

Wie in Abbildung 3-3 ersichtlich ist, können die Indikatoren für die In-Prozess-Überwachung in optische und akustische Emissionen unterteilt werden. Bei den optischen Emissionen – dem sogenannten Prozessleuchten – wird innerhalb der deutschen Fachliteratur nochmals zwischen reflektierter Laserstrahlung und Prozesssekundärstrahlung unterschieden. Zur Prozesssekundärstrahlung zählt die Plasmastrahlung (Keyhole-Oberflächenplasma), Metaldampfstrahlung und die Wärmestrahlung des Schmelzbades. [28], [15]

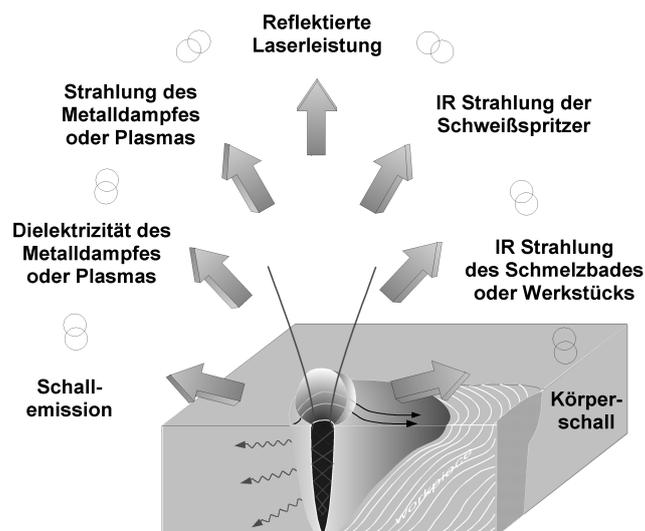


Abbildung 3-3: Indikatoren zur Online-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen [27]

### Sensorikanordnung für optische Prozessemissionen

Um während des Laserstrahlprozesses die anfallenden Emissionen ideal zu überwachen, ist zunächst eine aufgabengerechte Positionierung der verwendeten Sensoren bzw. Detektoren sicher zu stellen. Art des jeweiligen Detektors und dessen Positionierung entscheiden über die Emissionen, die damit analysiert werden. Bei der Anordnung der Sensorik werden zwei Möglichkeiten unterschieden, nämlich unterhalb und oberhalb des Werkstückes. Bei der Überwachung oberhalb des Werkstückes erfolgt die Positionierung in Bezug auf die optische Achse des Laserstrahles. Hier unterscheidet man in eine off-axis oder koaxiale Anordnung (siehe Abbildung 3-4), wobei der Einfluss externer Störfaktoren wie z.B. Verschmutzung infolge Schweißspritzer möglichst gering gehalten werden sollte. [15], [24]

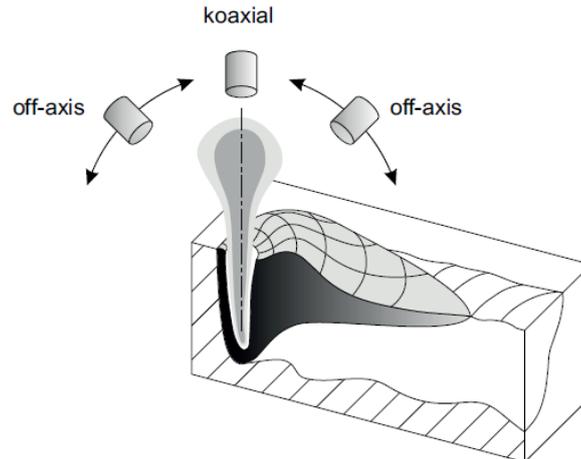


Abbildung 3-4: Sensoranordnung [15]

Durch eine koaxiale Anordnung der Sensorik erfolgt die Beobachtung in Richtung des Laserstrahls, was den Vorteil eines geringeren Wartungs- und Justageaufwandes mit sich bringt. Diese Variante der Sensoranordnung ist im Vergleich zur off-axis Variante deutlich unempfindlicher gegenüber äußeren Einflüssen wie Verschmutzung des Sensors durch Metallstaub, Fehlausrichtung und anderweitigen unerwünschten Prozessemissionen. Zur Reduktion der nachteiligen Einflüsse der off-axis Anordnung kann durch zusätzliche Schutzumhausung, häufigere Wartung oder durch Integration einer Schutzgaszuführung Abhilfe geschaffen werden. Als Faustregel gilt, dass die off-axis Anordnung primär für die Erfassung des Oberflächenplasmas und anderwärtigen Prozessemissionen wie etwa die Schmelzbadstrahlung (Prozessekondärstrahlung) Anwendung findet. Es wurde auch nachgewiesen, dass mit Annäherung der Sensorik an die koaxiale Position die detektierbare Intensität der Plasmastrahlung steigt (siehe Abbildung 3-5). [15], [24]

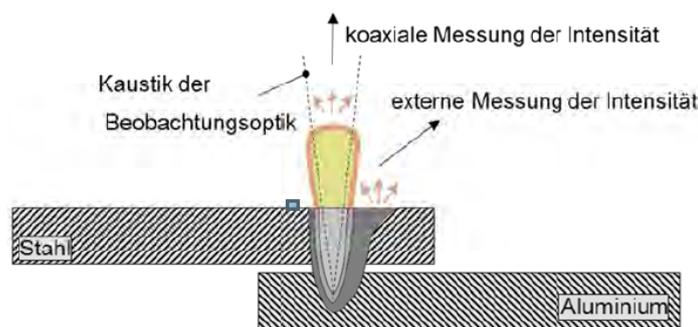


Abbildung 3-5: Messung der Prozessekondärstrahlung (extern) und reflektierten Laserleistung (koaxial) [24]

### Reflektierten Laserleistung als Indikator für die Online-Prozessüberwachung

Die bereits in Kapitel 2.3.3 beschriebene Verfahrensvariante Laserstrahl-tiefschweißen wird durch das Ausbilden eines Keyholes – auch als Dampfkapillare bezeichnet – charakterisiert, innerhalb welchem der einfallende Laserstrahl mehrfach reflektiert wird [15]. Ein Teil der Laserstrahlung wird bei jedem Auftreffer von der Kapillarwand absorbiert [27]. Eine Abschätzung des Gesamtabsorptionsgrad  $A_{\text{ges}}$  der Laserstrahlung ist durch die Gleichung von Gouffé [29] möglich. Diese Gleichung beschreibt die Absorption von

Strahlung in einem Hohlkörper. Wird das Keyhole an einen Kegel mit dem Öffnungswinkel  $D$  und der Tiefe  $t$  angenähert erhält man folgende Gleichung [30]:

$$A_{ges} = \bar{A} \cdot \frac{1 + \frac{D}{2t} \cdot (1 - \bar{A}) \cdot (1 - \frac{D}{2t})}{\bar{A} \cdot (1 - \frac{D}{2t}) + \frac{D}{2t}} \quad (3.1)$$

Aus Gleichung 3.1 ist ersichtlich, dass das Verhältnis von Tiefe  $t$  zu Durchmesser  $D$  für den absorbierten Leistungsanteil in der Kapillare (Gesamtabsorptionsgrad) maßgebend ist und nicht die absolute Größe der Kapillare. Im Weiteren Kontext wird dieses Verhältnis (siehe Gleichung 3.2) als Schachtverhältnis bezeichnet. [27]

$$S = \frac{t}{D} \quad (3.2)$$

Abbildung 3-6 zeigt den Verlauf des Gesamtabsorptionsgrad in Abhängigkeit des Schachtverhältnisses für die Werkstoffe Eisen und Aluminium für die Wellenlängen des Nd:YAG-Laser (kurz für Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser) und CO<sub>2</sub>-Lasers. Hierfür erhält der Kapillardurchmesser näherungsweise den Wert des Strahldurchmessers auf der Werkstückoberfläche und kann deshalb als konstant angenommen werden. [27]

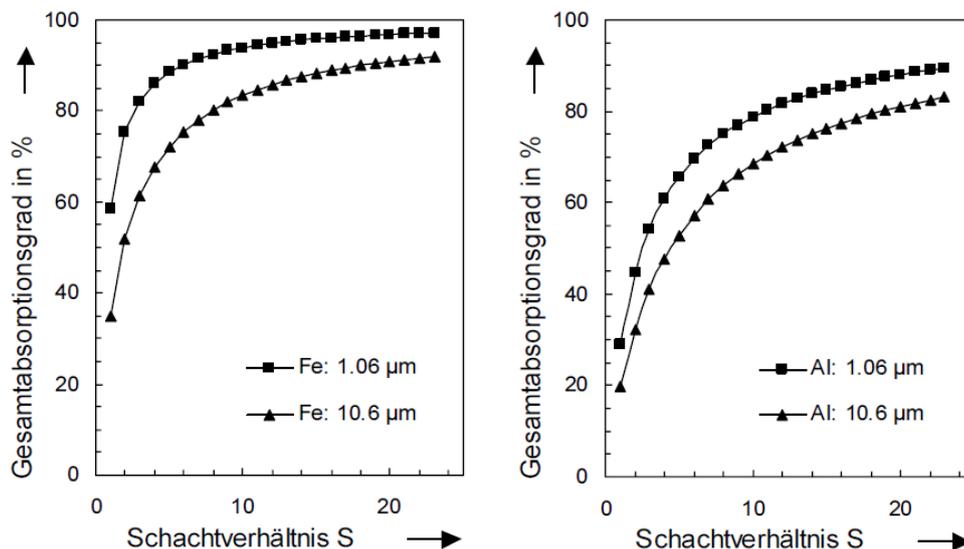


Abbildung 3-6: Abhängigkeit des Gesamtabsorptionsgrad des Keyholes vom Schachtverhältnis für die Werkstoffe Eisen und Aluminium [27]

Für Abbildung 3-6 gilt: Bei der Absorption der Laserstrahlung innerhalb der Kapillare wird der Plasmaeinfluss genauer gesagt die Plasmaabsorption – bezogen auf das Plasma der Kapillare und der Schweißfackel – nicht berücksichtigt [26]. Aus Forschungen geht hervor, dass für CO<sub>2</sub>-Laser mit einem Leistungsbereich von 0,5 bis 5 kW die Absorption an den Kapillarwänden im Gegensatz zur Plasmaabsorption deutlich dominiert. Bei Nd:YAG-Lasern kann der Plasmaeinfluss komplett vernachlässigt werden. [28]

In weiterer Folge wird die Energieerhaltung herangezogen um die nicht absorbierte Laserleistung bezeichnet als Reflexionsgrad  $R_{ges}$  zu bestimmen. Die Energieerhaltung besagt, dass die eingestrahelte Energie gleich der Summe aus reflektierter, transmittierter und absorbierter Energie sein muss. Unter Voraussetzung das keine Transmission auftritt folgt für den Reflexionsgrad  $R_{ges}$ : [27]

$$R_{ges} + A_{ges} = 1 \leftrightarrow R_{ges} = 1 - A_{ges} \quad (3.3)$$

Kombiniert man jetzt die Gleichungen 2.9 und 2.4, so kann man unter Annahme das der Durchmesser der Dampfkapillare konstant ist und die Einschweißtiefe durch die Tiefe der Kapillare angenähert wird, durch Messung der reflektieren Laserleistung auf die aktuelle Einschweißtiefe schließen. Der Zusammenhang zwischen Reflexionsgrad und Einschweißtiefe ist in Abbildung 3-7 für die Werkstoffe Eisen und Aluminium dargestellt. [27]

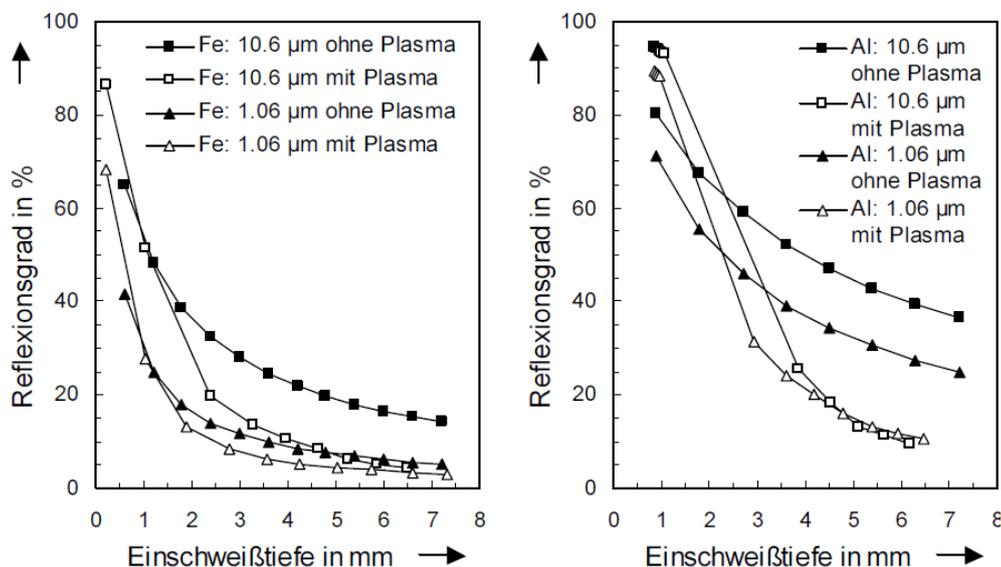


Abbildung 3-7: Reflexionsgrad in Abhängigkeit der Einschweißtiefe für die Werkstoffe Eisen und Aluminium mit und ohne Plasmaeinfluss [27]

Für Abbildung 3-7 gilt: Es sind Kurven ohne Plasmaeinfluss, nach dem Modell von Gouffé [29] und Kurven mit Plasmaeinfluss, nach einem selbstkonsistenten Modell [29], dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass bei kleinen Einschweißtiefen nur geringfügige Unterschiede sichtbar sind, vor allem beim Werkstoff Stahl. Steigt die Einschweißtiefe so kommt es zu einer Verringerung des Reflexionsgrades durch die steigende Plasmaabsorption. [27]

### Prozessekondärstrahlung als Indikator für die Online-Prozessüberwachung

Zur Messung der innerhalb der Schweißfackel auftretenden Metaldampf- und Plasmastrahlung sowie der ebenfalls zur Prozessekondärstrahlung gehörenden Wärmestrahlung des Schmelzbades werden meist Photodioden eingesetzt [26]. Photodioden sind als optische, integral messende Sensoren in verschiedenen Wellenlängenbereichen sensitiv und überzeugen durch eine berührungslose und rückwirkungsfreie Messung mit höchster Dynamik. [15]

Für die Überwachung der Prozessemissionen bezüglich der Prozessekondärstrahlung wird das ultraviolette und das infrarote Spektrum betrachtet. Optische Filter ermöglichen eine Einschränkung des Spektralbereiches der Photodioden und schützen so vor ungewollten Fremdeinflüssen wie etwa Tageslicht. [15]

Da der infrarote, als auch der ultraviolette Wellenlängenbereich unterschiedliche Informationen über den Schweißprozess liefert werden diese im Folgenden getrennt betrachtet und je ein Beispiel angeführt.

Die Plasma- bzw. die Metaldampfstrahlung emittiert hauptsächlich im ultravioletten Spektrum wobei sich der auswertbare Wellenlängenbereich von ca.  $\lambda = 400 \text{ nm}$  bis  $600 \text{ nm}$  erstreckt [26].

Die während der Verfahrensvariante Tiefschweißen entstehende Plasmastrahlung setzt sich aus der Strahlung des Oberflächen- und des Kapillarplasmas zusammen. Eine getrennte Überwachung des Oberflächen- und Kapillarplasma kann unterschiedliche Informationen während der Überwachung des Laserschweißprozesses liefern. [15]

Ein Beispiel für eine getrennte Überwachung wird in [31] durch die Anordnung zweier off-axis Detektoren mit einer Neigung von  $5^\circ$  und  $75^\circ$  gegen die Bauteiloberfläche erreicht. Diese Überwachung ermöglicht eine Unterscheidung zwischen Einschweißung und Durchschweißung durch Addition der erfassten Prozesssignale. Dabei sind die Signale bei einer Durchschweißung in Phase, während sie bei einer Einschweißung phasenverschoben auftreten. Durch Summation verstärken sich die Signale bei einer Durchschweißung maximal und löschen sich bei einer Einschweißung gegenseitig aus.

Der Wärmestrahlung des Schmelzbades bzw. der erstarrenden Schmelze sind Emissionen im infraroten Wellenlängenbereich zwischen ca.  $\lambda = 1100 \text{ nm}$  bis  $1800 \text{ nm}$  zuzuordnen [26]. Für Intensitätsmessungen im nahen Infrarot- bzw. im Infrarotbereich sind es oft Dioden aus Silizium oder Germanium [25].

Ein Beispiel für eine Überwachung im infraroten Bereich wird in [32] vorgestellt. Hier wird eine  $5 \text{ mm}^2$  große Fläche des Schmelzbades mit zwei Photodioden im Nachlauf überwacht. Die Photodioden werden in unterschiedlichen Winkel angebracht, so erhält man zwei unterschiedliche Signalverläufe. Eine Auswertung erfolgt durch Addition und Subtraktion der Signalverläufe, wodurch Schweißfehler wie Spaltbildung als auch die Verkipfung eines Fügepartners bei Stumpfstößen detektiert werden können.

Natürlich gibt es neben den oben genannten Klassifizierungen und Detektoranordnungen noch zig weitere Ansätze innerhalb diverser Forschungsarbeiten.

Auch eine gleichzeitige Betrachtung des infraroten und der ultravioletten Strahlung ist durch gezielte Anordnung der Photodioden möglich. Dabei können anhand der Plasmastrahlung Veränderungen in der Einschweißtiefe detektiert werden und durch die infrarote Strahlung eine Überwachung von Schweißspritzer ermöglicht werden. [15]

Einen systematischen Überblick über Online-Sensorik ist im Merkblatt DVS 3219: Qualitätssicherende Sensorik während des Laserstrahlschweißens [25] gegeben.

### 3.2.2 Relevante In(-situ)-Prozessüberwachungssysteme für die Batteriefertigung

Dieses Kapitel soll die für die Batteriefertigung relevanten kommerziell erhältlichen In-Prozess-Überwachungssysteme vorstellen.

#### Prozessüberwachung mit Photodioden

Die innerhalb des Kapitels 3.2.1 vorgestellten optischen Emissionen (reflektierte Laserleistung und Prozesssekundärstrahlung) dienen je nach Wellenlängenbereich als Indikatoren für die auf den Markt erhältlichen berührungs- und zerstörungsfreien In-Prozessüberwachungssysteme. Diese Systeme erlauben anhand der Strahlungsintensität Rückschlüsse auf die

- die Prozessstabilität,
- Schwankungen wichtiger Prozessparameter und
- die Nahtigenschaften. [23], [25]

Das heißt, dass sich mit diesen Systeme Fehler wie Poren, Auswürfe (Schweißspritzer), Änderung der Einschweißtiefe, unzureichende Anbindung, Verunreinigungen, Nahteneinfall etc. zerstörungsfrei anhand des Prozessleuchtens detektieren lassen [33].

Angeboten werden solche Prozessüberwachungssysteme zum Beispiel von den in der Tabelle 3-1 aufgelisteten Herstellern. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3-1: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme unter Verwendung von Photodioden

Hersteller	Produktname
Precitec Optronic GmbH [34]	Laser Welding Monitor LWM
Plasmo Industrietechnik GmbH [33]	plasmo processobserver advanced
Lessmüller Lasertechnik GmbH [35]	WELDCHECK 4.0
4D Ingenieurgesellschaft für Technische Dienstleistungen GmbH [36]	WeldWatcher

Diese Systeme zeichnen sich alle durch eine ähnliche Funktionsweise aus, unterscheiden sich aber im Bezug auf die Positionierung der Detektoren, dem spektralen Messbereich und der Datenauswertung. Während der Literaturstudie ging hervor, dass manche Hersteller Systeme mit Integrationen von Photodioden-Konfigurationen innerhalb der Schweißoptik anbieten, was einer koaxialen Beobachtung (vergleiche Kapitel 3.2.1) entspricht und andere Hersteller über off-axis (vergleiche Kapitel 3.3.1) angeordnete Lichtwellenleiter die optischen Emissionen zu entfernt angebrachten Detektoren führen. Letztere Variante wird auch als direkte Beobachtung bezeichnet. Bei neueren Lasermodellen gibt es auch die Möglichkeit einer Integration der Detektoren direkt in den Laser über passende Adapter, was ebenfalls einer koaxialen Beobachtung entspricht. Diese Integration hat den Vorteil, dass keine zusätzlichen Lichtwellenleiter benötigt werden. [25]

Der Aufbau eines Prozessüberwachungssystems mit Integration der Photodioden innerhalb der Schweißoptik wird in Abbildung 3-8 am Beispiel des Laser Welding Monitor (kurz LWM) der Firma Precitec Optronic GmbH dargestellt.

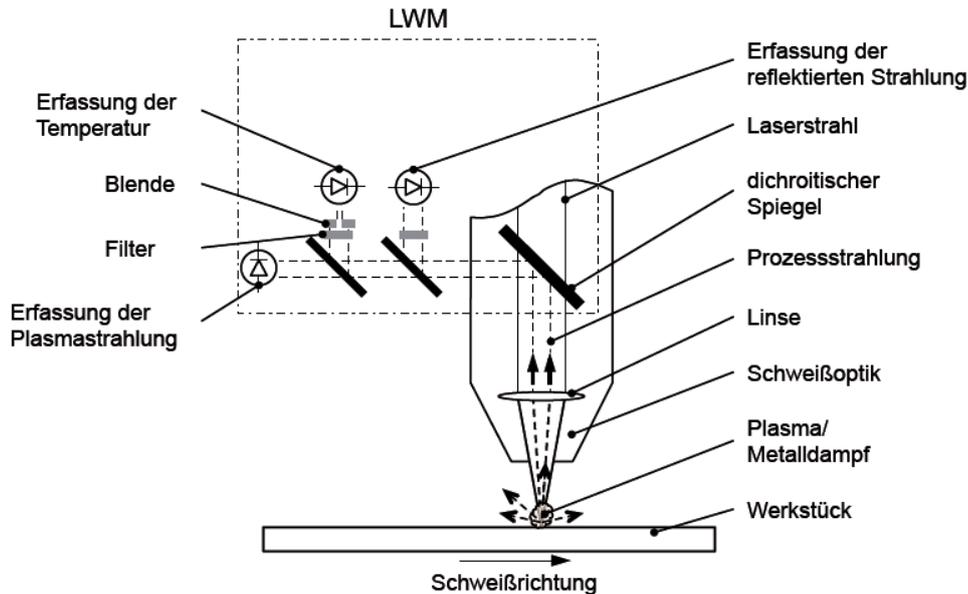


Abbildung 3-8: Aufbau des Laser Welding Monitor (LMW) der Firma Precitec Optronik GmbH [23]

Der LMW ist mit drei Photodioden ausgestattet. Die linke Photodiode in obiger Abbildung, deckt einen Wellenlängenbereich von  $\lambda = 200 \text{ nm}$  bis  $800 \text{ nm}$  (ultraviolette Strahlung) ab, somit wird das Signal der Plasmastrahlung zugeordnet. Anhand der Auswertung des Messsignales können Aussagen über die Prozessstabilität und zu Abweichungen in Prozessparametern getroffen werden. Die mittlere Diode dient der Erfassung der Temperatur des erhitzten Schmelzbades und des umgebenden Grundmaterials und ist im Bereich von  $1100 \text{ nm}$  bis  $1800 \text{ nm}$  (Infrarotstrahlung) sensitiv. Laut [37] hat ein Anstieg bzw. Abfall der Laserleistung eine Änderung der Einschweißtiefe und der Temperatur zur Folge. Diese Tatsache ermöglicht dem LMW eine Überwachung der Laserleistung und der Nahttiefe. Für die Detektion der reflektierten Laserstrahlung muss passend zum Arbeitswellenlängenbereich des verwendeten Lasers die rechte Photodiode ausgelegt sein. Festkörperlaser und Nd:YAG-Laser benötigen Konfigurationen mit einer spektralen Empfindlichkeit von  $\lambda = 1064 \text{ nm}$ . Anhand der reflektierten Laserstrahlung kann ebenfalls auf die aktuelle Einschweißtiefe geschlossen werden (vergleiche Kapitel 3.2.1). Durch den innerhalb der Schweißoptik angebrachten dichroitischen Spiegel gelangt die koaxial erfasste Prozessstrahlung zu den in Serie geschalteten Photodioden. [23]

Die Auswertung der digitalisierten und aufbereiteten Signale erfolgt für die meisten der oben genannten Systeme anhand von Hüllkurven (Toleranzbändern) [38]. Hierfür werden Signalverläufe von einem nicht gestörten Laserstrahlschweißprozess mit der gewünschten Nahtqualität aufgenommen und dienen als Referenzkurven. Aus den Referenzkurven wird eine obere und eine untere Hüllkurve festgelegt, innerhalb welcher der IO-Bereich (Arbeitsbereich) liegt. Über- oder unterschreitet das Signal den als Toleranzband bezeichneten Arbeitsbereich, so wird anhand der Überschreitungsdauer des Signals vom Prozessüberwachungssystem eine Wahrscheinlichkeit für das Auftreten eines Fehlers berechnet. [23], [39]

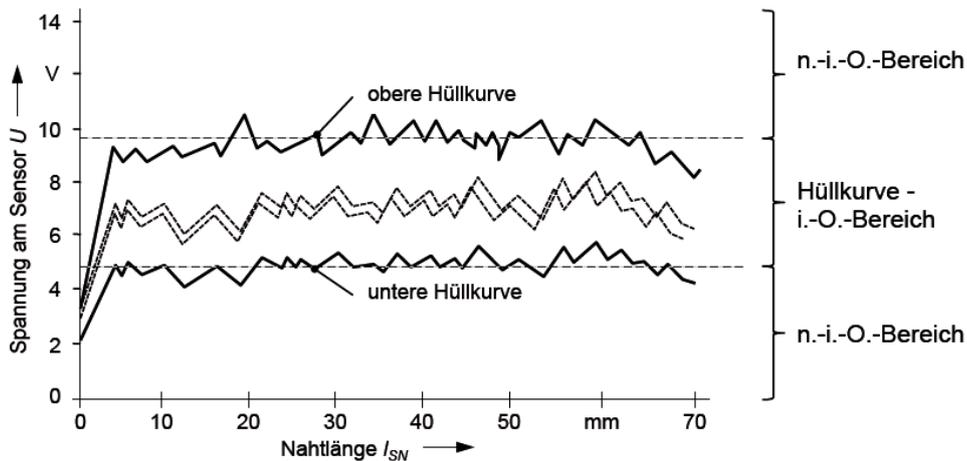


Abbildung 3-9: Signalauswertung mithilfe von Hüllkurven [23]

### Prozessüberwachung basierend auf Interferometrie

Die Interferometrie ist eine Messmethode, die Gebrauch von der Wellennatur des Lichts macht und ist ein vielseitiges Werkzeug für die Präzisions-Längenmesstechnik geworden. [39], [40] Das Messprinzip beruht auf der Interferenz (Überlagerung) von Wellen und liefert bei ausreichender Kohärenz ein Interferenzmuster. Als kohärente Lichtwellen werden in der Physik Lichtwellen verstanden, welche in ihrer Frequenz übereinstimmen und in gleicher Phase schwingen oder eine unveränderliche Phasendifferenz aufweisen. Messapparaturen zur Detektion von Interferenzphänomenen werden als Interferometer bezeichnet. [39], [41]

Die meisten der heute am Markt befindlichen Interferometer sind eine Variation der in Tabelle 3-2 aufgelisteten Grundtypen.

Tabelle 3-2: Interferometer-Grundtypen [42]

Zweistrahl-Interferometer	Vierstrahl-Interferometer	Kohärenztyp
Youngs Doppelspalt	Optisches Gitter	transversal
Michelson-Interferometer	Fabry-Perot-Interferometer	longitudinal

Das 1882 von Albert Abraham Michelson erfundene und ebenso nach ihm benannte Michelson-Interferometer, ist das wahrscheinlich bekannteste Messinstrument in der Interferometrie. Auf dem Grundprinzip des Michelson-Interferometers, basieren eine Reihe von hochgenauen und berührungslosen Echtzeit-Prozessüberwachungssystemen für das Laserstrahlschweißen. [39] Tabelle 3-3 zeigt beispielhaft zwei deutsche Hersteller solcher Prozessüberwachungssysteme. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3-3: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme auf Basis von Interferometern

Hersteller	Produktname
Lessmüller Lasertechnik GmbH [43]	OCT - Nahtführung & Überwachungssystem
IPG Lasertechnik GmbH [44]	LDD-700 Inline Welding Process Monitor

Zum besseren Verständnis dieser Prozessüberwachungssysteme wird im folgenden Absatz die generelle Funktionsweise des Michelson-Interferometers erklärt. Darauf aufbauend wird das Weißlicht-Interferometer vorgestellt, welches die Grundlage für optische Topographiemessungen schafft.

In der Grundversion besteht das Michelson-Interferometer aus einer monochromatischen Lichtquelle (emittiert Licht mit nur einer Wellenlänge z.B. ein Laser), einem teildurchlässigen Spiegel, zwei vollständig reflektierende Spiegel und einem Detektor. Der prinzipielle Aufbau wird in Abbildung 3-10 dargestellt.

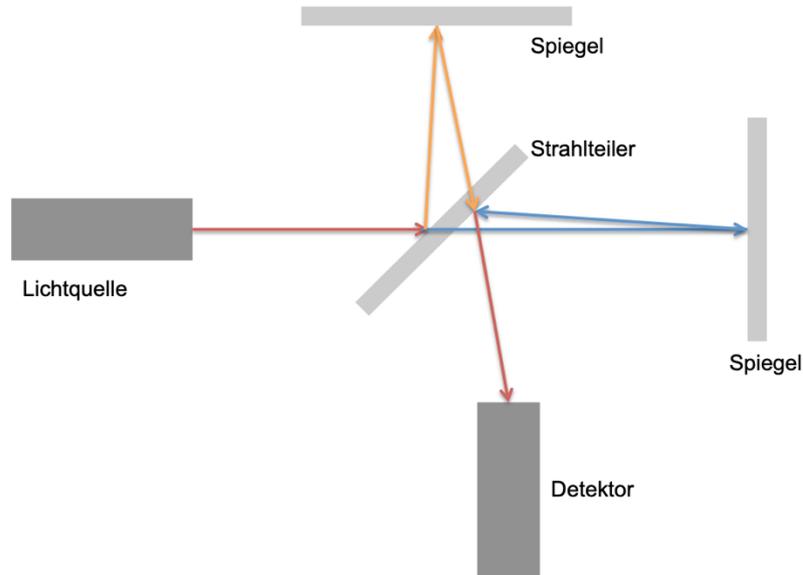


Abbildung 3-10: Prinzipieller Aufbau eines Michelson-Interferometers

Wie aus Abbildung 3-10 ersichtlich basiert das Michelson-Interferometer auf der Zweistrahlinterferenz. Das bedeutet, dass die von der Lichtquelle ausgehende monochromatische Lichtwelle (rot) in zwei Wellen (blau und gelb) aufgespalten bzw. zerteilt wird. Dies geschieht durch den teildurchlässigen Spiegel (Strahlteiler). Eine Teilwelle wird vom Strahlteiler reflektiert (gelb) und die andere (blau) wird durchgelassen. Beide Wellen durchlaufen unterschiedlich lange optische Wege längs der Arme des Interferometers. Die reflektierte und die durchgelassene Welle werden beide von den vollständig reflektierenden Spiegeln auf den Strahlteiler zurückgeworfen wo es dann zur Interferenz der Wellen kommt (rot). Abhängig vom Unterschied der optischen Wege entsteht ein Interferenzmuster. Der Detektor kann anhand dieses Interferenzmusters auf die Phasenunterschiede und somit auf die Laufzeit- sowie Laufwegunterschiede schließen. Man könnte den Detektor auch durch eine Mattscheibe ersetzen, auf welcher das Interferenzmuster zur Veranschaulichung in Echtzeit abgebildet wird. [39]

Eine weitere interferometrische Messmethode wurde in den 1980er Jahre entwickelt und wird als optische Kohärenztomografie (englisch: optical coherence tomography, OCT) bezeichnet. Die optische Kohärenztomografie fand zuerst Anwendung in der Medizintechnik wie z.B. in der Augenheilkunde. Das System hat sich in den letzten Jahren so weiterentwickelt, dass es jetzt auch in der Lasermaterialbearbeitung als Prozessüberwachungssystem eingesetzt wird. Durch punktweise Abtastung wird eine hochpräzise Erfassung (3D-Bilder) sowie Messung der Naht-Topographie (Höhenprofilmessung der Oberfläche) ermöglicht. [45]

Das Prinzip dieser Messmethode beruht auf den Grundlagen des Weißlicht-Interferometers, welches ebenfalls eine Abwandlung des Michelson-Interferometers ist. Im Gegensatz zum Michelson-Interferometer benutzt das Weißlicht-Interferometer keinen Laser als Lichtquelle, sondern eine Diode, welche im Gegensatz zum Laser-Licht mit geringerer Kohärenzlänge emittiert. Bei den meisten Interferometern wird eine große

Kohärenzlänge angestrebt, da diese den Messbereich begrenzt. Die spezielle Messmethode des Weißlicht-Interferometers ermöglicht jedoch einen uneingeschränkten Messbereich. Verändert man jetzt den oben in Abbildung 3-10 dargestellten Aufbau des Michelson-Interferometers indem man den Detektor durch eine CCD-Kamera (englisch: charge-coupled device) und den Spiegel von einem der beiden Messarme durch das zu messende Objekt ersetzt, so erhält man den schematischen Aufbau des Weißlicht-Interferometers (siehe Abbildung 3-11). [39]

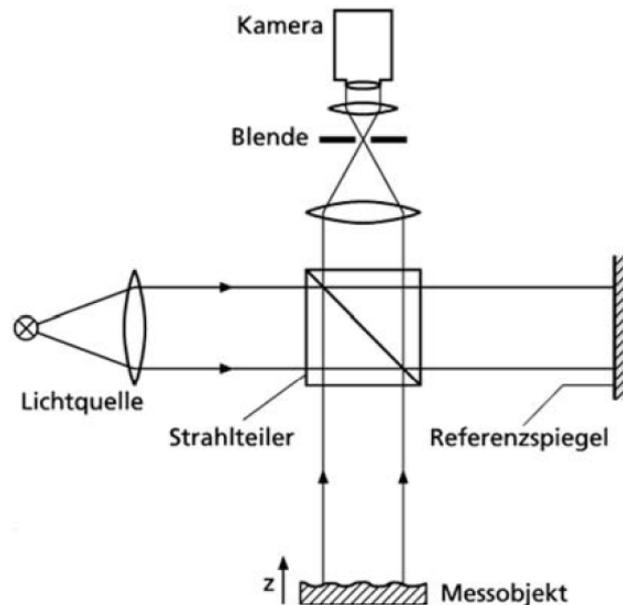


Abbildung 3-11: Prinzipieller Aufbau eines Weißlicht-Interferometers [39]

Gleich wie beim Michelson-Interferometer kommt es auch hier zur Überlagerung der Lichtwellen, welche vom Messobjekt und der Referenzfläche zurückreflektiert werden. Voraussetzung für die Interferenz der Lichtwellen ist, dass die Differenz der zurückgelegten Wege von Messarm und Referenzarm kleiner als die Kohärenzlänge ist. Das Interferenzsignal wird mit einer CCD-Kamera aufgezeichnet und anschließend ausgewertet. [39]

Die Adaption eines Prozessüberwachungssystems in die Schweißoptik basierend auf den oben aufgezeigten Grundlagen wird am Beispiel der OCT-Überwachungstechnologie der Lessmüller Lasertechnik GmbH in Abbildung 3-12 dargestellt.

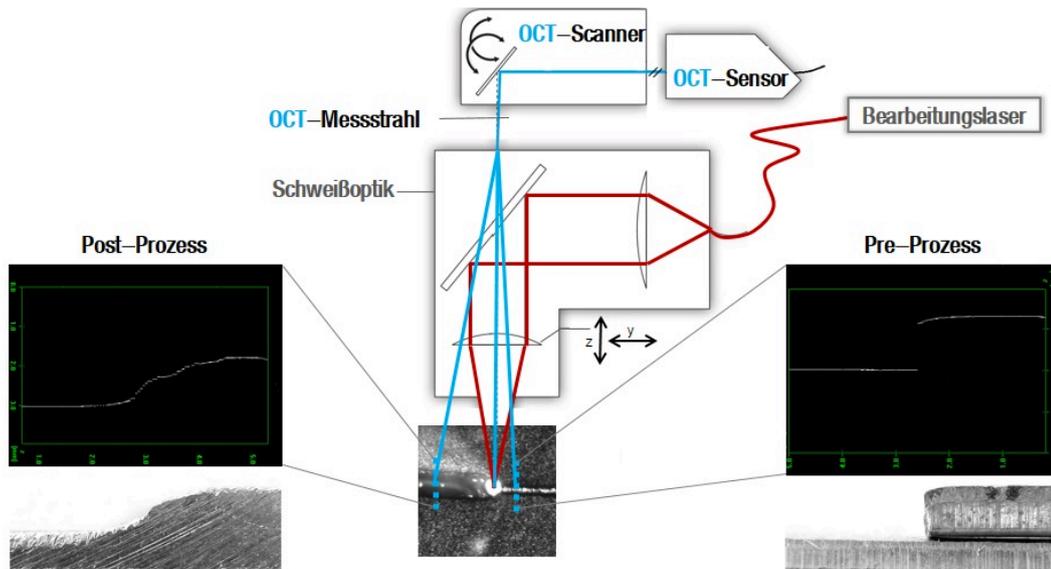


Abbildung 3-12: Integration des OCT-Nahtführungs- und Überwachungssystems in die Schweißoptik [43]

Die Funktionsweise des OCT-Sensors entspricht dem Prinzip des oben vorgestellten Weißlicht-Interferometers. Innerhalb dieses wird wie bereits erwähnt ein emittierter Lichtstrahl in einem Referenzarm und einen Messarm aufgespalten. Der in Abbildung 3-12 als blau dargestellte Lichtstrahl entspricht dem Messarm, welcher auf die Bearbeitungsfläche projiziert wird und von dort zum OCT-Sensor zurückgeworfen wird. Eine Tiefenmessung in das Keyhole wird durch Laufzeitvergleich des Messarmes relativ zum Referenzarm ermöglicht. Der OCT-Scanner ermöglicht die Erstellung dreidimensionaler Profile durch laterale Abtastung der Bauteiloberfläche (blaue Punkte in Abbildung 3-12). Somit überwacht das OCT-Nahtführungs- und Überwachungssystem beim Laserschweißen den Pre-, In-situ-, und Postprozess. Vorteil dieser Prozessüberwachungsvariante ist, dass die OCT-Genauigkeit vom Prozesslicht unbeeinflusst ist und eine Adaption in viele gängige Schweißoptiken durchführbar ist. [43]

### Prozessüberwachung durch Erfassung der Temperatur- bzw. Strahlungsverteilung auf der Messoberfläche

Ein wichtiges bildgebendes Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung ist die sogenannte Infrarot-Thermografie. Dieses ZfP-Verfahren ist in der Lage durch berührungslose Erfassung der lokalen Temperatur- bzw. Strahlungsverteilung auf der Schweißnahtoberfläche Unregelmäßigkeiten wie z.B. Bindefehler und Poren unter der Oberfläche zu detektieren. Hierfür wird die Infrarotstrahlung der zu untersuchenden Fügeverbindung gemessen. Innerhalb der Thermografie wird zwischen aktiver und passiver Thermografie unterschieden. Ob es sich um aktive oder passive Thermografie handelt, hängt von der thermischen Anregung der zu untersuchenden Schweißnaht ab. Während die aktive Thermografie sowohl online, als auch offline angewandt werden kann, ist die passive Thermografie zur Überwachung während des Fügeprozesses (In-situ)-Prozess-Erfassung) in Verwendung. In Abbildung 3-13 werden wichtige Begriffe innerhalb der Thermografie sowie die Charakteristika der einzelnen Verfahren (passiv, aktiv) in Anlehnung an die DIN 54190-1 zum besseren Verständnis aufgeführt. Da innerhalb dieses Kapitels In(-situ)-Prozessüberwachungssysteme behandelt werden, wird im Folgenden auf die passive Thermografie eingegangen. Die aktive Thermografie wird im Kapitel 3.3.1 näher erläutert. [46], [47]

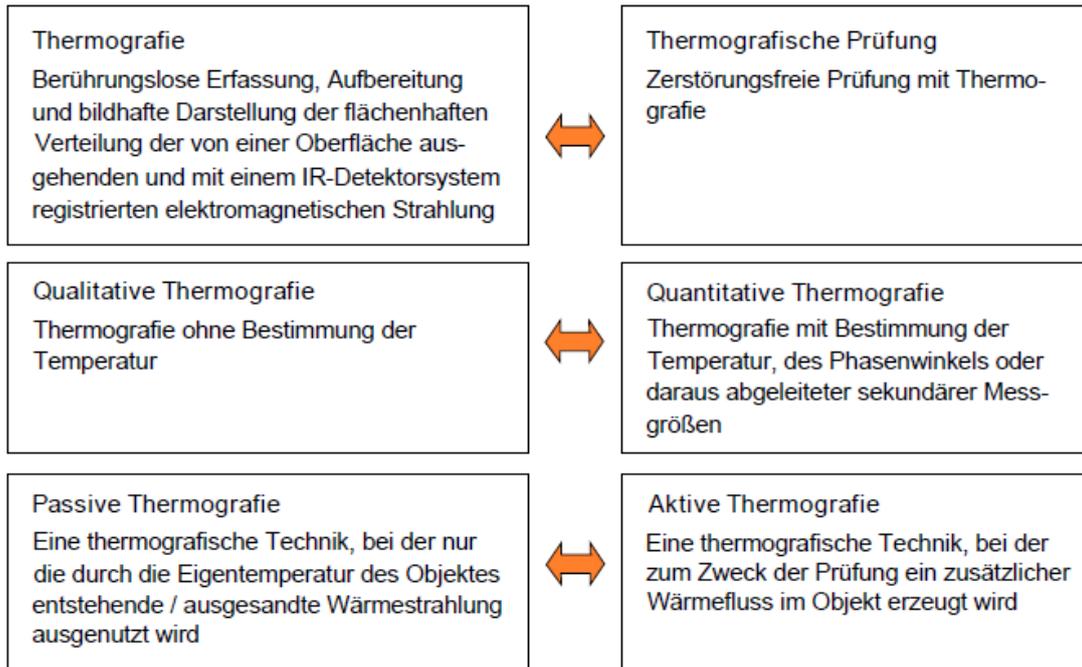


Abbildung 3-13: Wichtige Begriffsdefinitionen nach DIN 54190-1 [48]

Bei passiver Thermografie wird gezielt die infolge des Fügeprozesses auftretende Eigenwärme der Schweißnaht für die thermografische Messung verwendet. Voraussetzung für den Einsatz dieses Verfahrens ist, dass die Schweißnaht Strahlung im infraroten Bereich (etwa 0,8 µm bis 1,2 µm) emittiert. Mithilfe der passiven Thermografie werden Messabweichungen sofort detektiert und können daraufhin sofort korrigiert werden, ohne den aktuellen Prozess zu gefährden. Die passive Thermografie ist im Gegensatz zur aktiven Thermografie ein prozessgekoppeltes Verfahren und ermöglicht Rückschlüsse auf Temperaturen sowie auch auf Unregelmäßigkeiten im Inneren der Schweißnaht, welche die Wärmestrahlung auf der Werkstückoberfläche beeinflussen. Ungängen beeinflussen den Wärmediffusionsprozess im inneren der Schweißnaht dermaßen, sodass die Auswirkungen des zeitlichen Verlaufes der Wärmestrahlung an der Oberfläche detektierbar sind. Zur Auswertung wird mithilfe einer Infrarotkamera ein Wärmebild (Thermogram) aufgenommen, welches daraufhin hinsichtlich seiner Temperaturverteilung auf thermische Auffälligkeiten überprüft wird. Anwendung findet die passive Thermografie derzeit hauptsächlich in der Elektrotechnik (z.B. Untersuchung elektrischer Anschlüsse) sowie im Bauwesen (z.B. Untersuchung von Wärmedämmung). [46], [47], [49], [50]

Es gibt aber auch schon eine Reihe von Untersuchungen wie z.B. in [51], wo das Auftreten von Heißrissen während dem Laserstrahlschweißen in(-sito) beurteilt wurde. Es wurde festgestellt, dass Heißrisse in der Schweißnaht den Wärmefluss blockieren und dadurch eine Änderung des Temperaturfeldes an der Oberfläche hervorgerufen wird. [51]

Angeboten werden diese ZfP-Verfahren zum Beispiel von den in der Tabelle 3-4 aufgelisteten Herstellern. Die Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Tabelle 3-4: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme auf Basis von passiver Thermografie

Hersteller	Produktname
HKS Prozesstechnik GmbH [52]	ThermoProfilScanner (kurz TPS)
InfraTec GmbH [53]	Infrarotsensorik und Messtechnik

Der in Tabelle 3-4 vorgestellte ThermoProfilScanner der Firma HKS Prozesstechnik GmbH wird bereits sehr erfolgreich bei der Endlosrohrherstellung bei verschiedenen Schweißverfahren (Hochfrequenzinduktion, WIG, Plasma, Laser) verwendet.

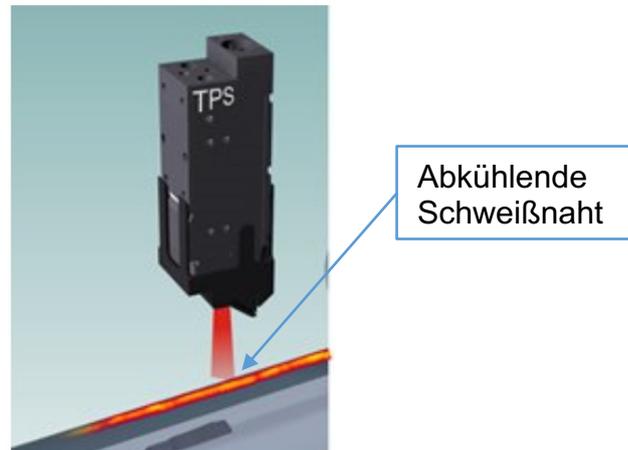


Abbildung 3-14: Thermoprofilscanner der HKS Prozesstechnik GmbH [53]

Der TPS ist eine Wärmezeilenmesseinrichtung, die die abkühlende Schweißnaht mithilfe eines Linienscanners mit einer Abtastrate von 400 Hz quer zur Naht abtastet. Dies ermöglicht die Erfassung von Schweißnahtunregelmäßigkeiten aus der noch glühenden Naht. Es können sowohl oberflächliche Unregelmäßigkeiten (offene Poren, Löcher, Einbrandkerben etc.) als auch innere Unregelmäßigkeiten (Einbrandtiefe, Wurzelbildung etc.) detektiert werden.

### 3.3 Post-Prozessüberwachung

#### 3.3.1 Relevante Post-Prozessüberwachungssysteme für die Batteriefertigung

Dieses Kapitel soll die für die Batteriefertigung relevanten kommerziell erhältlichen Post-Prozess-Überwachungssysteme vorstellen.

#### Prozessüberwachung durch künstliche energetische Anregung des Prüfobjektes

Im Unterschied zur im Kapitel 3.2.2 erläuterten passiven Thermografie beruht das Arbeitsprinzip der aktiven Thermografie auf der künstlichen energetischen Anregung des Prüfobjektes. Durch die energetische Anregung – hervorgerufen durch optische, konvektive, elektrische oder mechanische Quellen – wird ein Wärmestrom im Prüfobjekt induziert. Der Wärmestrom wird durch Unregelmäßigkeiten wie z.B. Poren beeinflusst, was anhand der vom Werkstück abgegebenen Infrarotstrahlung mittels einer Thermografiekamera erfasst und visualisiert wird. In Abbildung 3-15 ist der Ablauf der aktiven Thermografieprüfung dargestellt. [46], [47], [54]

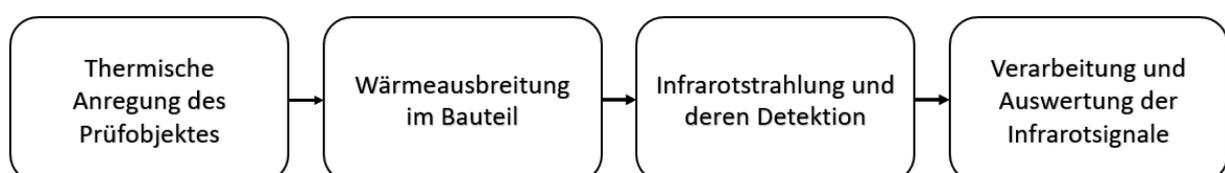


Abbildung 3-15: Ablauf der aktiven Thermografieprüfung, in Anlehnung an [46]

Abbildung 3-16 zeigt die Hauptelemente der aktiven Thermografie sowie die bereits zuvor erwähnten Möglichkeiten der energetischen Anregung.

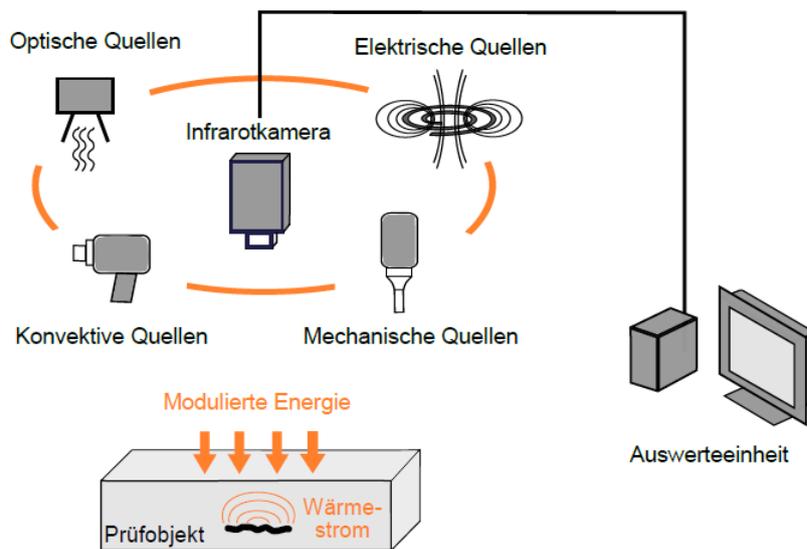


Abbildung 3-16: Prinzipdarstellung der aktiven Thermografie [46]

Bei der aktiven Thermografieprüfung wird zwischen zwei möglichen Prüfanordnungen unterschieden. Laut der betreffenden Norm DIN 54192 unterscheidet man zwischen der Reflexionsanordnung und der Transmissionsanordnung [55]. Bei ersterer erfolgt die energetische Anregung von der Kameraseite aus. Betrachtet man die Wärmeabfuhr in der Schweißnaht, so erfolgt diese in angebundenen Bereichen der Schweißnaht schneller als in Bereichen mit Fehlstellen. Dadurch lässt sich anhand des zeitlichen Verlaufes der Oberflächentemperatur auf Schweißnahtfehler schließen. In der Transmissionsanordnung hingegen erfolgt die energetische Anregung von der kameraabgewandten Seite. Die Wärmeströmung erreicht die Kameraseite dort am schnellsten, wo keine Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht vorhanden sind. Es lässt sich somit auch hierbei wieder anhand des zeitlichen Verlaufes der detektierten Wärmestrahlung auf Unregelmäßigkeiten schließen. Ob die Reflexionsanordnung oder die Transmissionsanordnung für die jeweilige Prüfaufgabe geeigneter ist, sollte am besten in einer Voruntersuchung geklärt werden. Innerhalb einer Laserstrahlschweißkabine ist z.B. der Platzbedarf der Prüfsystemkomponenten zu beachten. Als robustere Methode gilt innerhalb der Literatur die Transmissionsanordnung, da die Gefahr von Störreflexionen hervorgerufen durch die Anregungsquelle(n) geringer ist. Die zuvor besprochenen Prüfanordnungen werden in Abbildung 3-17 schematisch dargestellt. [46], [47], [55]

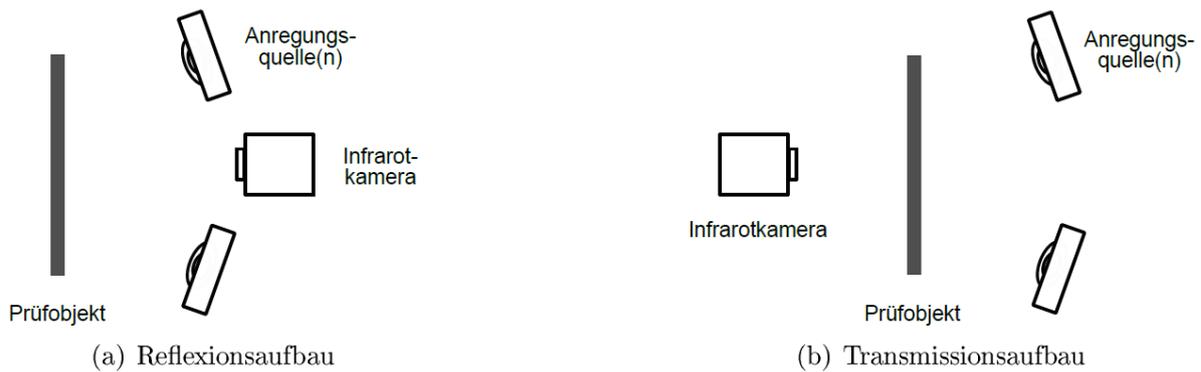


Abbildung 3-17: Prüfanordnungen in der aktiven Thermografie [46]

Es sollte auch angemerkt werden, dass mit der aktiven Thermografie sowohl eine Offline- sowie eine Inline-Erfassung möglich ist [47]. Es lassen sich mit diese ZfP-Verfahren Durchschüsse, Poren, Lunker, Risse und Bindefehler detektieren [56], [57]. Angeboten werden solche ZfP-Verfahren z.B. von den in Tabelle 3-5 angeführten Firmen.

Tabelle 3-5: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme auf Basis von aktiver Thermografie

Hersteller	Produktname
InfraTec GmbH [53]	Infrarotsensorik und Messtechnik
HEITRONICS Infrarot Messtechnik GmbH [58]	Infrarotmesstechnik

### Prozessüberwachung durch induzierte Wirbelströme

Mit dem Wirbelstromverfahren (english: eddy current method) ist jedes elektrisch leitfähige Material prüfbar, natürlich auch die Schweißnähte der Batteriezellen. Jeder Fehler kann aber nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit gefunden werden. Wo die Grenzen liegen, soll bzw. wird in Wirtschaftlichkeitsberechnungen und Sicherheitsabwägungen festgelegt. Wie gut eine bestimmte Art von Fehlern nachgewiesen werden kann, wird z.B. in der Luftfahrt mit sogenannten POD-Kurven (Probability of Detection) dargestellt. Dabei wird nicht der kleinste nachweisbare Fehler angegeben, sondern der, der mit hoher Sicherheit nicht übersehen wird, d.h. mit einer hohen Wahrscheinlichkeit nachgewiesen werden kann. [59]

Die Prozessüberwachung mithilfe induzierter Wirbelströme gehört zu den Oberflächenverfahren, da Unregelmäßigkeiten nur an oder dicht unter der Oberfläche detektiert werden können. Im Vergleich zur Wirbelstrommessung erlauben die beiden Volumenverfahren Röntgenstrahl- und Ultraschallprüfung einen Blick in das Innere des Bauteiles. [60]

Angeboten werden solche ZfP-Verfahren z.B. von den in Tabelle 3-6 angeführten Firmen.

Tabelle 3-6: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme auf Basis induzierter Wirbelströme

Hersteller	Produktname
Rohmann GmbH [61]	Prüfgerät: Elotest 300, Sondentyp: PKA-27 H-1359

Das Prinzip hinter diesem elektrischen Verfahren beruht darauf, dass ein stromdurchflossener gerader elektrischer Leiter von einem Magnetfeld (Wirbelfeld, primäres Magnetfeld) umgeben ist (siehe Abbildung 3-18). Wird dieser gerade Leiterdraht zu einer kreisförmigen Drahtschleife (Spule) gewunden, so kommt es zur Bildung einer magnetischen Dipolstruktur (Nord- und Südpol). Durch Erhöhung der Windungszahl, wird die Stärke des erzeugten magnetischen Feldes erhöht, was zu einer Zunahme der

Spulenlänge führt. Durch eine Vergrößerung der Spulenlänge ähnelt das magnetische Feld immer mehr der Form eines stabförmigen Permanentmagneten. [62]

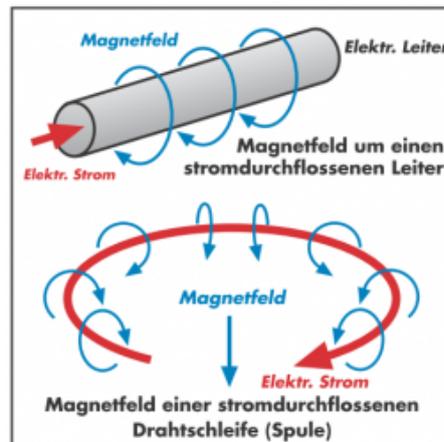


Abbildung 3-18: Entstehung des Magnetfeldes in einer Spule [62]

Nähert man nun das magnetische Feld der Spule an das Prüfmaterial an, so werden in diesem Wirbelströme induziert, welche wie aus Abbildung 3-19 ersichtlich in entgegengesetzter Richtung zum Spulenstrom verlaufen (Lenz'sche Regel). [62]

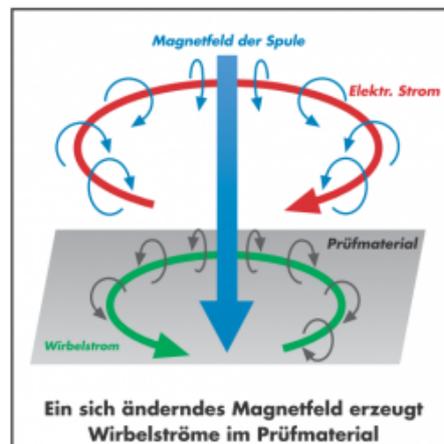
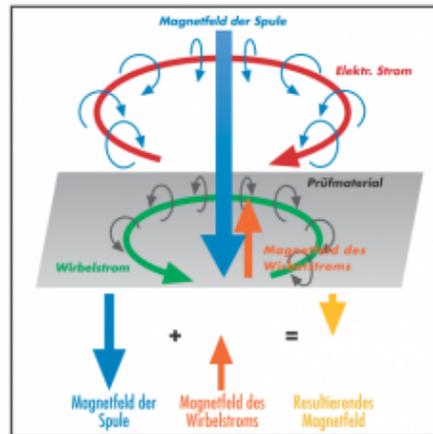


Abbildung 3-19: Entstehung von Wirbelstrom im Prüfmaterial [62]

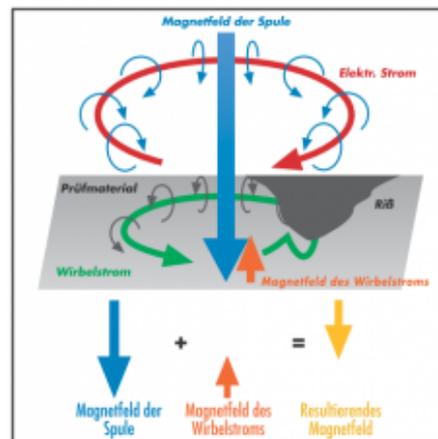
Die Wirbelströme sind ebenfalls von einem magnetischen Wirbelfeld (sekundäres Magnetfeld) umgeben, welches ebenfalls eine Dipolstruktur aufweist. Das primäre und das sekundäre Magnetfeld sind entgegengesetzt gerichtet (siehe Abbildung 3-20). Durch Überlagerung der beiden Magnetfelder (blauer und oranger Pfeil in Abbildung 3-20) entsteht ein resultierendes Magnetfeld, welches verglichen zum primären Magnetfeld eine geringere Feldstärke hat. [62]



**Addition der Magnetfelder von Spule und Wirbelstrom im homogenen Material**

Abbildung 3-20: Auswirkung des Wirbelstroms im Prüfmateriale [62]

Durch das Auftreten von lokalen Unregelmäßigkeiten wie Risse, Korrosionsnarben, Poren oder nichtmetallischen Einflüssen können die induzierten Wirbelströme nicht mehr ungehindert fließen und es kommt zu einer reduzierten Gegenwirkung des sekundären Magnetfeldes auf das primäre Magnetfeld. Das resultierende Magnetfeld ist deutlich stärker als das des fehlerfreien Prüflings (siehe Abbildung 3-21).



**Addition der Magnetfelder von Spule und Wirbelstrom im geschädigten Material**

Abbildung 3-21: Wirbelstrom im Prüfmateriale mit Unregelmäßigkeit [62]

Detektiert und zur Anzeige gebracht wird die Stärke des resultierenden Magnetfeldes durch geeignete Spulen (Empfangsspulen).

### 3.4 Zusammenfassung

Die innerhalb der Literaturstudie ausgewählten Methoden haben allesamt Potential für die zerstörungsfreie, serientaugliche Prüfung von lasergeschweißten Batteriezellen. Alle Verfahrensvarianten arbeiten berührungslos und halten auch die in Kapitel 2.3.7.3 definierten Rahmenbedingungen ein. In Tabelle 3-7 sind die Methoden noch einmal überblicksmäßig mit ihren wichtigsten Vor- und Nachteilen aufgelistet. Jedes dieses System hat sowohl Stärken als auch Schwächen. Wie sich diese Systeme in der Praxis bewähren, wird im Kapitel 4 untersucht.

Tabelle 3-7: Gegenüberstellung wesentlicher Vor- und Nachteile der einzelnen ZfP-Methoden

System	Vor- und Nachteile	Prozessposition
Wirbelstromprüfung	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Hohe Prüfgeschwindigkeit möglich</li> <li>+ Unempfindlich gegen Störeinflüsse (Prozessleuchten, Tageslicht etc.)</li> <li>- Feldstärke nimmt exponentiell zur Tiefe des Materials ab</li> </ul>	Post-Prozess
Aktive Thermografie	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Auch innere Unregelmäßigkeiten sichtbar</li> </ul>	
Passive Thermografie	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Bilderzeugende Temperaturmessung</li> <li>- Probleme bei reflektierender Werkstückoberfläche</li> <li>- Hohe Wärmeleitung von Werkstoffen</li> </ul>	In(-situ)-Prozess
Interferometrie	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Unempfindlich gegen Prozessemissionen</li> <li>+ Vermessung des Keyholes</li> <li>+ Autarkes Echtzeit-Messsystem</li> <li>- Derzeit keine Keyholevermessung bei Laserschweißen im Überlapp (Wobbeln) möglich</li> </ul>	
Prozessüberwachung anhand Prozessemissionen	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Autarkes Echtzeit-Überwachungssystem</li> <li>+ Quasi Fingerabdruck des Schweißprozesses</li> <li>- Prozesseinlernen notwendig</li> <li>- Störung durch fremde Lichtquellen (Tageslicht, Hallenbeleuchtung etc.)</li> </ul>	

## 4 PRAKTISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die im theoretischen Teil dieser Masterarbeit vorgestellten bzw. behandelten ZfP-Verfahren (siehe Kapitel 3) sollen in diesem empirischen Teil in Zusammenarbeit mit Firmen und Forschungsinstituten experimentell untersucht werden. Hauptaugenmerk wurde dabei auf die Eignung bezüglich Serientauglichkeit und der Nachweisbarkeit der in Kapitel 2.2 festgestellten Unregelmäßigkeiten gelegt.

Wie aus Kapitel 3.1 hervorgeht, ist der Schwerpunkt auf Prozessüberwachungsverfahren gerichtet, die eine Online-Schweißnahtprüfung (In(-situ)-Prozess-Erfassung, Post-Prozess-Erfassung) ermöglichen. Für die sogenannte Post-Prozessüberwachung wurden Proben vorab geschweißt, in die mit Absicht Unregelmäßigkeiten eingebracht wurden. Diese Proben werden in Kapitel 4.1 näher beschrieben.

Die Ergebnisse der untersuchten ZfP-Verfahren werden in Kapitel 4.2 vorgestellt und in Kapitel 5 in einer Ergebnismatrix für einen besseren Überblick gegenübergestellt.

### 4.1 Proben

Innerhalb dieses Kapitels werden die Proben für die Post-Prozessuntersuchungen vorgestellt, welche eigens für die Untersuchungen innerhalb dieser Masterarbeit zu Beginn hergestellt wurden. Die Proben werden durch Verschweißen zweier Aluminiumblättchen auf die Pole (plus und minus) der Zelldeckel hergestellt (siehe Abbildung 4-1). Die Aluminiumblättchen entsprechen dem Busbarwerkstoff (siehe Kapitel 2.3.4). Die vollständige Bemaßung des Zelldeckels ist aus Kapitel 2.3.3 zu entnehmen. In Abbildung 4-1 ist lediglich das Längen-Breiten-Verhältnis (grün) des Zelldeckels dargestellt.

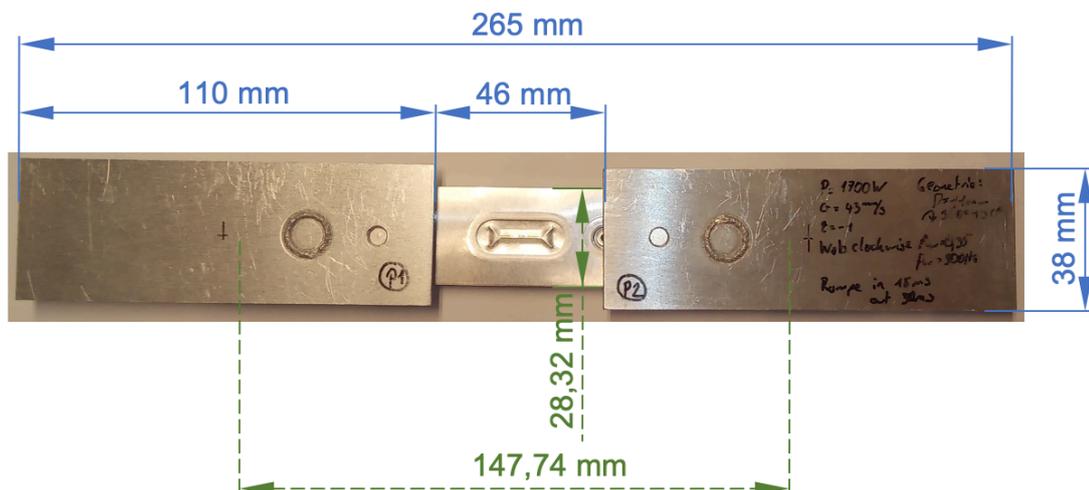


Abbildung 4-1: Probe1\_Probe2 (kurz P1\_P2)

Durch Variation der Schweißparameter sowie durch gezielte Einbringung von Testfehlern (Unregelmäßigkeiten) in die Proben können die Prozessüberwachungssysteme (ZfP-Verfahren) bezüglich der möglichen Fehlerdetektion getestet, beurteilt und verglichen werden. Hierzu wurden sechs unterschiedliche Fehlerszenarien – wie sie auch in der Produktion auftreten – nachgestellt. Die diversen Szenarien sind in Tabelle 4-1 mit dazugehöriger Probennummer aufgelistet.

Tabelle 4-1: Szenarien für die Post-Prozessüberwachung

Szenario Nummer	Probennummer, Probenbezeichnung	Eingebrachte Unregelmäßigkeit	Bemerkung
1	P1_P2 P3_P4	Gutschweißung	dient als Referenz für die anderen Proben
2	P5_P6 P7_P8	Poren	ohne wobbeln geschweißt
3	P9_P10 P11_P12	50 % der Naht geschweißt	simuliert z.B. die Unterschreitung der Mindestquerschnittfläche für die elektrische Kontaktierung oder einen nicht eingekoppelten Laserstrahl
4	P13_P14 P15_P16	75 % der Naht geschweißt	Simuliert z.B. die Unterschreitung der Mindestquerschnittfläche für die elektrische Kontaktierung oder einen nicht eingekoppelten Laserstrahl
5	P17_P18 P19_P20	0,3 mm Spalt zwischen Zellpol und Busbar	simuliert z.B. Nahtefall (Grenzfall)
6	P21_P22 P23_P24	0,5 mm Spalt zwischen Zellpol und Busbar	simuliert z.B. Nahtefall (Extremfall)

Mithilfe eines Digitalmikroskopes der Firma Leica Microsystems wurden hochauflösende Oberflächenbilder der einzelnen Proben aufgenommen. Das genaue Modell des Digitalmikroskopes ist dem Typenschild in Abbildung 4-2 zu entnehmen. Diese Bilder dienten den Firmen sowie Forschungsinstituten im Voraus für die Einschätzung der Prüfaufgabe bzw. der Prüfausgangssituation.



Abbildung 4-2: Digitalmikroskop Leica DVM6 M bei Samsung SDIBS GmbH

Beispielhaft werden die Oberflächenbilder von P1\_P2 dargestellt, die restlichen Bilder befinden sich im Anhang 11.3. Wie aus den Bildern hervorgeht, kann man den Schweißnahtanfang, das Schweißnahtende, Schweißspitzer etc. sowie die dazugehörigen Größenordnungen deutlich entnehmen.



Abbildung 4-3: Probe P1\_P2; hochauflösende Oberflächenbilder

Unterstützend zu den hochauflösenden Oberflächenbildern wurden mithilfe von Röntgen-Computertomographie (X-CT) CT-Bilder von den Proben gemacht. Die X-CT zählt mittlerweile zu den Standardverfahren für die zerstörungsfreie Bauteilprüfung und ermöglicht die Herstellung qualitativer Volumenbilder. Die CT-Bilder wurden am Österreichisches Gießerei-Institut (kurz ÖGI) in Leoben angefertigt. Abbildung 4-4 zeigt den Computertomographie Aufbau am ÖGI.

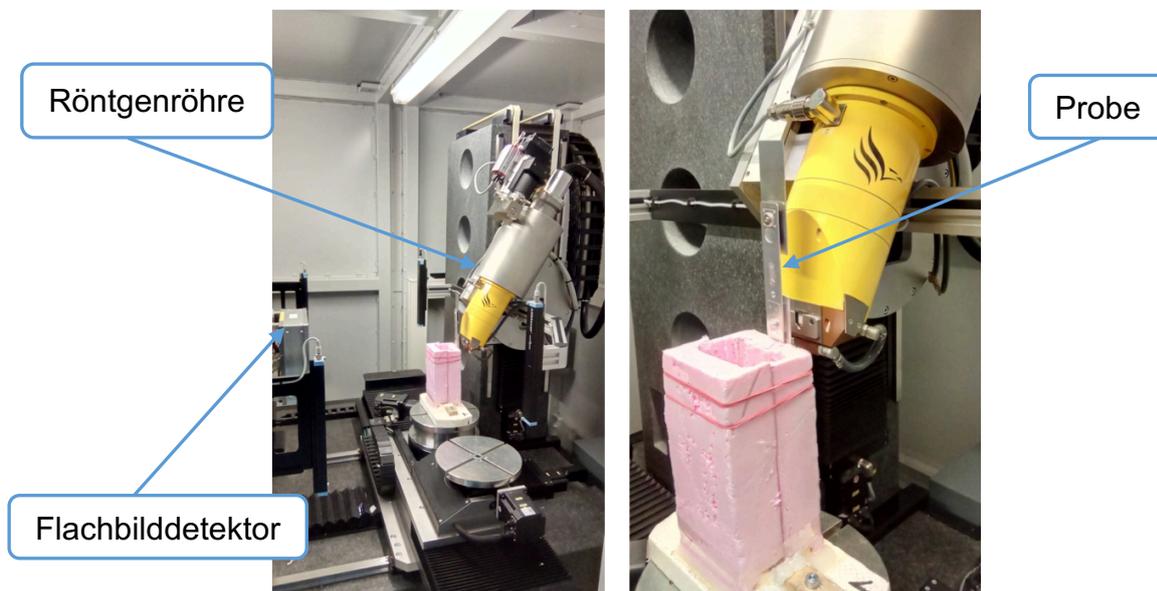


Abbildung 4-4: Computertomographie Aufbau (ÖGI)

Während der Durchführung der CT-Untersuchung wurde gleich zu Beginn festgestellt, dass die zwei Nieten auf der Rückseite des Zelldeckel aus unterschiedlichen Materialien sind. Auf der Anodenseite befindet sich die Kupferniete und auf der Kathodenseite die Aluminiumniete. Es konnten nur dort brauchbare CT-Bilder gemacht werden, wo die Aluminiumniete ist, da Aluminium eine geringere Dichte als Kupfer aufweist und die Kupferniete genau den Bereich der Kreisschweißnaht aufgrund der höheren Dichte schwärzt. Beispielhaft werden die CT-Bilder von P1\_P2 in Abbildung 4-5 dargestellt. Die restlichen Bilder befinden sich im Anhang 11.4.

Um die Größenverhältnisse darzustellen, wurde eine Stahlkugel mit 2 mm Durchmesser auf die Proben geklebt. Auf den CT-Bildern sind deutlich Poren zu sehen.

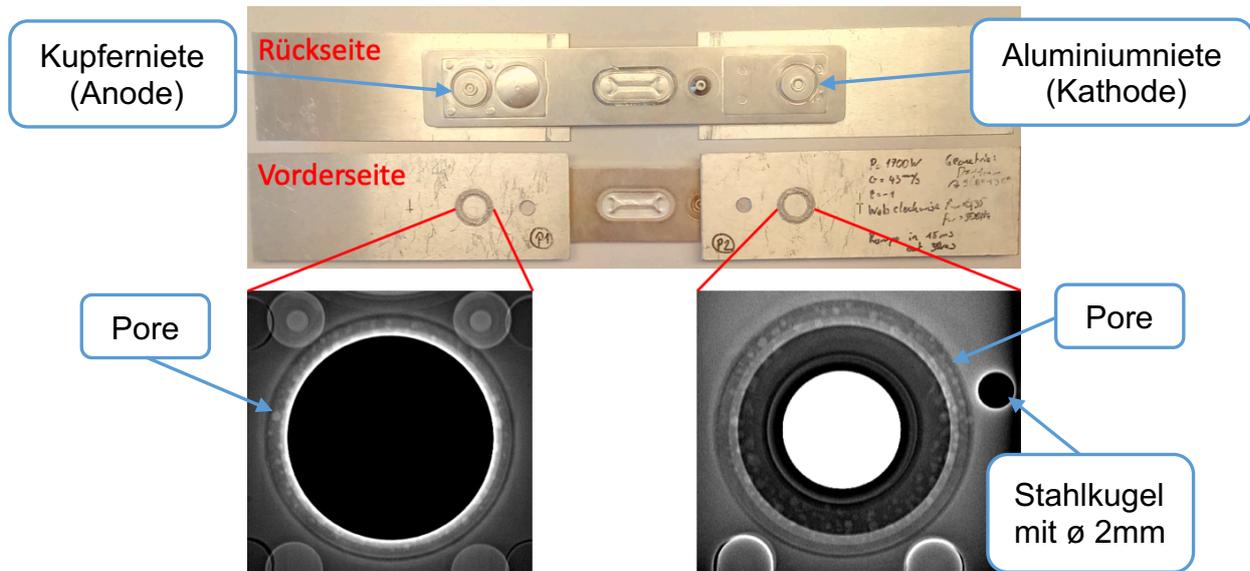


Abbildung 4-5: CT-Bilder von P1\_P2

## 4.2 Dokumentation der Untersuchungen

### 4.2.1 Wirbelstromprüfung (ET)

Innerhalb einer Machbarkeitsanalyse wurden die in Kapitel 4.1 beschriebenen Proben von der Firma Rohmann GmbH mithilfe der Wirbelstromprüfung auf Unregelmäßigkeiten untersucht. Es wurden alle sechs Szenarien der Proben überprüft. Nach mehreren Versuchen mit unterschiedlichen Sonden und Einstellungen wurde die beste Prüfposition gefunden. Diese liegt unmittelbar neben der Schweißnaht. Die Prüfposition der Sonde sowie das verwendete Prüfequipment sind in Abbildung 4-6 dargestellt.



<b>Sondentyp:</b>	PKA-27 H-1359
<b>Prüfgerät:</b>	ELOTTEST B300
<b>Kabel:</b>	EK-2-HF/2
<b>Prüfabstand:</b>	berührend

Abbildung 4-6: Prüfposition der Sonde (links); Verwendetes Prüfequipment (rechts)

Zur Prüfung wurde ein Absolut-Sensor, welcher exakt den Nahtbereich abdeckt gewählt. Im Prüfergebnis Abbildung 4-7 ist eine eindeutige Trennung der Gutteile zu den Teilen mit Spalt erkennbar. Die Aussage bezieht sich auf die Prüfung unter Laborbedingungen und stützt sich auf die Untersuchung an den angelieferten Proben.

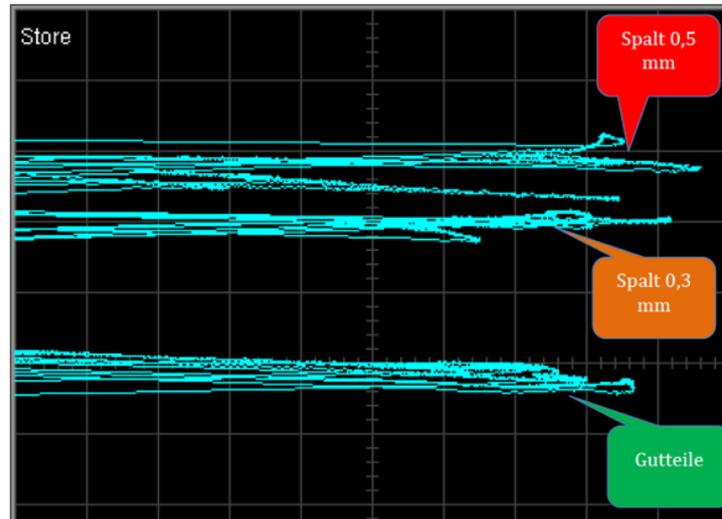


Abbildung 4-7: Wirbelstromsignal Spalterkennung

Die Erkennung der Fehlerart „Spalt“ (0,3 und 0,5 mm) ist auswertbar und somit mit Wirbelstrom prüfbar. Die Untersuchungen der anderen Szenarien brachten keine auswertbaren Ergebnisse und sind somit mit Wirbelstrom nicht prüfbar. Grund dafür ist, dass die Signalanteile der unterschiedlichen IO-Nahtgeometrien (Raupenstrukturen) wesentlich dominanter als die gesuchten Fehlstellen sind. Eine raue, erhabene IO-Naht erzeugt dabei ein deutlich höheres Störsignal als eine ebene NIO-Naht oder eine unterbrochene Naht.

Als weiterer Lösungsansatz wurde von der Firma Rohmann GmbH eine rotierende Tellersonde eingesetzt. Durch die Überprüfung der Naht mit einer rotierenden Tellersonde direkt auf der Schweißraupe (siehe Abbildung 4-8) erzeugt die Raupenstruktur ebenfalls auswertbare Signale.



Abbildung 4-8: Rotierende Tellersonde

Ist keine Raupe da (Probenszenario 3 und 4), fehlen diese Signale (siehe Abbildung 4-9).

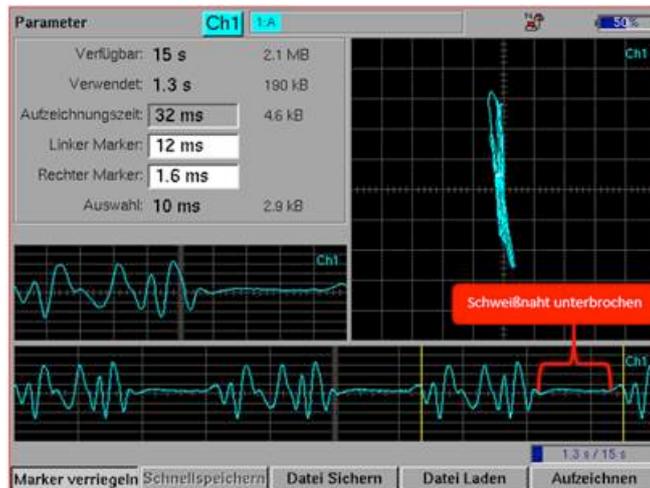


Abbildung 4-9: Probenszenario 3 und 4; unterbrochenes Signal

Ist die Naht durchgängig (Gutschweißung, Szenario 1), entsteht ein Signalbild wie in Abbildung 4-10 ersichtlich ist. Dieser Zustand kann ausgewertet werden. Die Erkennung von Poren sowie anderen Unregelmäßigkeiten unter der Oberfläche ist nicht möglich.

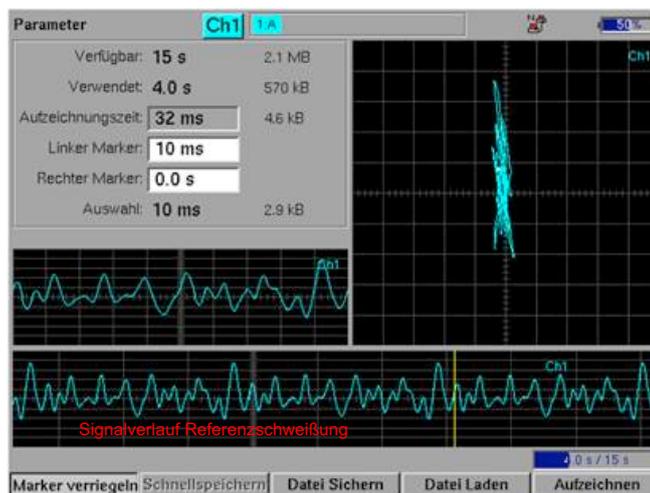


Abbildung 4-10: Probenszenario 1; durchgehendes Signalbild

Ist die Naht eben (Nahteinfall, Probenszenario 5 und 6), wird die Prüfung schwieriger, da ein deutlich glatteres Signal (siehe Abbildung 4-11) resultiert.



Abbildung 4-11: Probenszenario 5 und 6; Nahtefall (ebene Naht)

### Zusammenfassung und Erkenntnisse:

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Spalterkennung (Szenario 5 und 6) am starren Teil erfolgen sollte, d.h. mit einem Absolut-Sensor.

Eine Detektion der unvollständigen Kreisschweißnaht jedoch den Einsatz von rotierenden Sensorsystemen fordert. Laut Angaben der Firma Rohmann GmbH wäre der Einsatz von rotierenden Sensorsystemen mit einem hohen Automatisierungsaufwand verbunden.

Bei sehr homogenen Nahtstrukturen muss diese Auswertung noch getestet werden.

Poren konnten ebenfalls nicht detektiert werden, da eine Signalbewertung zwischen dem Verhältnis von Störsignal Naht zu Nutzsignal Pore nicht möglich war. Durch die Erkenntnisse aus den Versuchen geht hervor, dass der Einsatz einer Wirbelstromprüfung für die Qualitätsüberwachung bei Samsung SDIBS nicht ideal ist, da nicht alle Unregelmäßigkeiten detektiert werden können.

### 4.2.2 Thermografie

Am Lehrstuhl für Automation der Montanuniversität Leoben wurden thermografische Messungen (Post-Prozess) an den in Kapitel 4.1 vorgestellten Proben durchgeführt. Dabei wurden alle Szenarien von der Montanuniversität Leoben untersucht. Es wurden sowohl blitzthermografische- als induktiv-thermografische Messungen durchgeführt.

#### Blitzthermografische Messung:

Als Prüfanordnung für die Versuche diente der Reflexionsaufbau (vergleiche Kapitel 3.3.1). Mit dieser Methode sollten üblicherweise Schichtdicken (Luftspalte) oder Fehler in der Tiefe, welche die Wärmeleitung verhindern, detektiert werden. Jeweils eine Referenz- und eine fehlerhafte Probe wurden mit einem kurzem Lichtblitz (6 kJ in ca. 1 ms Pulsdauer) beleuchtet. Die Oberfläche der Proben absorbiert das Licht und wandelt es in Wärme um. Mithilfe einer Infrarotkamera wurde der Verlauf der Oberflächentemperatur während der Abkühlung aufgenommen. Ausgewertet wurde die gesamte IR-Sequenz. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-12 dargestellt.

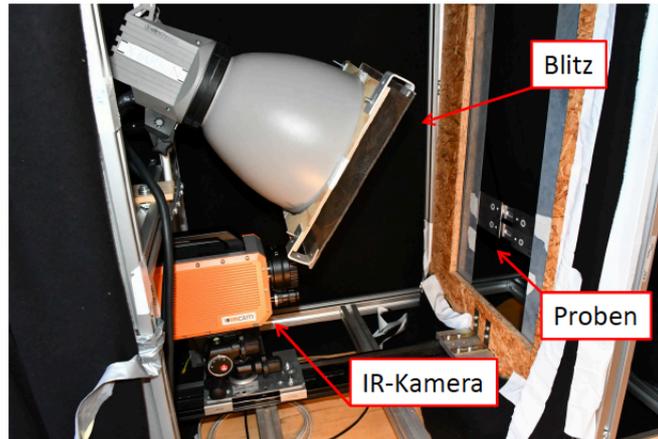


Abbildung 4-12: Versuchsaufbau; blitzthermografische Messung

Abbildung 4-13 zeigt beispielhaft das Temperaturbild einer Messung, welches 205 ms nach dem Blitzimpuls aufgenommen wurde. Hierbei handelt es sich um die Proben P23\_P24 (oben) sowie den Referenzproben P1\_P2 (unten). Es ist nicht wirklich ein Unterschied zwischen der fehlerhaften Probe (oben) und der Referenz-Probe (unten) zu sehen.

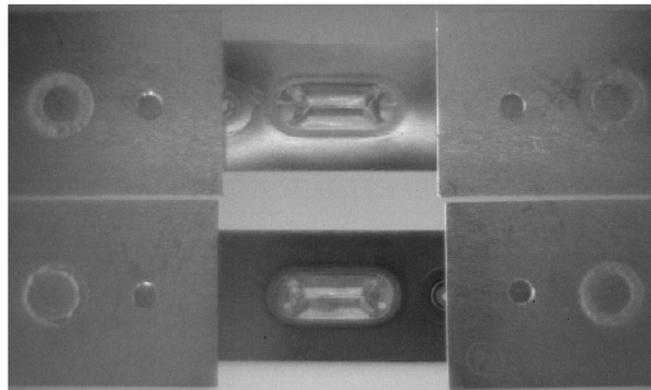


Abbildung 4-13: Temperaturbild einer Messung; 205 ms nach dem Blitzimpuls; Oben: P23\_P24; Unten: P1\_P2 (Referenz)

In Abbildung 4-14 wird beispielhaft eine Auswertung dargestellt. Dabei wird die Temperaturabkühlung doppel-logarithmisch dargestellt und die Ableitung davon berechnet. Es konnten keine Unterschiede zwischen den fehlerhaften Proben und den Referenzschweißungen detektiert werden.

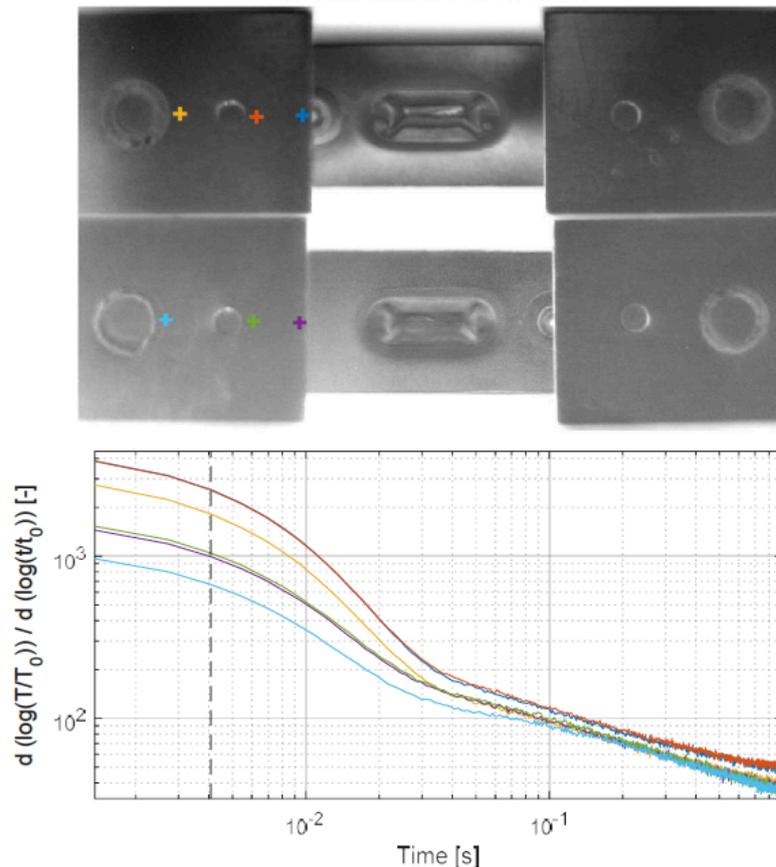


Abbildung 4-14: Auswertung: Oben Probe P23\_P24 (mit Spalt 0,5 mm); Unten Probe P1\_P2 (Referenz)

### Zusammenfassung und Erkenntnisse der blitzthermografischen Messung:

Mithilfe der blitzthermografischen Messung sollte es theoretisch möglich sein, einen Luftspalt zwischen Zellpol und Busbar (z.B. Probe P23\_P24) zu detektieren. Die Ergebnisse zeigen aber keinen relevanten Unterschied zwischen den fehlerhaften und fehlerfreien Proben. Als Ursachen können folgende Punkte genannt werden:

- Aluminium ist ein guter Wärmeleiter infolgedessen gleichen sich Temperaturunterschiede in die Tiefe und lateral zu schnell aus.
- Die Aluminiumplättchen fungieren als Kühlrippen. D.h. der Wärmefluss in Blechrichtung (lateral) dominiert gegenüber dem Wärmefluss in Tiefenrichtung.
- Es könnte auch an den fehlerfreien Proben bereits ein geringfügiger Spalt zwischen Zellpol und Busbar vorliegen, welcher den Wärmefluss ähnlich wie bei einem Luftspalt von 0,3 oder 0,5 mm beeinflusst.

Durch die Erkenntnisse aus den Versuchen geht hervor, dass der Einsatz einer blitzthermografischen Messung für die Echtzeitüberwachung bei Samsung SDIBS nicht ideal ist.

### Induktiv-thermografische Messungen:

Bei den induktiv-thermografischen Versuchen werden die Proben mit einem kurzen induktiven Puls – hervorgerufen durch eine Induktionsspule – erwärmt. Die Infrarotkamera nimmt die Temperatur während und nach dem Heizpuls auf. Um Inhomogenitäten sichtbar zu machen, wird die Temperaturänderung abhängig von der Zeit ausgewertet. Gleich wie bei den bereits zuvor beschriebenen blitzthermografischen Messungen sollten auch mit dieser Methode üblicherweise, Schichtdicken oder Fehler in

der Tiefe, die die Wärmeleitung verhindern detektiert werden. Der Versuchsaufbau wird in Abbildung 4-15 dargestellt.

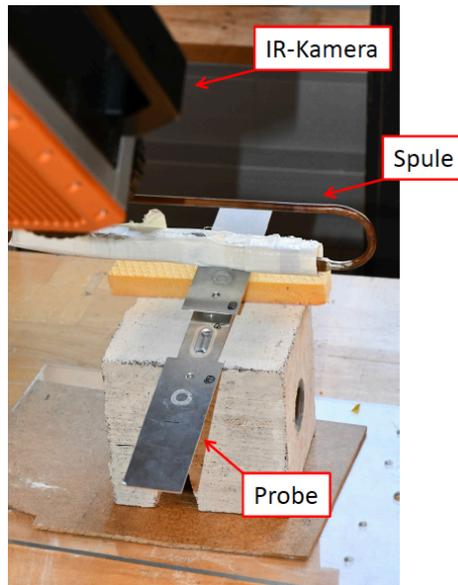


Abbildung 4-15: Versuchsaufbau; induktiv-thermografische Messung

Im Vergleich zur blitzthermografischen Messung wurden die Teile einzeln gemessen, wobei die Spule über die Kreisschweißnaht positioniert wurde, um in diesen Bereich die meiste Erwärmung zu erzielen (siehe Abbildung 4-16).

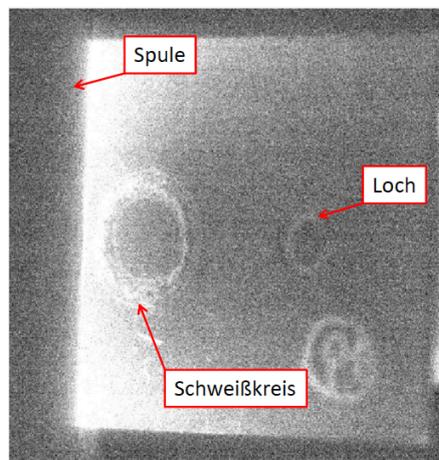


Abbildung 4-16: Temperaturbild der Probe P1

Die Infrarotkamera nimmt den Induktionspuls (1 s) sowie zusätzlich noch die Abkühlphase für 1 s auf, wodurch eine Temperaturkurve für 2 s entsteht (siehe Abbildung 4-17). Von dieser 2 s Temperaturkurve wurde für jeden Pixel einzeln durch Fourier Transformation ein Phasenbild berechnet.

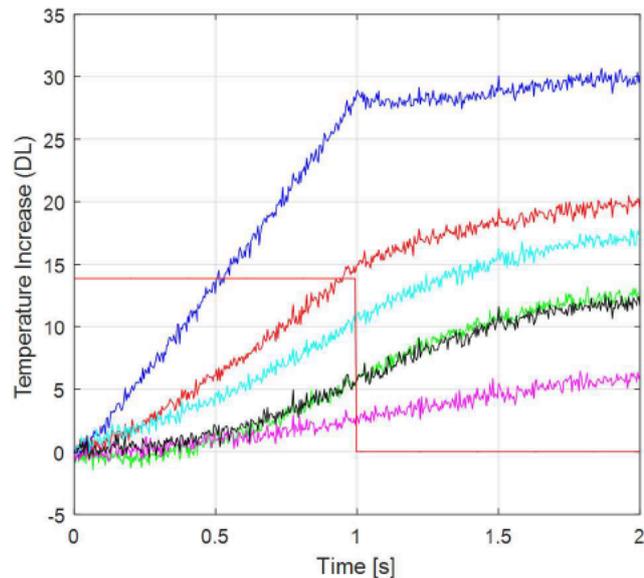
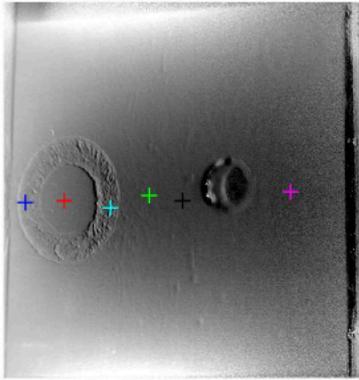


Abbildung 4-17: Auswertung: Probe P1

### Zusammenfassung und Erkenntnisse der induktiv-thermografischen Messung:

Die Ergebnisse zeigen auch bei der induktiv-thermografischen Messung keine relevanten Unterschiede zwischen den fehlerhaften und fehlerfreien Teilen. Als Ursachen können auch hier die gleichen Punkte wie bei der blitzthermografischen Messung genannt werden. Durch die Erkenntnisse aus den Versuchen geht hervor, dass der Einsatz einer induktiv-thermografischen Messung für die Echtzeitüberwachung bei Samsung SDIBS nicht ideal ist.

#### 4.2.3 Interferometrie – LDD-700 Sensor

In Zusammenarbeit mit IPG Laser GmbH, wurden innerhalb eines Labortages Schweißversuche mit dem von IPG entwickelten LDD-700 Sensor durchgeführt bzw. auf Fehler überwacht. Das Messprinzip des LDD-700 beruht auf der Überlagerung von Lichtwellen. Das Grundprinzip hinter der Prozessüberwachung mittels Interferometrie ist in Kapitel 3.2.2 erläutert. Ziel dieser Untersuchung ist es, online den Laserschweißprozess mithilfe des LDD-700 Sensors zu überwachen. Als zu fügende Materialien dienen die in Kapitel 2.3.4 vorgestellten Busbar- und Zellpolwerkstoffe. Es wurden absichtlich verschiedene produktionsbedingte Unregelmäßigkeiten (siehe Kapitel 2.3.6) simuliert, die während der Batteriefertigung festgestellt wurden. Die simulierten Fehlerszenarien inklusive der zugehörigen Probennummer sind in Tabelle 4-2 zur besseren Übersicht aufgelistet.

Tabelle 4-2: Überprüfte Fehlerszenarien; LDD-700

Probennummer	Fehlerszenario
1	Erste Testschweißung/Referenzschweißung
2	Zweite Testschweißung/Referenzschweißung
3	Leistung um 25 % verringert
4	Unvollständige Kreisnaht
5	Spalt von 0,4 mm zwischen Busbar und Zellpol
6	Spalt von 0,4 mm zwischen Busbar und Zellpol
7	Kleber auf Zellpol aufgebracht (vollflächig)
8	Kleber auf Zellpol aufgebracht (halbe Zellpolfläche)
9	Kleber auf Zellpol aufgebracht (Stecknadelgröße)
10	Verschmutzung am Busbar (Fahrradschmieröl)
11	Verschmutzung am Busbar (WD 40)
12	Leistung für 100 ms für 25 % erhöht
13	Leistung für 100 ms für 50 % erhöht
14	Leistung dauerhaft um 50 % erhöht

Geschweißt wird mit einem YLS-5000 Faserlaser. Der verwendete Schweißkopf ist ein D50 Wobble Head mit einer Kollimationslänge von 150 mm und einer Fokuslänge von 300 mm. Für die Vermessung der Nahttiefe und Nahtoberfläche wird der LDD-700 Sensor am Schweißkopf integriert. Die Daten für das optische Setup werden in Tabelle 4-3 angeführt.

Tabelle 4-3: Optisches Setup

Wellenlänge	1070 nm
Faserdurchmesser	50 $\mu$ m
Fokusdurchmesser	100 $\mu$ m

Die verwendeten Schweißparameter sind aus Tabelle 4-4 zu entnehmen. Hier muss noch angemerkt werden, dass sich einige Werte (z.B. Kreisdurchmesser) im Gegensatz zu den in Kapitel 2.3.3 definierten Schweißparametern unterscheiden. Der Grund dafür ist, dass neben der Batteriefertigung bei Samsung SDIBS im Hintergrund ständig an einer Verbesserung der Schweißparameter geforscht wird, um die in Kapitel 2.3.7.1 definierten Zielgrößen bestmöglich zu gewährleisten.

Tabelle 4-4: Schweißparameter

Parameter	Wert
Strahlleistung P	2 kW
Schweißgeschwindigkeit	80 mm/s
Leistungsrampen Start	40 %
Leistungsrampen Ende	0 %
Slop-In	0,7 mm
Slop-Out	0,8 mm
Fokuslage	z = -1 mm
Amplitude Wobbling	0,25 mm
Frequenz Wobbling	350 Hz
Schutzgas	keines
Schweißnahtform	Kreis, Durchmesser = 10,5 mm

Der Versuchsaufbau im Labor von IPG Laser GmbH für die Online-Prozessüberwachung der Nahttiefe sowie der Nahtoberfläche wird in Abbildung 4-18 dargestellt.

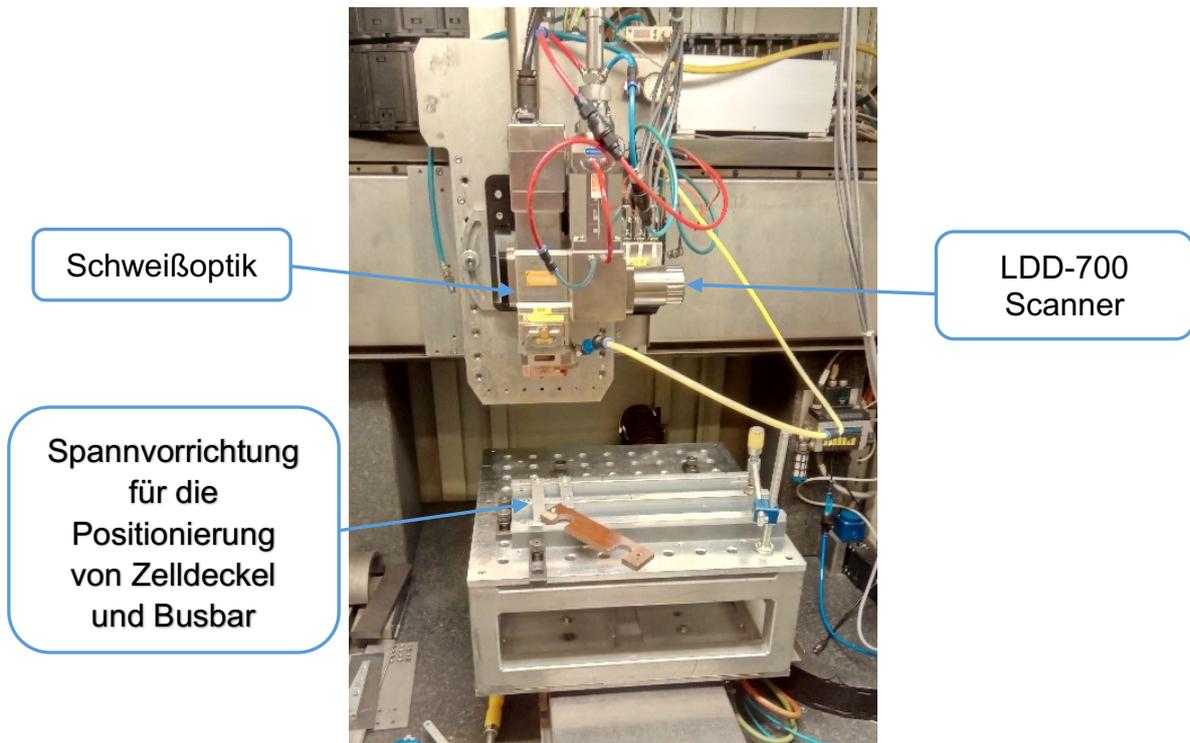


Abbildung 4-18: Versuchsaufbau bei IPG Laser GmbH

Eine Integration des LDD-700 Inline-Schweißprozessmonitors z.B. in die für den Prototypenbau im Einsatz befindliche Laserschweißkabine bei Samsung SDIBS wird in Abbildung 4-19 dargestellt.

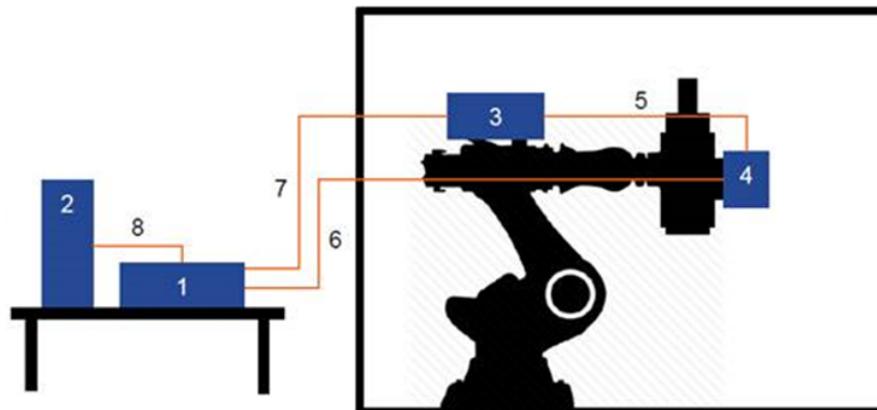


Abbildung 4-19: Hauptkomponenten des LDD-700 Inline-Schweißprozessmonitors

Das Prozessüberwachungssystem besteht aus folgenden Hauptkomponenten:

1. Steuereinheit + Lichtquelle + Sensor
2. Personal Computer
3. Strahlteiler + Referenzarm
4. Scanner (an der Schweißoptik befestigt)
5. Faser des Messarms
6. Kabel zur Scanneransteuerung

7. Zwei Fasern (eine von der Lichtquelle zum Strahlteiler und die andere vom Strahlteiler zum Sensor)
8. Diverse Verbindungskabel von der Steuereinheit zum PC

Der LDD-700 Scanner ist derzeit nur mit der passenden Schweißoptik von IPG kompatibel.

Die LDD-700 Steuereinheit (siehe Abbildung 4-20) wird meist direkt beim Bedienerarbeitsplatz für die Laseranlage positioniert. Ihre Abmessungen betragen 413 × 586 × 184 mm, was in etwa einem Standcomputer entspricht.



Abbildung 4-20: LDD-700 Steuereinheit [63]

Die während der Schweißversuche aufgenommenen Signale werden von der IPG OmniWELD Scanning-Software in Echtzeit ausgewertet. Gepaart mit dem LDD-700 bietet diese Software fünf gleichzeitig ablaufende Überwachungsmodi, welche in Abbildung 4-21 dargestellt sind.

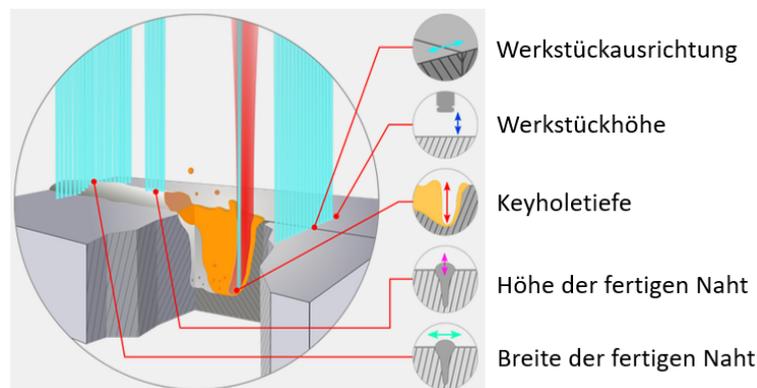


Abbildung 4-21: mögliche Überwachungsmodi des LDD-700 [63]

Die Benutzeroberfläche der OmniWELD Scanning-Software wird in Abbildung 4-22 dargestellt. Es werden zeitgleich die Ergebnisse der Keyhole- und Oberflächenmessungen zur aktuellen Laserschweißung ausgegeben. Die oberste Grafik stellt den Verlauf der Keyholetiefe (grün) sowie den Verlauf der Schweißnahtoberfläche/-höhe (blau) in Abhängigkeit zur Schweißnahtlänge dar. Von der mittleren Grafik lässt sich der Verlauf der Schweißnahtbreite über die Schweißnahtlänge ablesen. Letztere Grafik veranschaulicht den Verlauf der Werkstückoberfläche (neben der Fügestelle) über die Schweißnahtlänge (grün), damit kann z.B. kontrolliert werden ob die zu fügenden Bauteile horizontal ausgerichtet sind.

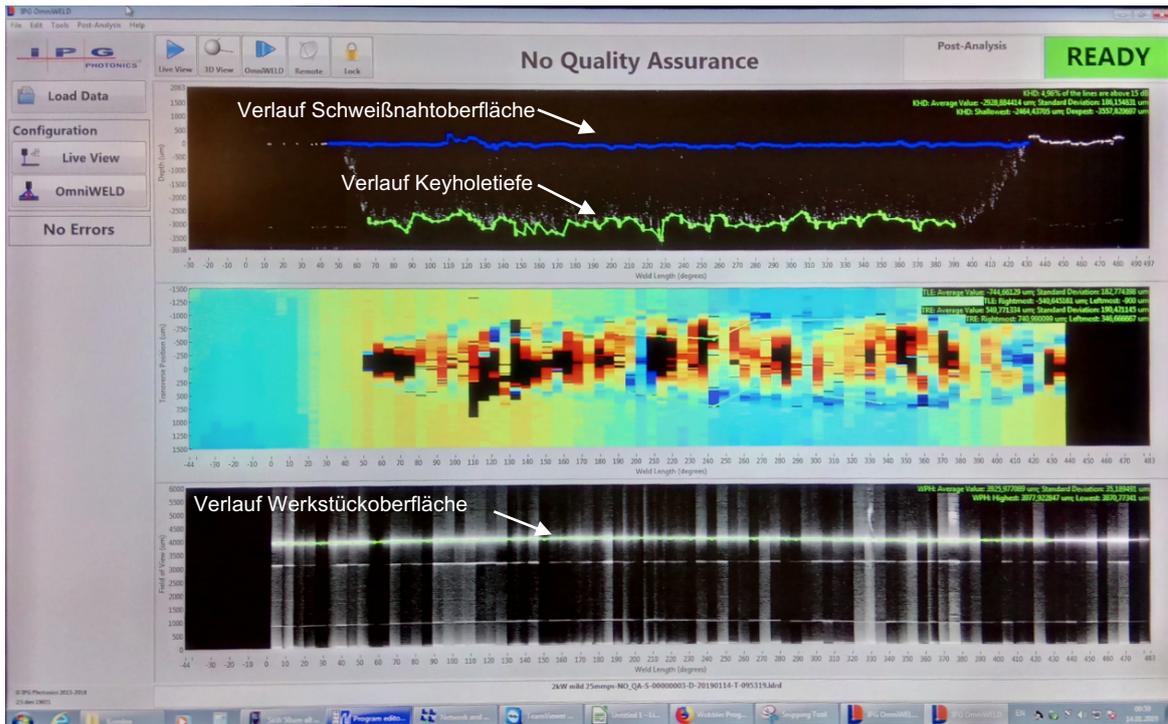


Abbildung 4-22: Benutzeroberfläche der OmniWELD Scanning-Software

Ähnlich wie bei der in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Signalauswertung mittels Hüllkurven, können mit der OmniWELD Scanning-Software Grenzwerte definiert werden. Über- oder unterschreitet man diese Werte für eine vorher genau definierte Länge bzw. Zeit, so wird dies als NIO gewertet. Dies ermöglicht eine automatisierte Prozessüberwachung. Voraussetzung sind jedoch genügend Referenzschweißungen, um eine sinnvolle automatisierte Beurteilung in NIO oder IO zu gewährleisten. Innerhalb dieser Masterarbeit wurde aber pro Fehlerszenario aus zeitlichen Gründen nur eine Schweißung durchgeführt, deshalb mussten die Kurven manuell ausgewertet werden.

Die Ergebnisse der Keyhole- und Oberflächenmessungen sind auf den nachfolgenden Bildern zu sehen. Bei den Versuchen von Probe 1 bis Probe 14 wurde nicht gewobbelt, da jedes Fehlerszenario nur einmalig geschweißt wurde und eine Keyholemessung mit Wobbeln höhere Stückzahlen (Referenzschweißungen) und viel Erfahrung des Bedieners erfordert.

### Probe 1 und Probe 2 - Referenzschweißungen:

Mit der Probe 1 und 2 wurde das System, sowie die eingestellten Schweißparameter überprüft bevor mit den Fehlerszenarien begonnen wurde. Weiteres dienen die Ergebnisse dieser Schweißungen als Referenzwerte für die weiteren Schweißungen. Eine Draufsicht auf die Schweißnaht der Probe 1 wird in Abbildung 4-23 gezeigt. Die resultierenden Messkurven zu dieser Schweißung sind aus Abbildung 4-24 zu entnehmen. Die Ergebnisse von Probe 2 sind weitgehend ident und sind deshalb nicht angeführt. Nach dem erfolgreichen Abgleich der beiden Referenzschweißungen wurde mit den Fehlerszenarien begonnen.

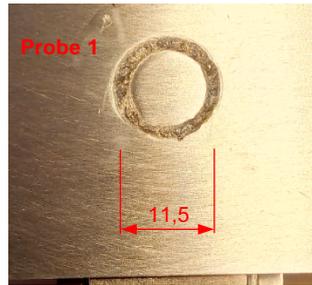


Abbildung 4-23: Probe 1; Draufsicht auf Schweißnaht

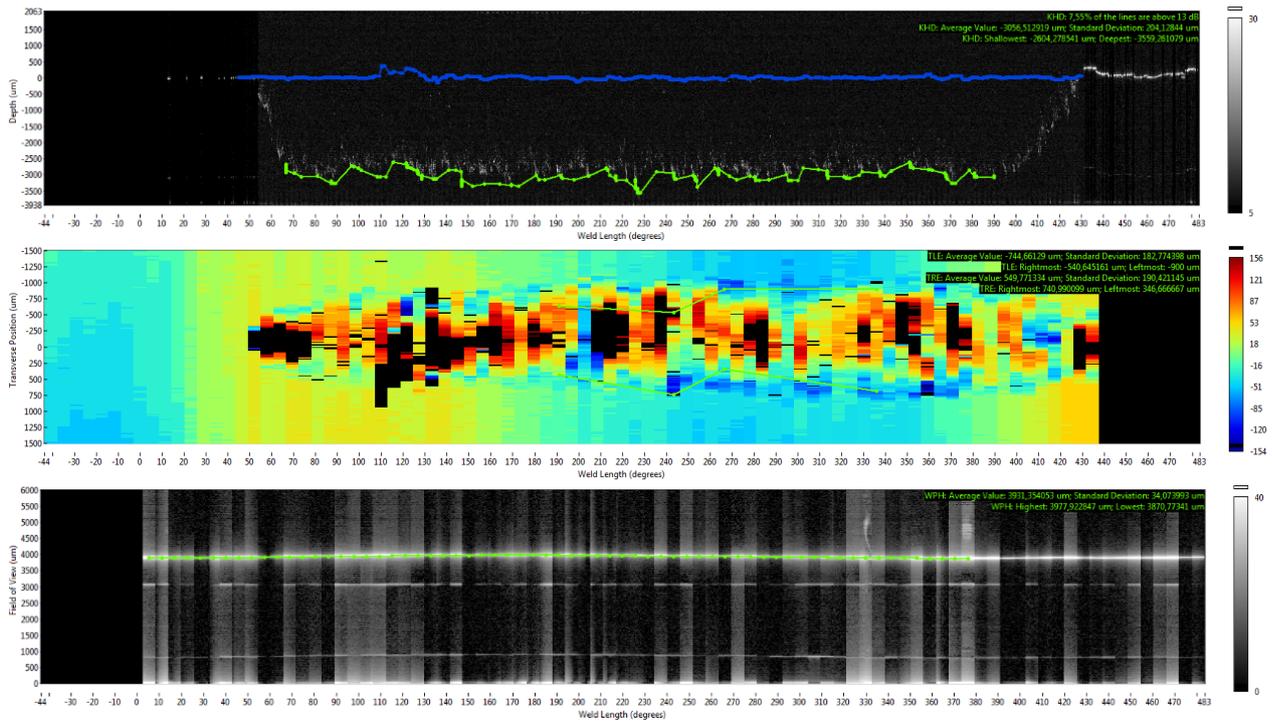


Abbildung 4-24: Probe 1; Keyholemessung (oben); Messung der Schweißnahtbreite (mittig); Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (unten)

Tabelle 4-5: Probe 1; Einschweißtiefe und Höhe der Busbaroberfläche Referenzwerte für die folgenden Schweißversuche

Referenzwerte (bezogen auf die Probe 1)	
Einschweißtiefe (Durchschnittswert)	-3056,51 µm
Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)	3931,35 µm

**Probe 3 – Leistung um 25 % verringert:**

In Kapitel 3.2.1 ist erklärt, dass die reflektierte Laserleistung als Indikator für die Online-Prozessüberwachung herangezogen wird. Der dort erläuterte Ansatz, dass die Laserleistung Einfluss auf die Einschweißtiefe hat, wurde durch diesen Schweißversuch sehr deutlich bestätigt. Abbildung 4-26 zeigt, dass sich durch eine Leistungsverringerng die Einschweißtiefe (grüne Kurve) deutlich verringert. Ein Vergleich der Einschweißtiefe von Probe 3 mit der Referenzschweißung ist in Tabelle 4-6 dargestellt. Es wurde auch eine Verringerung der Schweißnahtbreite (siehe Abbildung 4-25) festgestellt.

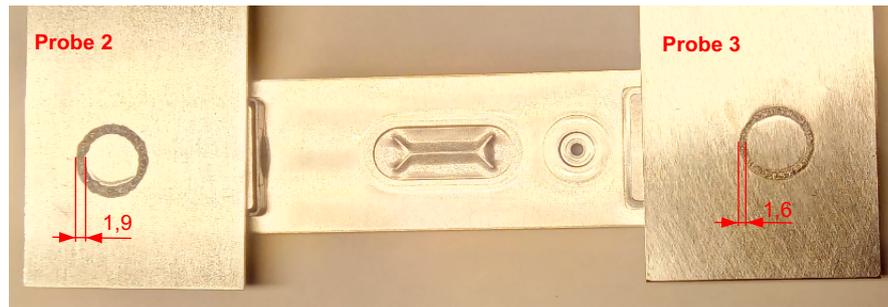


Abbildung 4-25: Probe 2 (links); Probe 3 (rechts);

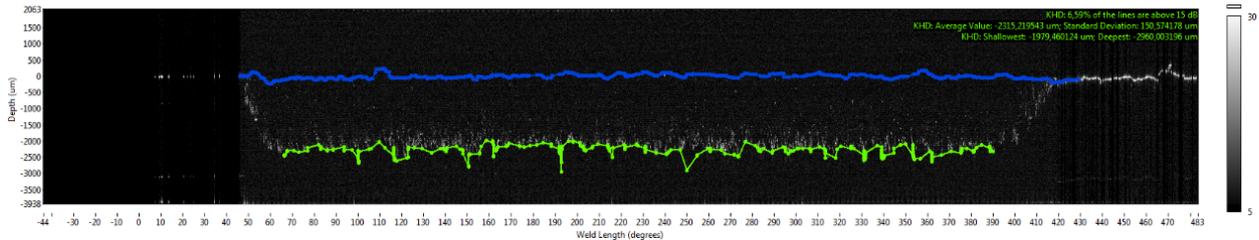


Abbildung 4-26: Probe 3; Keyholemessung

Tabelle 4-6: Probe 3; Einschweißtiefe; Vergleich mit der Referenzschweißung

Vergleich Probe 3 mit Probe 1 (Referenzschweißung)			
Probe 3:	Einschweißtiefe		-2315,22 µm
(Durchschnittswert)			
Referenzschweißung:	Einschweißtiefe		-3056,51 µm
(Durchschnittswert)			

**Probe 4 – unvollständige Kreisnaht:**

Sollte es fertigungsbedingt zu einer unvollständig ausgeführten Schweißnaht (siehe Abbildung 4-27) kommen, so wird dies vom LDD-700 detektiert. Veranschaulicht wird dies durch den Vergleich der Schweißnahtlänge von Probe 4 (Abbildung 4-28) mit der Schweißnahtlänge der Referenzschweißung (Abbildung 4-29). Der rote Kurvenverlauf der Keyholemessung deutet auf eine zu kurze Schweißnaht hin.

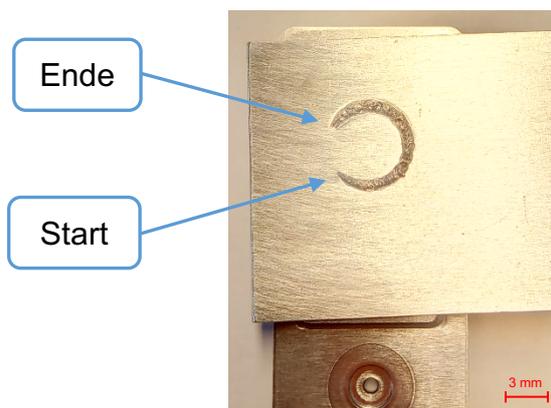


Abbildung 4-27: Schweißlänge verkürzt

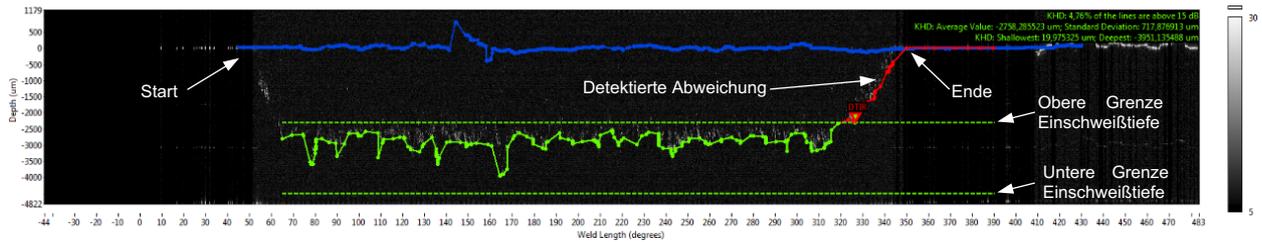


Abbildung 4-28: Probe 4; Keyholemessung

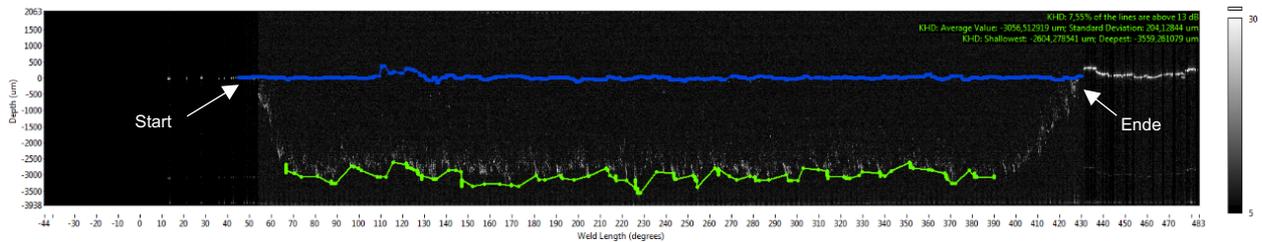


Abbildung 4-29: Probe 1; Keyholemessung - Referenzschweißung

**Probe 5 – Spalt von 0,4 mm zwischen Busbar und Zellpol:**

Durch Einbringung eines Spaltes von 0,4 mm zwischen Zellpol und Busbar wurde ein deutlicher Schweißnahteneinfall festgestellt (siehe Abbildung 4-30). Die Erhöhung des Busbares wurde durch die Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht wahrgenommen (siehe Abbildung 4-31). Angemerkt sollte werden, dass der inszenierte Spaltzahlenwert von 0,4 mm zwischen Busbar und Zellpol nicht genau eingehalten werden konnte. Grund dafür ist zum einen, dass die eingelegten Bleche nicht im Bereich der Schweißnaht liegen durften und zum anderen die Bleche mit der Blechscherer geschnitten wurden und es dadurch zu Verzug an der Schnittkanten gekommen ist.

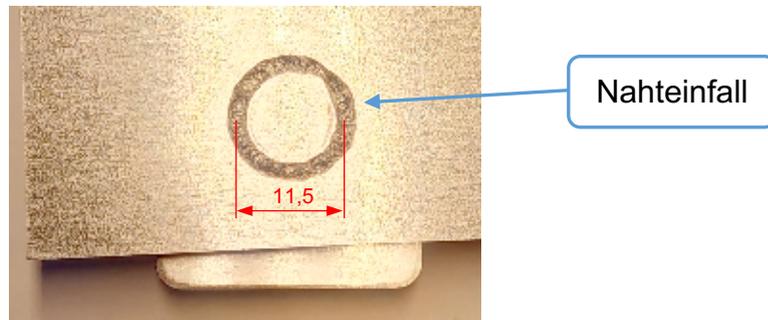


Abbildung 4-30: Probe 5; Spalt von 0,4 mm, Nahteneinfall

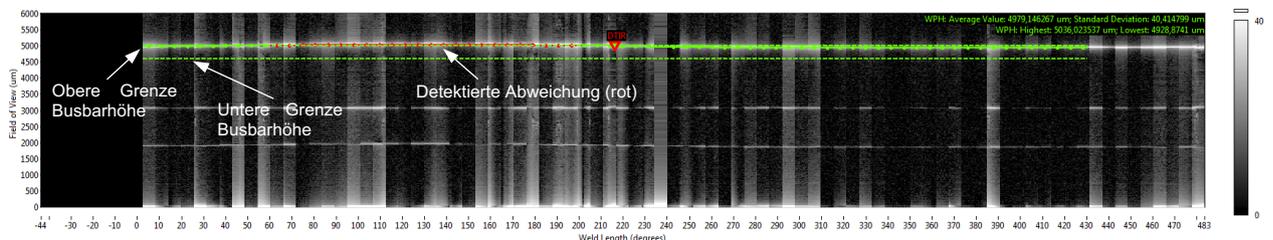


Abbildung 4-31: Probe 5; Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (Höhe der Busbaroberfläche)

Tabelle 4-7: Probe 5; Höhe der Busbaroberfläche; Vergleich mit der Referenzschweißung

<b>Vergleich Probe 5 mit Probe 1 (Referenzschweißung)</b>	
Probe 5: Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)	4979,15 µm

Referenzschweißung: Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)	3931,35 µm
---	------------

**Probe 6 - Spalt von 0,4 mm zwischen Busbar und Zellpol:**

Da ein Spalt zwischen Busbar und Zellpol produktionsbedingt häufig vorkommt, wurde dieses Szenario noch ein weiteres Mal überprüft. Die Höhe der Busbaroberfläche liegt hier deutlich über der oberen Grenze (grün gestrichelte Linie).

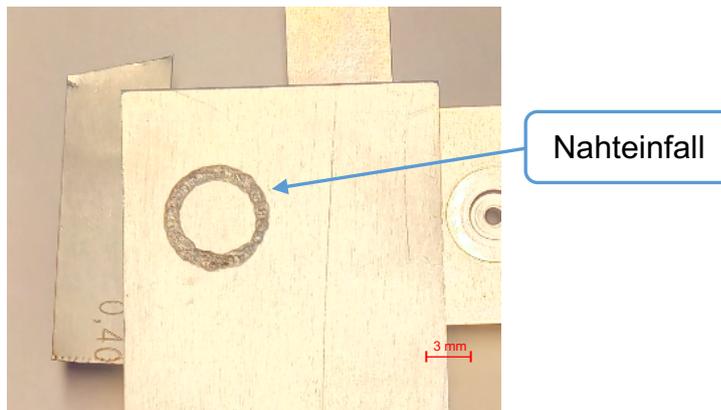


Abbildung 4-32: Probe 6; Spalt von 0,4 mm, Nahtfall

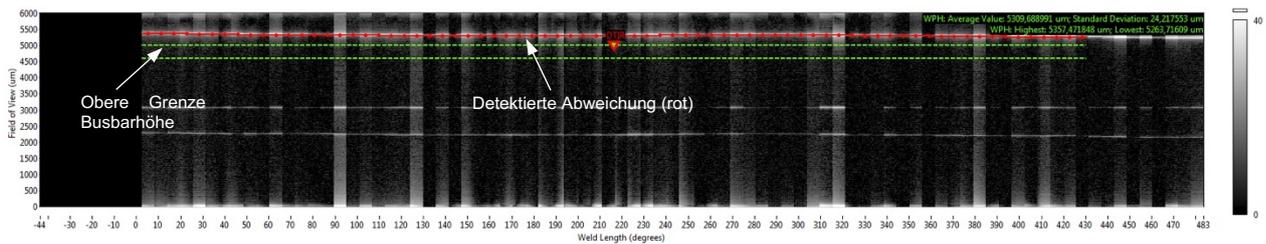


Abbildung 4-33: Probe 6; Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (Höhe der Busbaroberfläche)

Tabelle 4-8: Probe 6; Höhe der Busbaroberfläche; Vergleich mit der Referenzschweißung

<b>Vergleich Probe 6 mit Probe 1 (Referenzschweißung)</b>	
Probe 6: Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)	5309,69 µm
Referenzschweißung: Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)	3931,35 µm

### Probe 7 - Kleber auf Zellpol aufgebracht (vollflächig):

Eine weitere Fehlerursache in der Batteriefertigung sind Klebereste (Sikaflex-953) auf dem Zellpol. Innerhalb dieses Versuches wurde der Kleber vollflächig auf den Zellpol aufgebracht (siehe Abbildung 4-34). Die Folge war eine total poröse Schweißnaht. Die Oberflächenporen sind in Abbildung 4-35 deutlich sichtbar. Nach der Laserschweißung konnten die beiden Fügepartner durch leichte Kraftaufbringung von Hand wieder getrennt werden (siehe Abbildung 4-36).

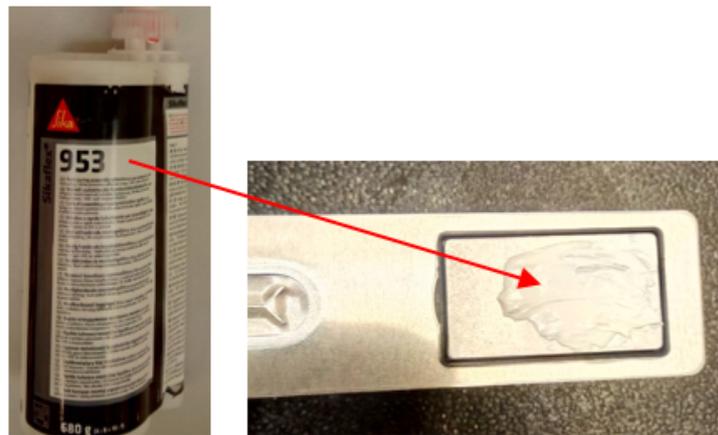


Abbildung 4-34: Probe 7; Vollflächig aufgebracht Kleber



Abbildung 4-35: Probe 7; Poröse Schweißnaht infolge des Klebers



Abbildung 4-36: Probe 7; Unverschweißte Fügepartner

In der Keyholemessung sowie in der Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht traten deutliche Abweichungen auf (siehe Abbildung 4-37 und Abbildung 4-38 sowie Tabelle 4-9 und Tabelle 4-10). Aus Abbildung 4-37 ist zudem ersichtlich, dass infolge der Oberflächenporen das Signal der Schweißnahtoberfläche/-höhe (blau) in Abhängigkeit zur Schweißnahtlänge Unterbrechungen aufweist. Die Tiefe des Keyholes (grüne Linie) weist ebenfalls starke Schwankungen.

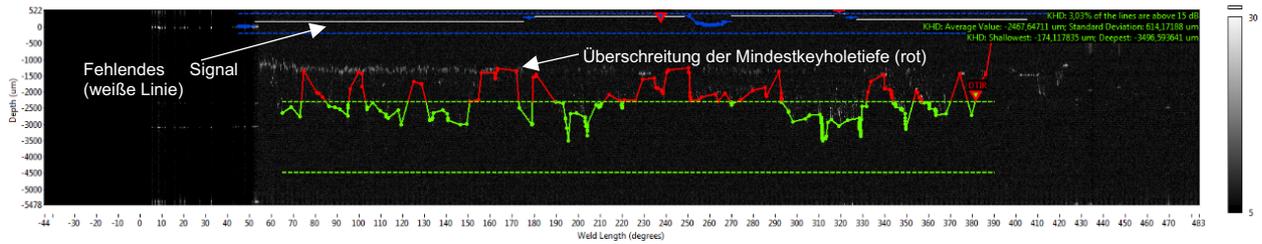


Abbildung 4-37: Probe 7; Keyholemessung

Tabelle 4-9: Probe 7; Einschweißtiefe; Vergleich mit der Referenzschweißung

Vergleich Probe 7 mit Probe 1 (Referenzschweißung)		
Probe 7: (Durchschnittswert)	Einschweißtiefe	-2467,65µm
Referenzschweißung: (Durchschnittswert)	Einschweißtiefe	-3056,51 µm

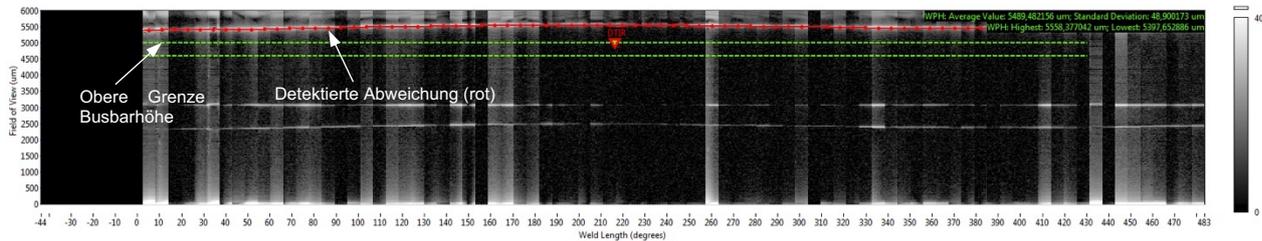


Abbildung 4-38: Probe 7; Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (Höhe der Busbaroberfläche)

Tabelle 4-10 :Probe 7; Höhe der Busbaroberfläche, Vergleich mit der Referenzschweißung

Vergleich Probe 7 mit Probe 1 (Referenzschweißung)		
Probe 7: Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)		5489,48,69 µm
Referenzschweißung: Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)		3931,35 µm

**Probe 8 – Kleber auf Zellpol aufgebracht (halbe Zellpolfläche):**

Die Schweißung der Probe 8 wurde unter den gleichen Voraussetzungen wie bei Probe 7 durchgeführt. Es wurde jedoch nicht die ganze Zellpolfläche mit Kleber verunreinigt, sondern nur die Hälfte. Auch hier konnten wieder deutliche Abweichungen der Keyholemessung sowie der Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht detektiert werden. Die Ergebnisse sind in den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen aufgezeigt.

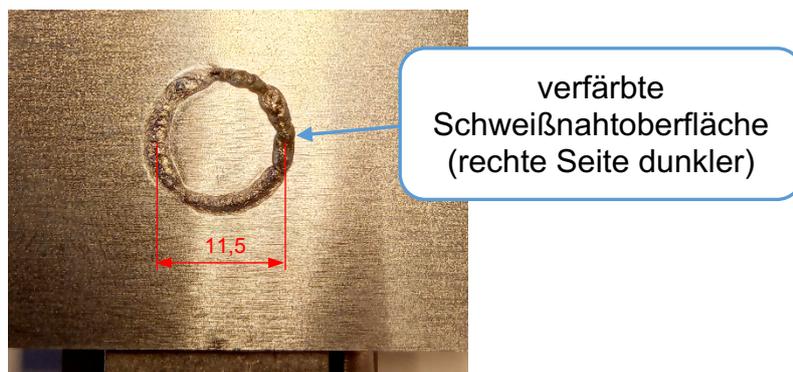


Abbildung 4-39: Probe 8; Kleber auf halbe Zellpolfläche aufgebracht

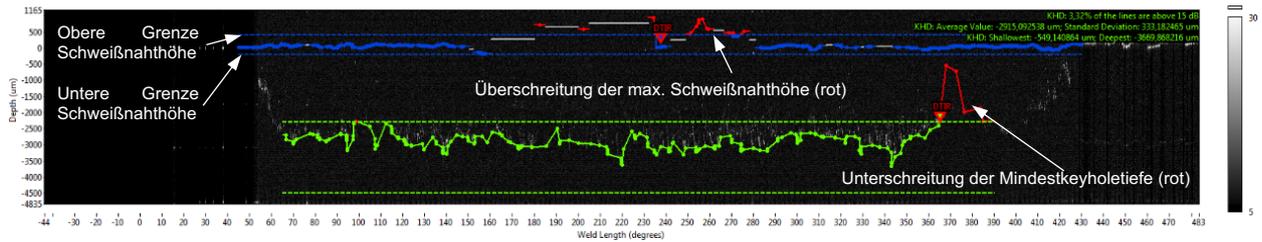


Abbildung 4-40: Probe 8; Keyholemessung

Tabelle 4-11: Probe 8; Einschweißtiefe, Vergleich mit der Referenzschweißung

Vergleich Probe 8 mit Probe 1 (Referenzschweißung)	
Probe 8: (Durchschnittswert)	Einschweißtiefe -2915,09 µm
Referenzschweißung: (Durchschnittswert)	Einschweißtiefe -3056,51 µm

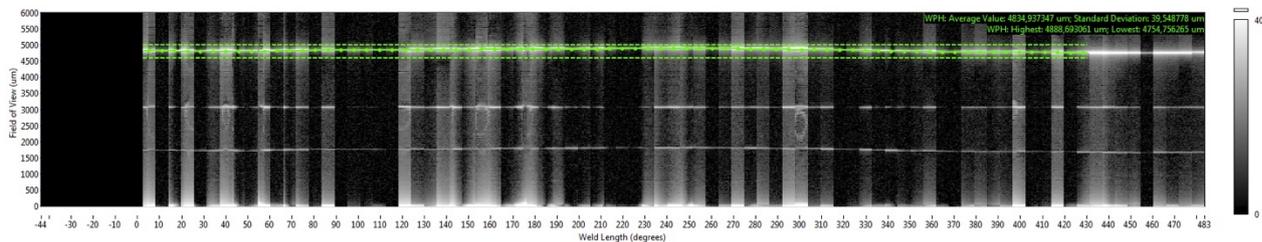


Abbildung 4-41: Probe 8; Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (Höhe der Busbaroberfläche)

Tabelle 4-12: Probe 8; Höhe der Busbaroberfläche, Vergleich mit der Referenzschweißung

Vergleich Probe 8 mit Probe 1 (Referenzschweißung)	
Probe 8: Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)	4834,94 µm
Referenzschweißung: Höhe der Busbaroberfläche (Durchschnittswert)	3931,35 µm

**Probe 9 – Kleber auf Zellpol aufgebracht (Stecknadelgröße):**

Bei diesem Versuch wurde der Kleber vermutlich außerhalb der Schweißnaht positioniert (siehe Abbildung 4-42), da die Keyhole- und Oberflächenmessungen keine Unauffälligkeiten aufwiesen. Der Einfluss des Klebers wurde durch die Proben 7 bis 8 verdeutlicht, weshalb dieser Versuch nicht wiederholt wurde.

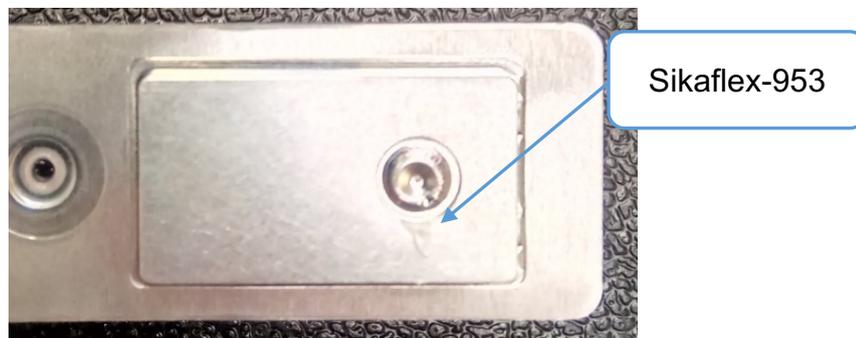


Abbildung 4-42: Probe 8; Kleber am Zellpol (Stecknadelgröße)

### Probe 10 – Verschmutzung am Busbar (Fahrradschmieröl):

Um eine Verunreinigung der Busbaroberfläche zu simulieren, wurde die Busbaroberfläche mit Fahrradschmieröl verschmutzt. Die Schweißnahtoberfläche wies dunkle Verfärbungen auf, jedoch wurden durch die Keyhole- und Oberflächenmessungen keine Auffälligkeiten detektiert.



Abbildung 4-43: Probe 10; Verunreinigung der Busbaroberfläche durch Fahrradöl

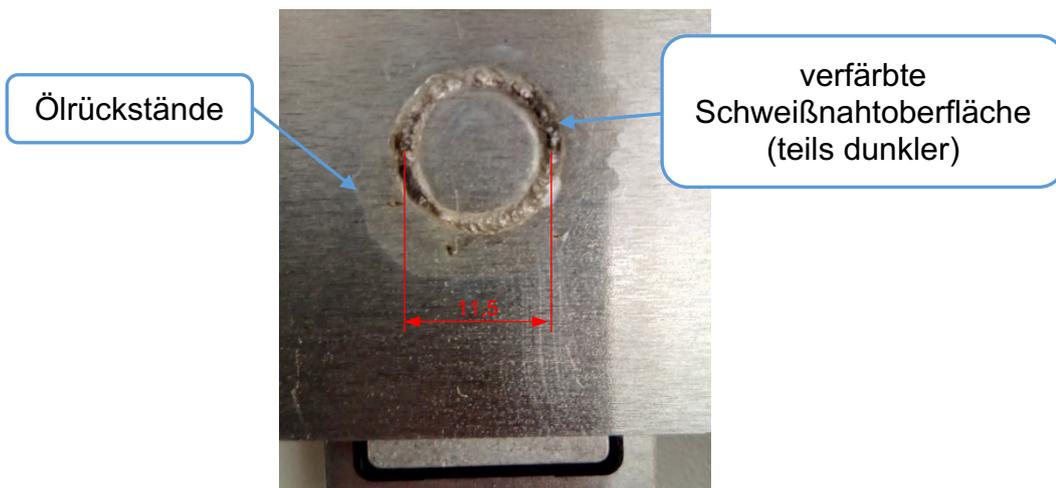


Abbildung 4-44: Probe 10; Nahtverfärbung

### Probe 11 – Verschmutzung am Busbar (WD 40):

Ähnlich wie bei Probe 10 wurde auch bei der Laserstrahlschweißung der Probe 11 Öl auf die Busbaroberfläche aufgebracht. Diesmal jedoch WD 40. Im Gegensatz zu den Keyhole- und Oberflächenmessungen bei Probe 10 konnte die Verschmutzung durch WD 40 nachgewiesen werden. Eine Nahtverfärbung wurde gleich wie bei Probe 11 festgestellt (siehe Abbildung 4-46). Es kam wie in Abbildung 4-47 ersichtlich, teilweise zu Signalunterbrechungen (blaue Linie). Auch die Keyholetiefe sowie die Schweißnahthöhe zeigt deutliche Schwankungen.



Abbildung 4-45: Probe 11; Verunreinigung der Busbaroberfläche durch Fahrradöl

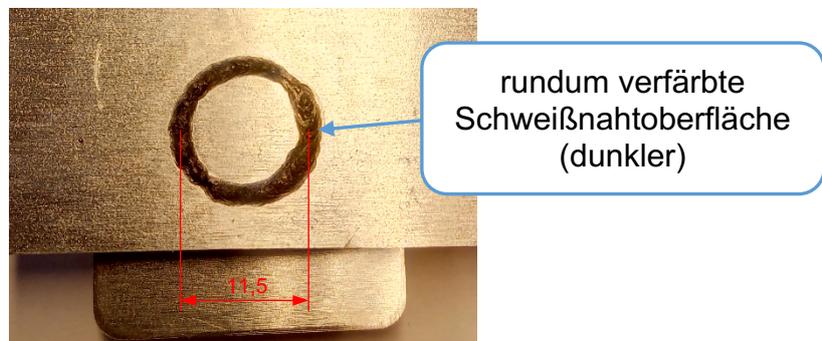


Abbildung 4-46: Probe 11; Nahtverfärbung

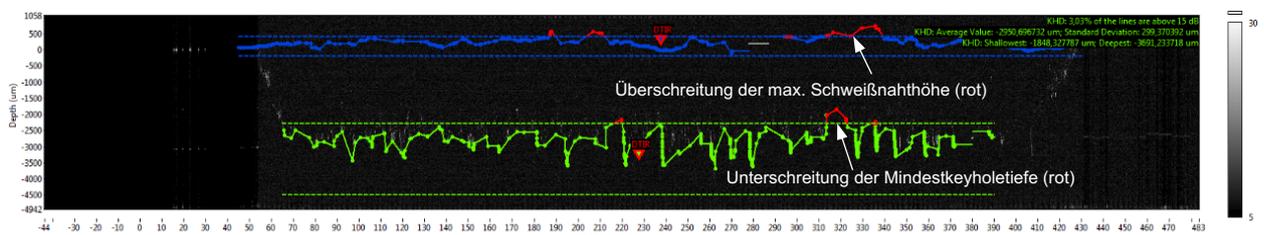


Abbildung 4-47: Probe 11; Keyholemessung

**Probe 12 – Leistung für 100 ms um 25 % erhöht:**

Eine Leistungserhöhung von 25 % für 100 ms zeigte keine Unregelmäßigkeiten auf der Nahtoberfläche (siehe Abbildung 4-48) sowie gravierenden Schwankungen in den Kurvenverläufen (siehe Abbildung 4-49).

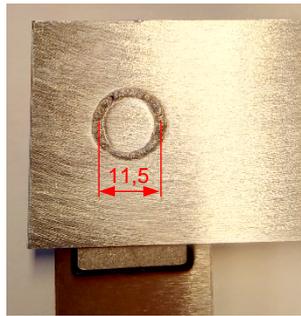


Abbildung 4-48: Probe 12; keine sichtbaren Nahtauffälligkeiten

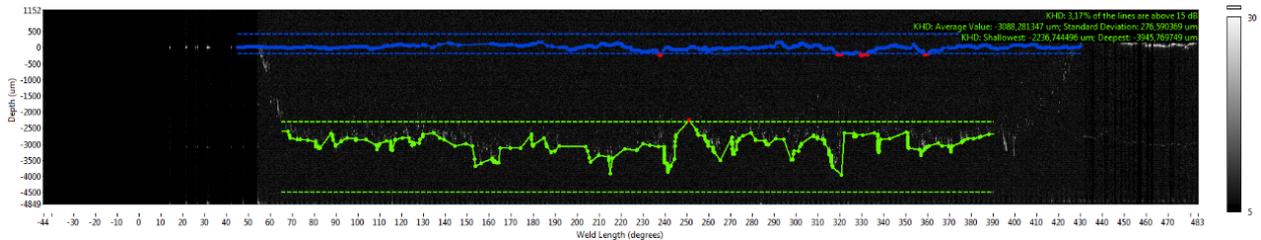


Abbildung 4-49: Probe 12; Keyholemessung

**Probe 13 – Leistung für 100 ms um 50 % erhöht:**

Eine Erhöhung der Leistung um 50 % konnte sowohl bei der Sichtüberprüfung der Schweißnaht (siehe Abbildung 4-50) festgestellt werden als auch in der Keyholevermessung (Abbildung 4-51).

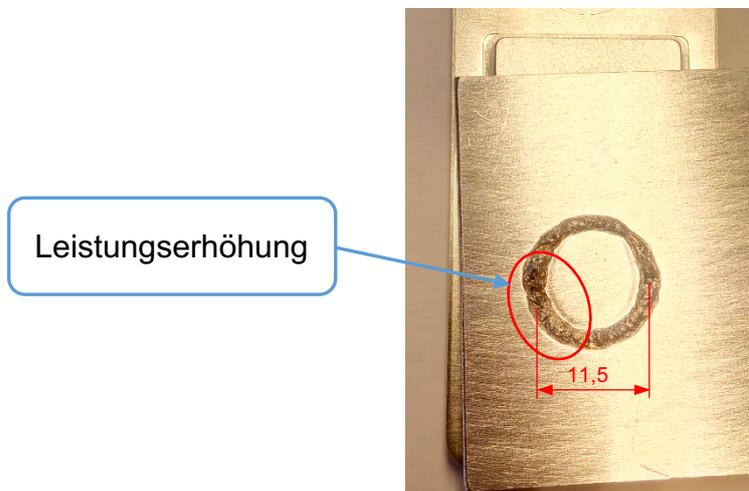


Abbildung 4-50: Probe 13; Sichtbarer Bereich der Leistungserhöhung

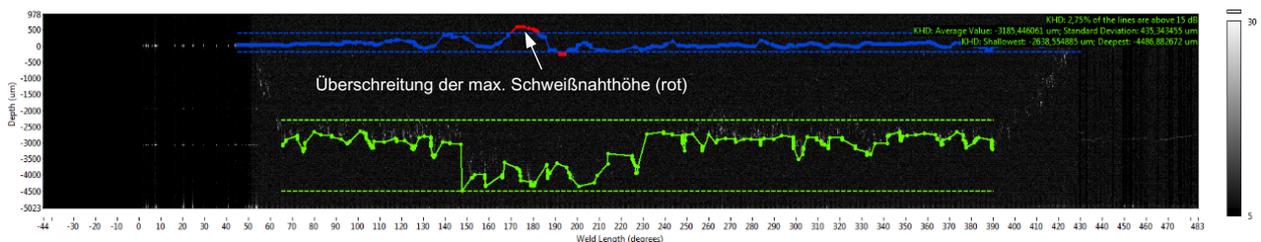


Abbildung 4-51: Probe 13; Keyholemessung

### Probe 14 – Leistung durchgehend auf 3 kW erhöht:

Eine dauerhafte Leistungserhöhung um 50 % führte zu Schmelzbadauswürfen (siehe Abbildung 4-52). Aufgrund der Schmelzbadauswürfen wurde auch das Schutzglas der Optik zerstört, wie man in Abbildung 4-53 deutlich erkennen kann. Die Auswertung der Keyholemessung wird in Abbildung 4-54 dargestellt. Hier ist der schwankende Verlauf der Schweißnahtoberfläche (blau) deutlich sichtbar. Teilweise wurde auch kein Signal erfasst, was auf die großen Oberflächenlöcher hinweist.



Abbildung 4-52: Probe 14; Oberflächenporen

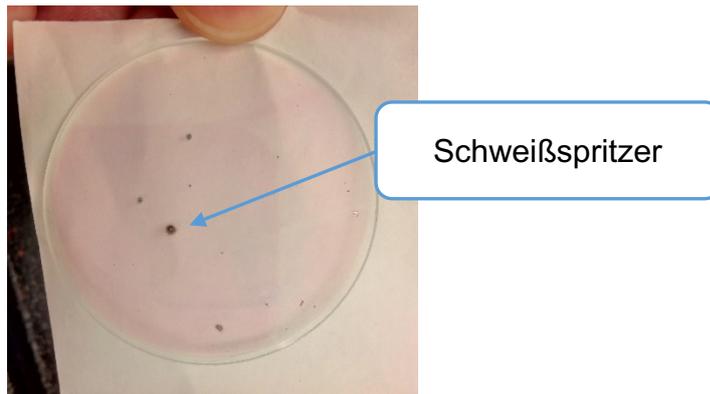


Abbildung 4-53: Probe 14; Verschmutztes Schutzglas

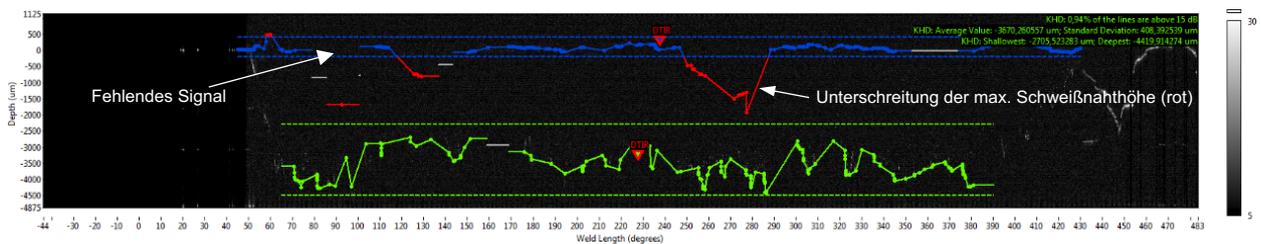


Abbildung 4-54: Probe 14; Keyholemessung

### Zusammenfassung und Erkenntnisse:

Die von der Firma IPG entwickelte Überwachungstechnologie hat alle Fehlerszenarien erfolgreich detektiert, bis auf die kurzzeitige Leistungserhöhung von 25 % für 100 ms (Probe 12). Durch die Erkenntnisse der Schweißversuche kann der LDD-700 Sensor für die Echtzeitüberwachung bei Samsung SDI eingesetzt werden.

#### 4.2.4 Interferometrie – OCT (Optische Kohärenztomografie)

Die OCT-Überwachungstechnologie von Lessmüller Lasertechnik basiert gleich wie der LDD-700 Sensor (siehe Kapitel 4.2.3) auf den Grundlagen der Interferometrie und ist in Kapitel 3.2.2 erläutert. Mithilfe der in Kapitel 4.1 vorgestellten Proben, wurden in Laborversuchen OCT Messungen durchgeführt. Simuliert wurde eine Post-Prozessüberwachung. Hierzu wurde die fertige Schweißnaht der Proben mit dem OCT Scanner auf Fehlstellen untersucht.

Die für die OCT Untersuchung ausgewählten Proben inklusive Fehlerszenario sind in Tabelle 4-13 dargestellt. Nähere Informationen zu den Proben sowie auch die Schweißparameter sind aus Kapitel 4.1 zu entnehmen.

Tabelle 4-13: Ausgewählte Proben für die Post-Prozessüberwachung

Probennummer	Fehlerszenario
2	Gutschweißung/ Referenzschweißung
14	Unvollständige Nahtlänge (75%)
19	Spalt von 0,3 mm zwischen Busbar und Zellpol
23	Spalt von 0,5 mm zwischen Busbar und Zellpol

Der Versuchsaufbau im Labor von Lessmüller Lasertechnik für die Post-Prozessüberwachung der Schweißnähte wird in Abbildung 4-55 dargestellt.

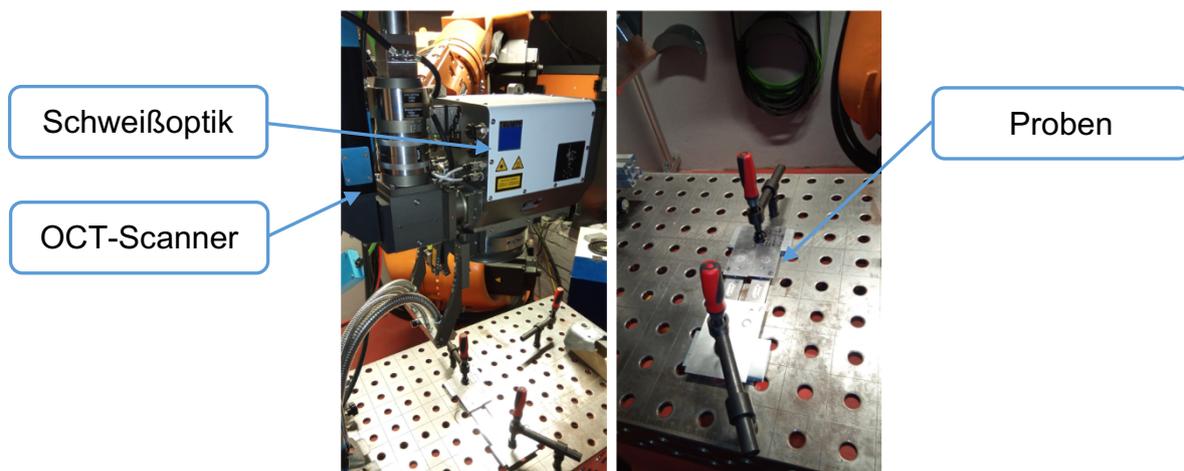


Abbildung 4-55: Versuchsaufbau bei Lessmüller Lasertechnik

Ein Beispiel eines fertigen OCT Bildes – einmal ohne definierte Grenzwerte und einmal mit (rote Linien) – ist in Abbildung 4-56 dargestellt. Die orange Line (rechtes Bild) stellt dabei die gefilterte Werkstückoberfläche dar. Die grünen Punkte (rechtes Bild) liegen innerhalb der Grenzen und die roten Punkte außerhalb. Die abgetastete Oberfläche wird um 90° verdreht vom Programm ausgegeben. Die einzelnen OCT-Bilder passend zu den Auswertungen der Proben befinden sich im Anhang 11.5.

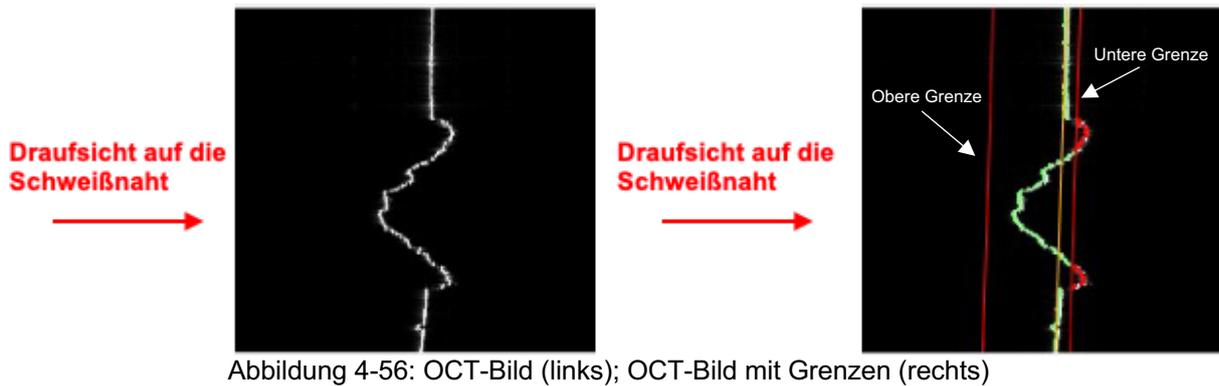


Abbildung 4-56: OCT-Bild (links); OCT-Bild mit Grenzen (rechts)

Die oben dargestellten Bilder entsprechen einem über die Laserschweißdauer genau definierten Zeitpunkt. D.h. zu jedem Zeitpunkt gibt es ein OCT-Bild. Der ausgewählte Zeitpunkt des OCT-Bildes wird durch die Positionierung des vertikalen schwarzen Balkens ausgewählt (siehe Abbildung 4-57). Der blaue Graph stellt die ausgewählte Evaluation über die Zeit dar. Es wird zwischen folgenden zwei Evaluationsmöglichkeiten unterschieden:

- **OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE\_DIST\_MEAN**  
Dieser Wert ergibt sich wie folgt:
  1. Zu jedem Punkt im OCT-Bild (rot und grün) wird der Abstand von der orangen Linie berechnet (in  $\mu\text{m}$ )
  2. Es wird der Mittelwert der Abstände gebildet (Summe/Anzahl)
  3. Der Mittelwert wird als Auswertung gespeichert
- **OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE**  
Entspricht der Anzahl der roten Punkte, die außerhalb der roten Grenzlinien liegen

Der graue Bereich am Anfang des Graphen wird nicht ausgewertet, da hier der Prozess noch nicht stabil läuft (starten des Laserprogramms etc.). Der gestreifte Bereich im Graphen ist ein separat eingestellter Toleranzbereich für die jeweilige Auswertung. Die eingestellten Grenzen sind experimentell bestimmt.

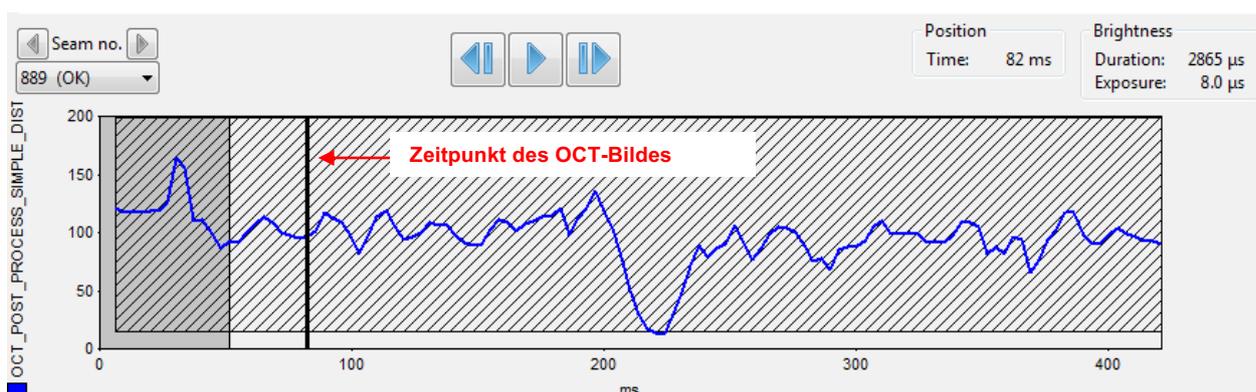


Abbildung 4-57: Graph für Auswertung

Die Programmoberfläche des Players wird in Abbildung 4-58 dargestellt.

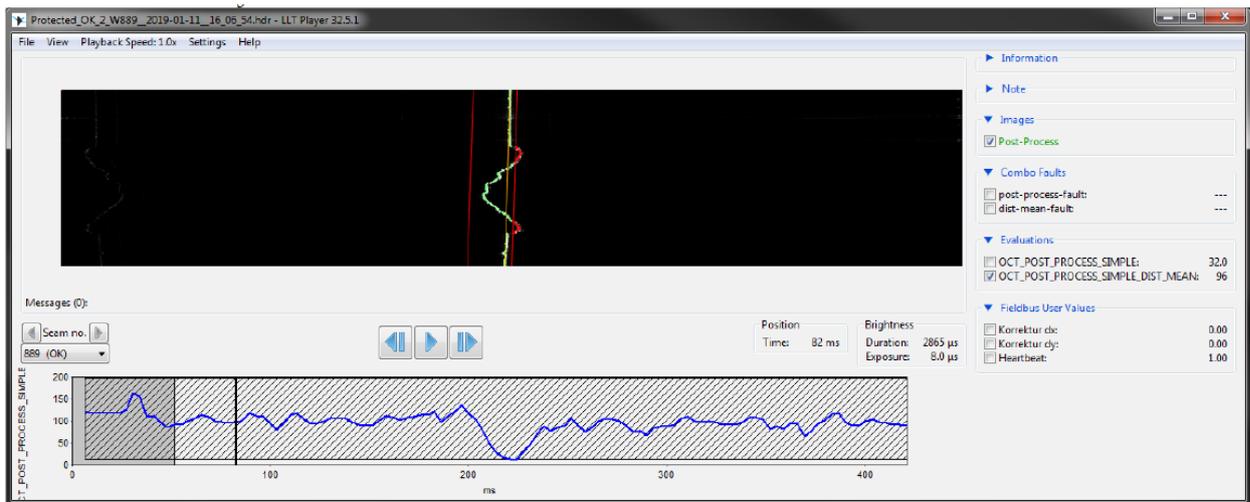


Abbildung 4-58: Gesamtansicht des OCT-Players

Die Ergebnisse der Oberflächenmessungen sind auf den nachfolgenden Bildern zu sehen. Zuerst wird immer das OCT-Bild und passend dazu die Evaluation angezeigt.

### Probe 2 – Gutschweißung/ Referenzschweißung

Sieht man sich das OCT-Bild von Probe 2 an, so liegt sowohl der Wert des OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE\_DIST\_MEAN (96) als auch der Wert des OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE (32) innerhalb der schraffierten Grenzwerte (siehe Abbildung 4-59 und Abbildung 4-60). Sieht man sich die Verläufe der blauen Graphen an, so liegen diese immer innerhalb der Toleranzen. Die Probe 2 wird somit als IO bewertet.

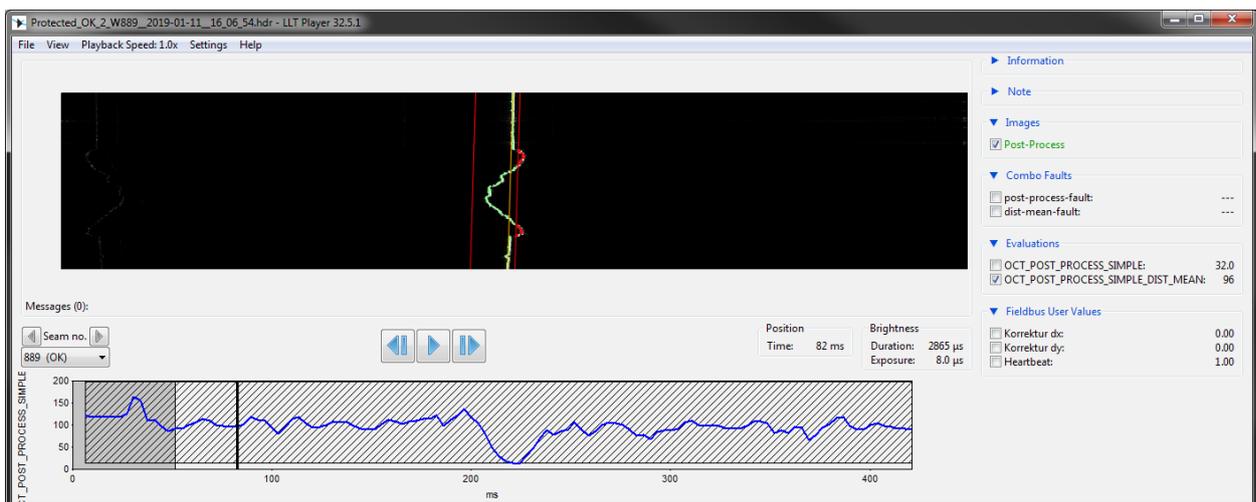


Abbildung 4-59: Probe 2; Evaluation: OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE\_DIST\_MEAN

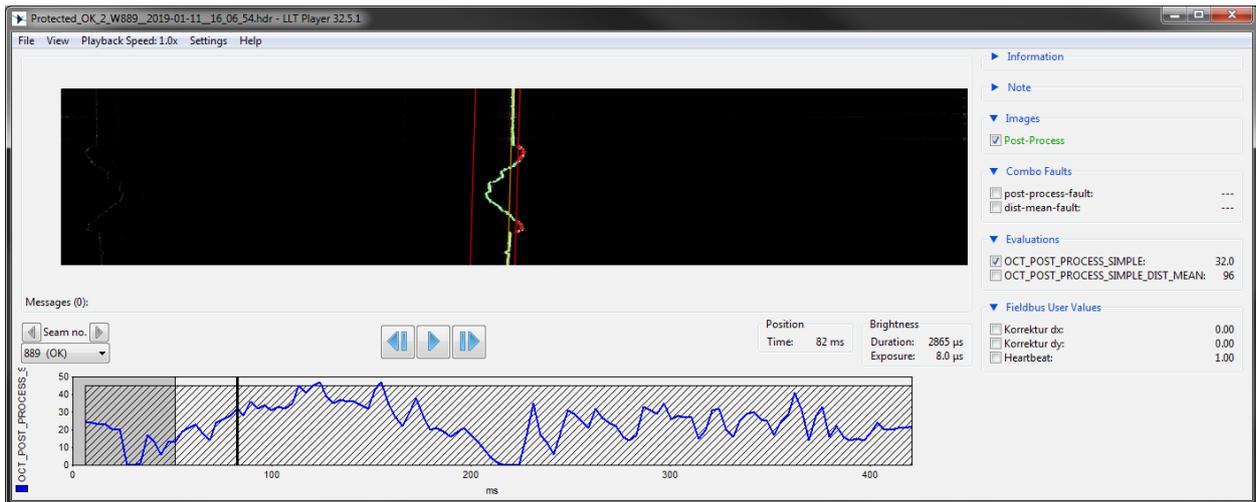


Abbildung 4-60: Probe 2; Evaluation: OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE

### Probe 14 - Unvollständige Nahtlänge (75%)

An der Position 57 ms sieht die Schweißnaht noch in Ordnung aus (siehe Abbildung 4-61). Zwischen 100 und 200 ms kommt es zur Unterschreitung der Toleranzgrenze (siehe Abbildung 4-62). Das OCT-Bild zeigt eine total ebene Oberfläche, was darauf hindeutet das hier nicht geschweißt wurde. Die Probe 14 wurde als NIO detektiert.

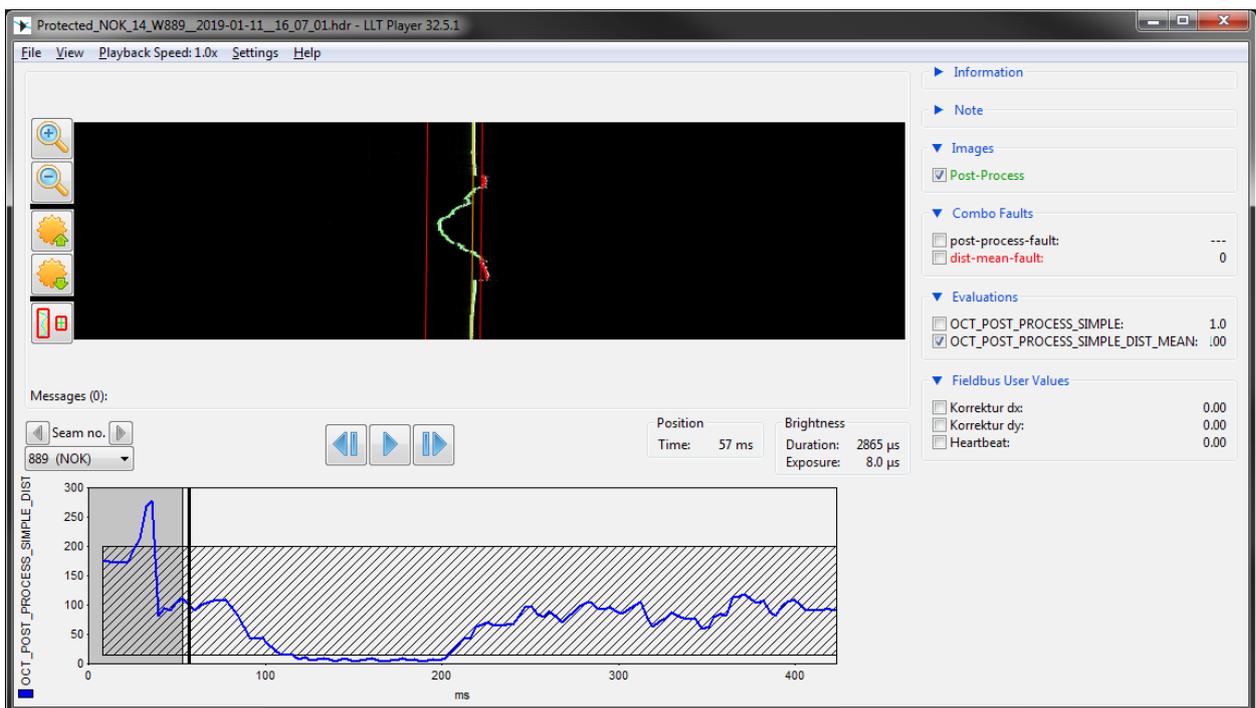


Abbildung 4-61: Probe 14; Evaluation: OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE\_DIST\_MEAN

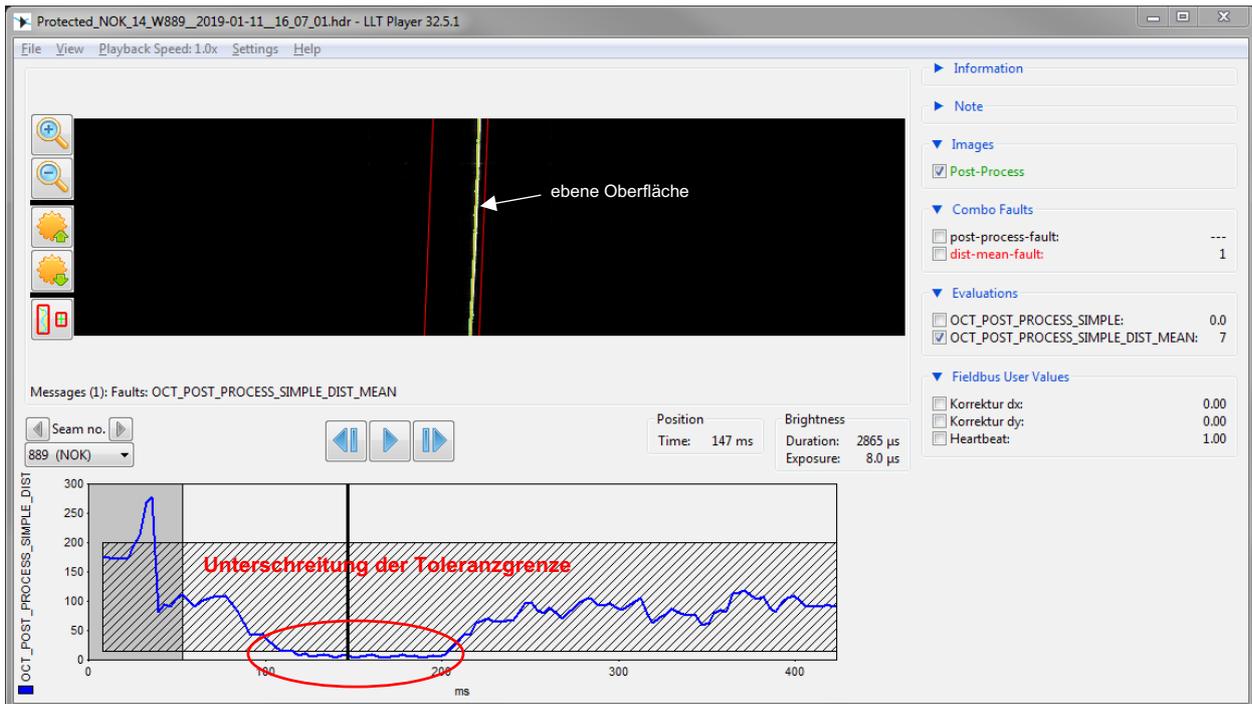


Abbildung 4-62: Probe 14; Evaluation: OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE\_DIST\_MEAN

### Probe 19 - Spalt von 0,3 mm zwischen Busbar und Zellpol

Der Nahtfall der Probe 19 ist sehr deutlich im OCT-Bild ersichtlich. In Abbildung 4-63 sieht man das der blaue Graph außerhalb der Toleranzgrenze verläuft. Es liegen auch sehr viele Punkte außerhalb der roten Grenzlinien. Probe 19 wurde als NIO bewertet.

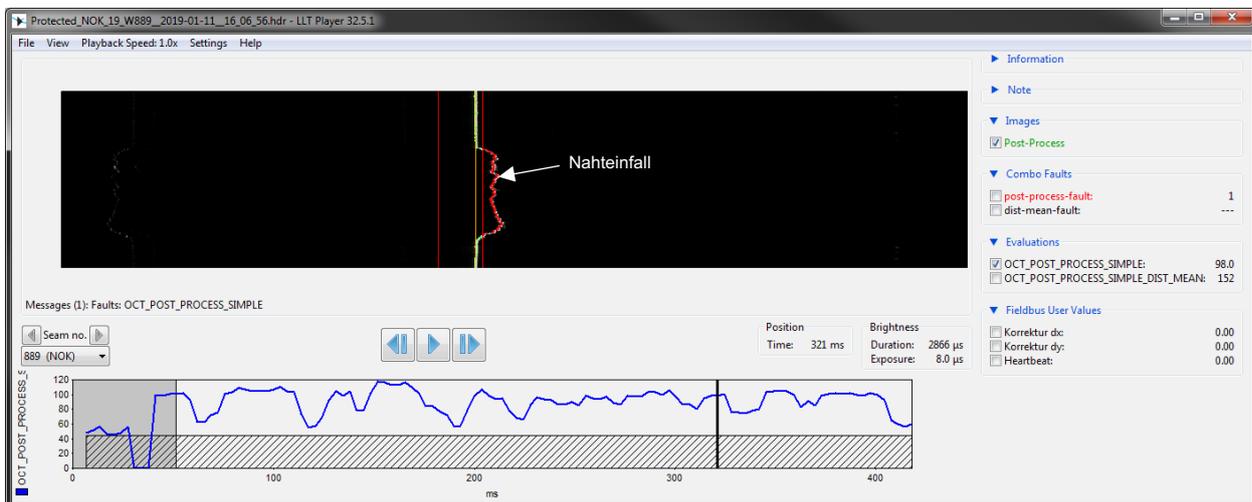


Abbildung 4-63: Probe 19; Evaluation: OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE

### Probe 23 – Spalt von 0,5 mm zwischen Busbar und Zellpol

Wie aus Abbildung 4-64 hervorgeht, liefert Probe 23 die gleichen Ergebnisse wie dies bei Probe 19 der Fall war.



Abbildung 4-64: Probe 23; Evaluation: OCT\_POST\_PROCESS\_SIMPLE

### Zusammenfassung und Erkenntnisse:

Die von der Firma Lesmüller Lasertechnik entwickelte Überwachungstechnologie hat alle Fehlerszenarien erfolgreich detektiert. Es sollte angemerkt werden, dass hier nur die fertigen Schweißnähte (also quasi eine Post-Prozessüberwachung) angesehen wurden. Diese Technologie kann aber neben dem Schweißnahtprofil auch noch die Schweißebene sowie die Einschweißtiefe online erfassen. Durch die Erkenntnisse der Schweißversuche kann die OCT-Überwachungstechnologie für die Echtzeitüberwachung bei Samsung SDI eingesetzt werden.

#### 4.2.5 plasm fast processobserver

Der plasm fast processobserver (kurz fpso) wurde an einem aktiven Laserschweißprozess direkt mit der in Kapitel 2.3.2 vorgestellten Lasersystemtechnik vor Ort bei Samsung SDIBS getestet. Wie in Kapitel 3.2.2 bereits beschrieben detektiert der plasm processobserver die emittierte und reflektierte Strahlung von der Interaktion des Laserstrahls mit dem Werkstück. Der erfasste Wellenlängenbereich erstreckt sich von 400 bis 1000 nm. Unter Einsatz von mathematischen Echtzeitprozessen wird diese Intensitätsverhalten analysiert. Ziel dieser Untersuchung ist es, den Nachweis zu erbringen, dass der plasm fpso für die Überwachung des Laserschweißprozesses geeignet ist. Als zu fügende Materialien dienen die in Kapitel 2.3.4 vorgestellten Busbar- und Zellpolwerkstoffe. Es wurden absichtlich verschiedene produktionsbedingte Unregelmäßigkeiten (siehe Kapitel 2.3.6) simuliert, die während der Batteriefertigung festgestellt wurden. Die simulierten Fehlerszenarien inklusive der zugehörigen Probennummer sind in Tabelle 4-14 zur besseren Übersicht aufgelistet. Einem Zelldeckel wird eine Probennummer zugeteilt und umfasst zwei Laserschweißungen (Plus und Minuspol).

Tabelle 4-14: Inszenierte Fehlerszenarien; plasmopso

Probennummer	Fehlerszenario
1714	Erste Testschweißung/Referenzschweißung
1715	Zweite Testschweißung/Referenzschweißung
1716	Spalt von 0,5 mm zwischen Busbar und Zellpol
1717	Spalt von 0,5 mm zwischen Busbar und Zellpol
1718	Dritte Testschweißung/Referenzschweißung
1719	Vierte Testschweißung/Referenzschweißung
1720	Spalt von 0,3 mm zwischen Busbar und Zellpol
1721	Verschmutztes Schutzglas
1722	Verschmutztes Schutzglas
1723	Kleber zwischen Zellpol und Busbar (dünn aufgetragen)
1724	Kleber zwischen Zellpol und Busbar (dick aufgetragen)
1725	Spalt von 0,2 mm zwischen Busbar und Zellpol (erlaubter Grenzwert)
1726	Spalt von 0,2 mm zwischen Busbar und Zellpol (erlaubter Grenzwert)
1727	Unvollständige Kreisnaht (nur 75 % geschweißt)
1728	Verstellte Fokuslage (z = -3)
1729	Laserleistung auf 1800 W verringert
1730	Schweißung nur auf Busbar (Zellpol fehlt)
1731	Schweißung nur auf Zellpol (Busbar fehlt)
1732	Fünfte Testschweißung/Referenzschweißung

Die verwendeten Schweißparameter sind dieselben wie in Kapitel 4.2.3. Das schematische Layout des plasmopso processobserver Systems wird in Abbildung 4-65 dargestellt.

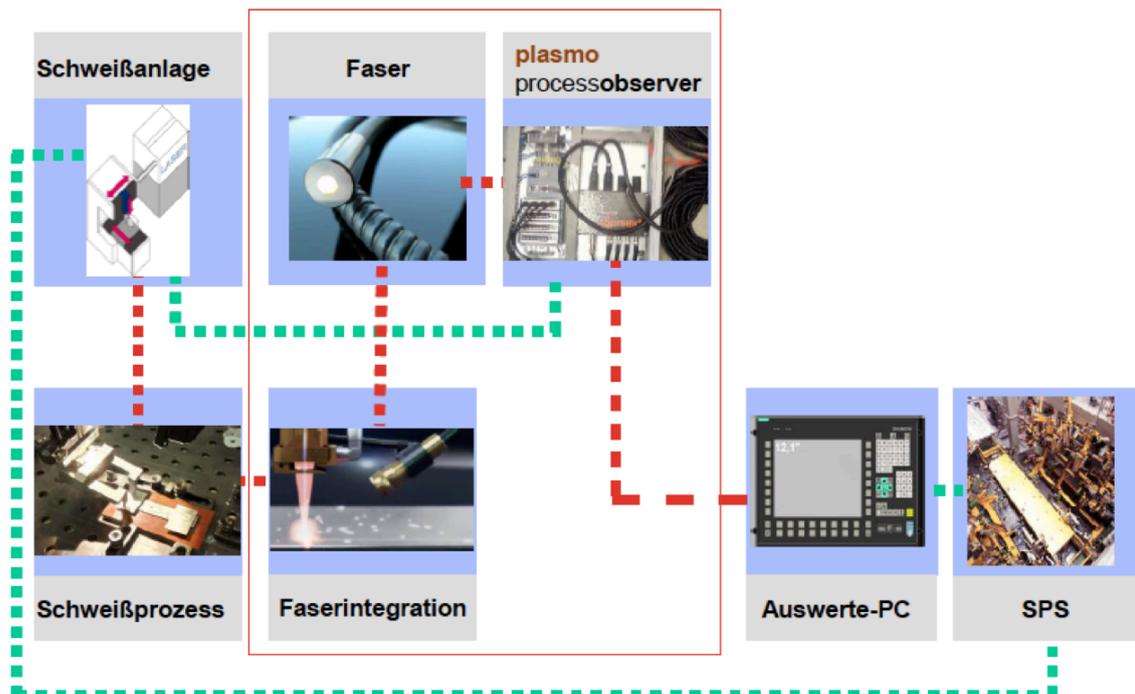


Abbildung 4-65: Integration des plasmopso processobserver in die Lasersystemtechnik von Samsung SDIBS

Abbildung 4-66 zeigt die Integration der Fasern (vergleiche Kapitel 3.2.1 Sensorikanordnung für optische Prozessemissionen).

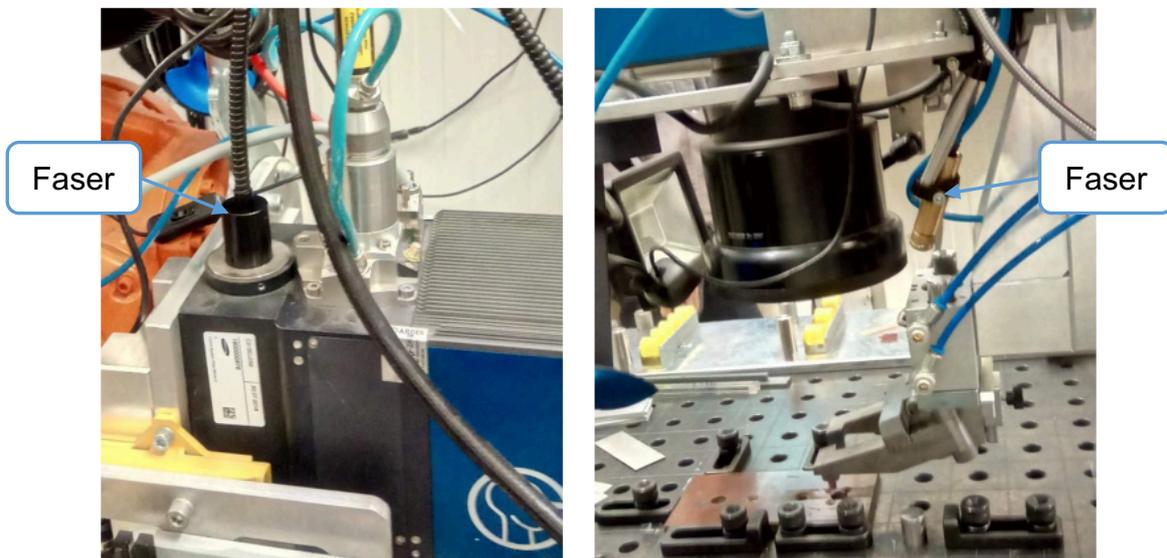


Abbildung 4-66: Über Kamera-adapter realisierte Integration der plasmofaser am Schweißkopf (links); über off-axialen Halter realisierte Integration der plasmofaser am Schweißkopf (rechts)

Die Auswertung der digitalisierten und aufbereiteten Signale erfolgt anhand von Hüllkurven (siehe Kapitel 3.2.2). Je nach Integration der plasmofaser unterscheidet man zwischen den Messsignalen SiA (Kameraintegration) und SiB (axial platzierte Faser am Schweißkopf). Plasmofaser unterscheidet zwischen folgenden vier (Kurven-)Varianten:

1. Dynamisch Absolute Schwellen (dynamischer Verlauf der oberen und unteren Hüllkurve)
2. Signaldynamik (bewertet das Signalrauschen anhand des Mittelwertes des Signals)
3. Absolute Grenzen (konstanter Verlauf der oberen und unteren Hüllkurve)
4. Nahtlänge (genau definierter Sollwertbereich)

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind auf den nachfolgenden Bildern zu sehen. Die Referenzschweißungen (Probennummer: 1714, 1715, 1718, 1719, 1732) sind nicht angeführt, da diese lediglich zur Überprüfung der Stabilität des Laserschweißprozesses dienen und keine Abweichungen aufzeigen.

**Probe 1716, 1717 und 1720 – Spalt zwischen Zellpol und Busbar:**

Der Spalt (1716&1717: 0,5 mm; 1720: 0,3 mm) zwischen Zellpol und Busbar konnte detektiert werden. Anhand der hellen Messkurve (siehe obigen Kurvenverlauf in Abbildung 4-67) von Probe 1716 geht hervor, dass ihr Verlauf die obere Grenze (weiß) zeitmäßig zu lange überschritten hat. Der untere Kurvenverlauf zeigt die Anzahl der Unter- (rot) und Überschreitungen (rot). Somit wird ein Spalt zwischen Zellpol und Busbar vom fpso eindeutig als fehlerhaft bewertet.

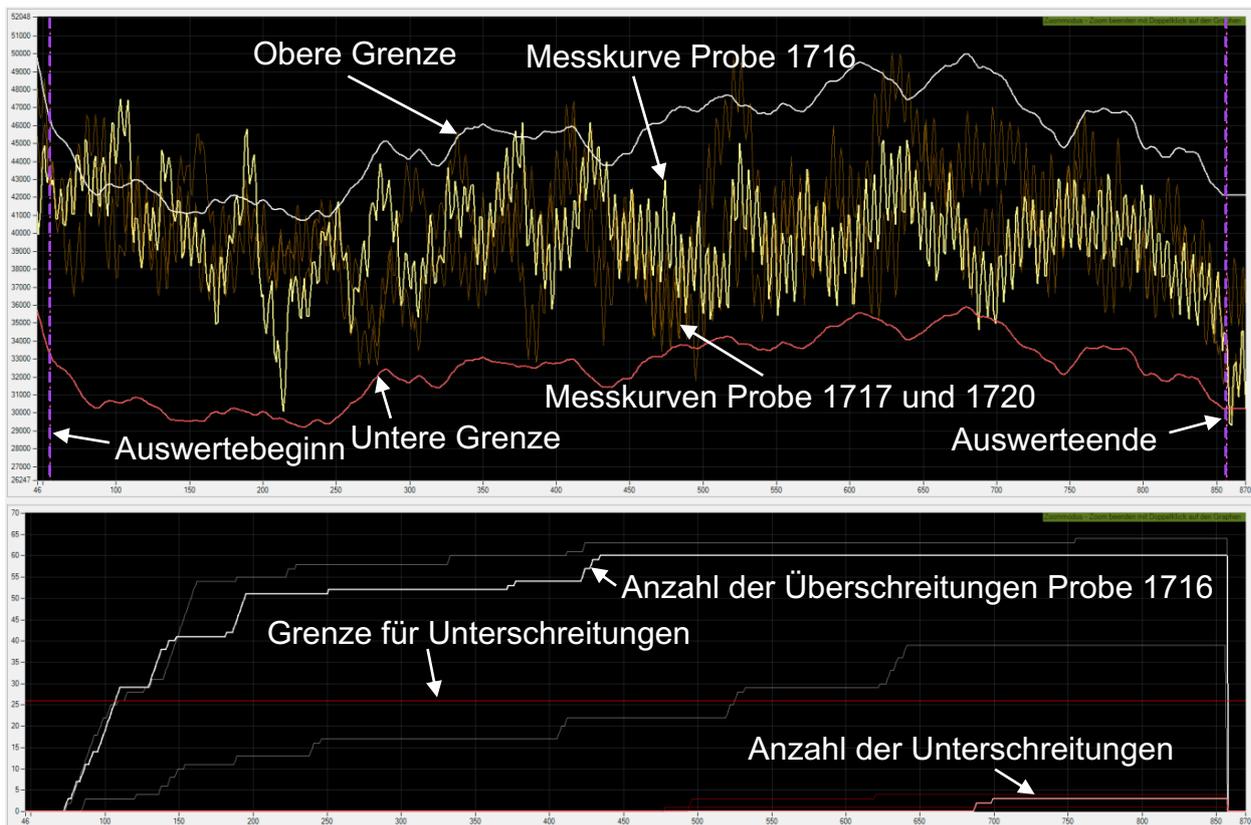


Abbildung 4-67: SiB „Dynamisch Absolute Schwellen“; Probe 1716 (helle Kurve), 1717 und 1720

Im Querschliff der Probe 1716 ist die durch den Spalt bedingte Nahtunterwölbung sichtbar. In der Nahtwurzel ist auch ein Hohlraum bzw. eine große Pore sichtbar. Bei dem Zickzack-Muster im rechten Querschliff (gelb umrahmt) handelt es nicht um einen Riss. Hier wurde die Oberfläche bei der Schlifffherstellung angekratzt.

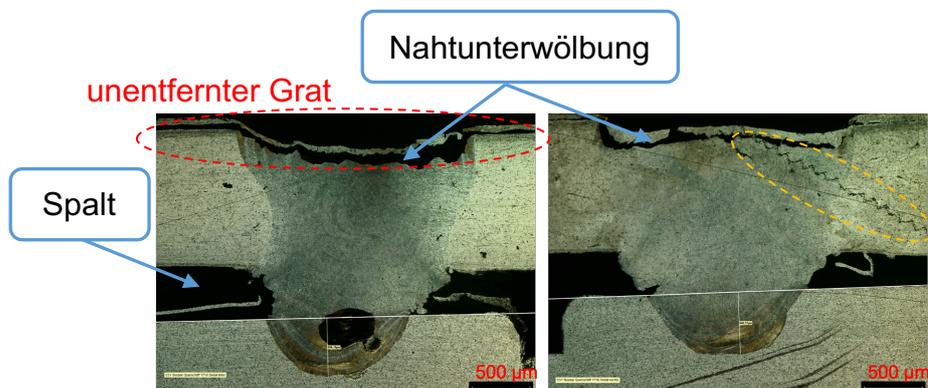


Abbildung 4-68: Probe 1716; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

### Probe 1721 und 1722 – verschmutztes Schutzglas

Die Messkurven der Proben 1721 und 1722 sind praktisch deckungsgleich. Die roten Messkurven überschreiten am Anfang und gegen Ende deutlich die obere Grenze. Die Kurven wurden vom fpso eindeutig als fehlerhaft bewertet. Die grüne Kurve stammt von einer Referenzschweißung (Probe 1715) und dient zum Vergleich.

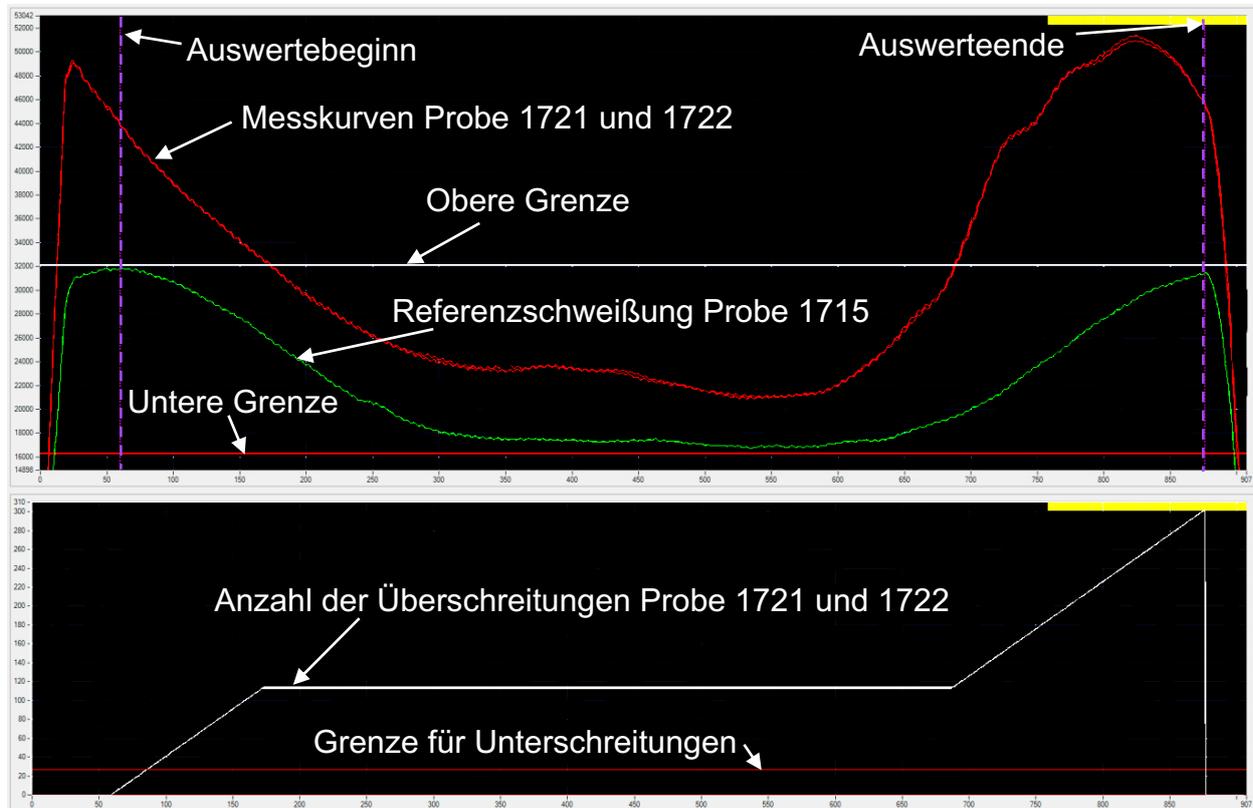


Abbildung 4-69: SiA „Absolute Grenzen“ (Messsignal der Kameraintegration); Probe 1721 und 1722

Die Schlifffbilder der Probe 1721 (siehe Abbildung 4-70) weisen durch das verschmutzte Schutzglas gleich mehrere Unregelmäßigkeiten auf. Auffällig ist auch der Spalt zwischen Zellpol und Busbar, welcher auf einen Fehler in der Spannsituation hinweisen könnte oder auf einen verbogenen Busbar.

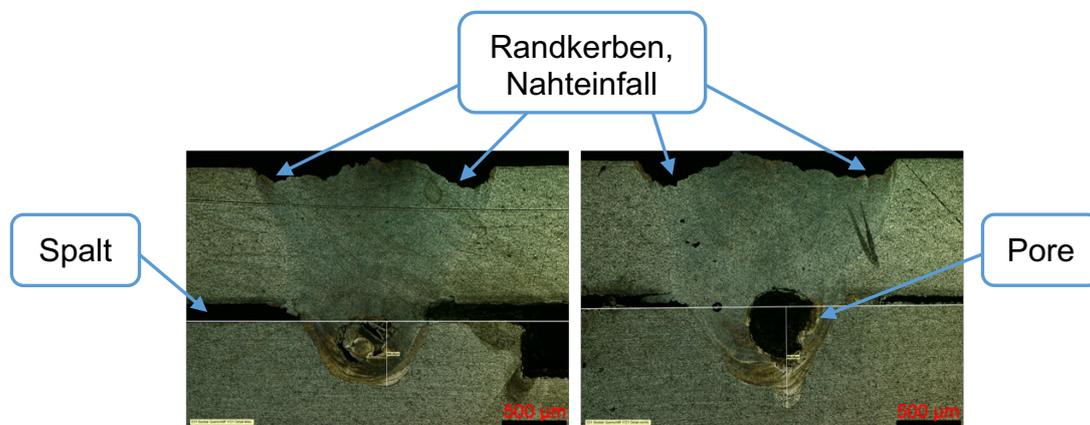


Abbildung 4-70: Probe 1721; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

**Probe 1723 und 1724 – Kleber zwischen Zellpol und Busbar**

Der eingebrachte Kleber zwischen Zellpol und Busbar bei Probe 1723 (Kleber dünn aufgebracht) und 1724 (Kleber dicker aufgebracht) wurde vom fpso eindeutig als fehlerhaft bewertet. Die helle Kurve (siehe Abbildung 4-71) ist von Probe 1723 und überschreitet gegen Ende die obere Grenze.

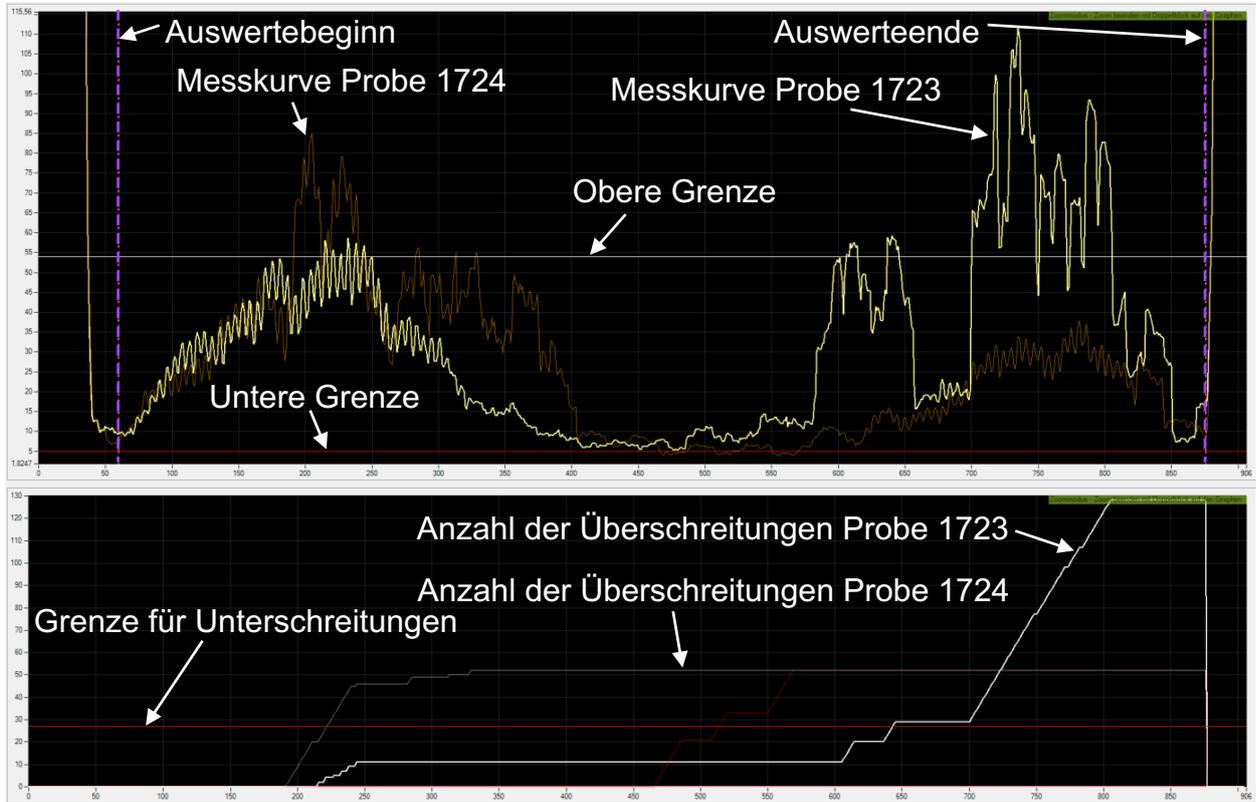


Abbildung 4-71: SiA „Signaldynamik“; Probe 1723 und 1724

Die Schliffbilder von Probe 1723 weisen durch den aufgetragenen Kleber mehrere Unregelmäßigkeiten auf (siehe Abbildung 4-72).

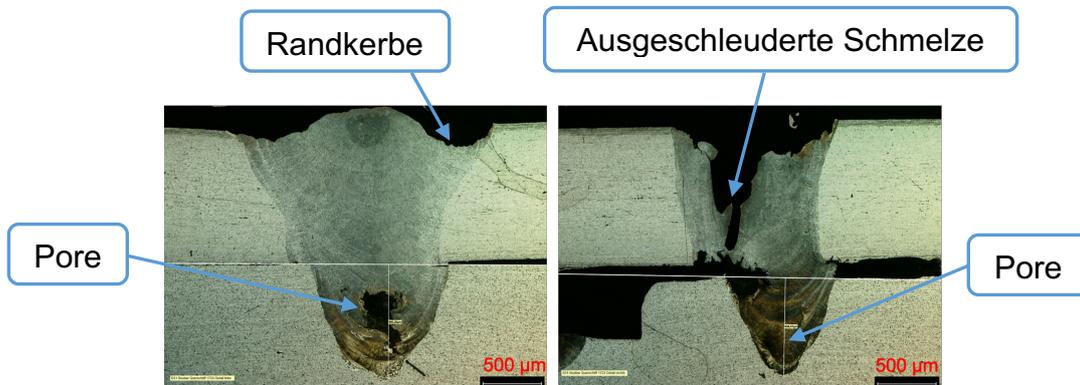


Abbildung 4-72: Probe 1723; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

### Probe 1725 und 1726 – Spalt zwischen Zellpol und Busbar

Bei den Proben 1725 und 1726 wurde ein Spalt von 0,2 mm zwischen Zellpol und Busbar eingebracht, was dem Grenzwert zwischen IO und NIO entspricht. Diese Situation wurde vom fpso detektiert und kann je nach eingestellten Grenzwerten als IO oder NIO bewertet werden. Die Kurvenverläufe werden in Abbildung 4-73 dargestellt.

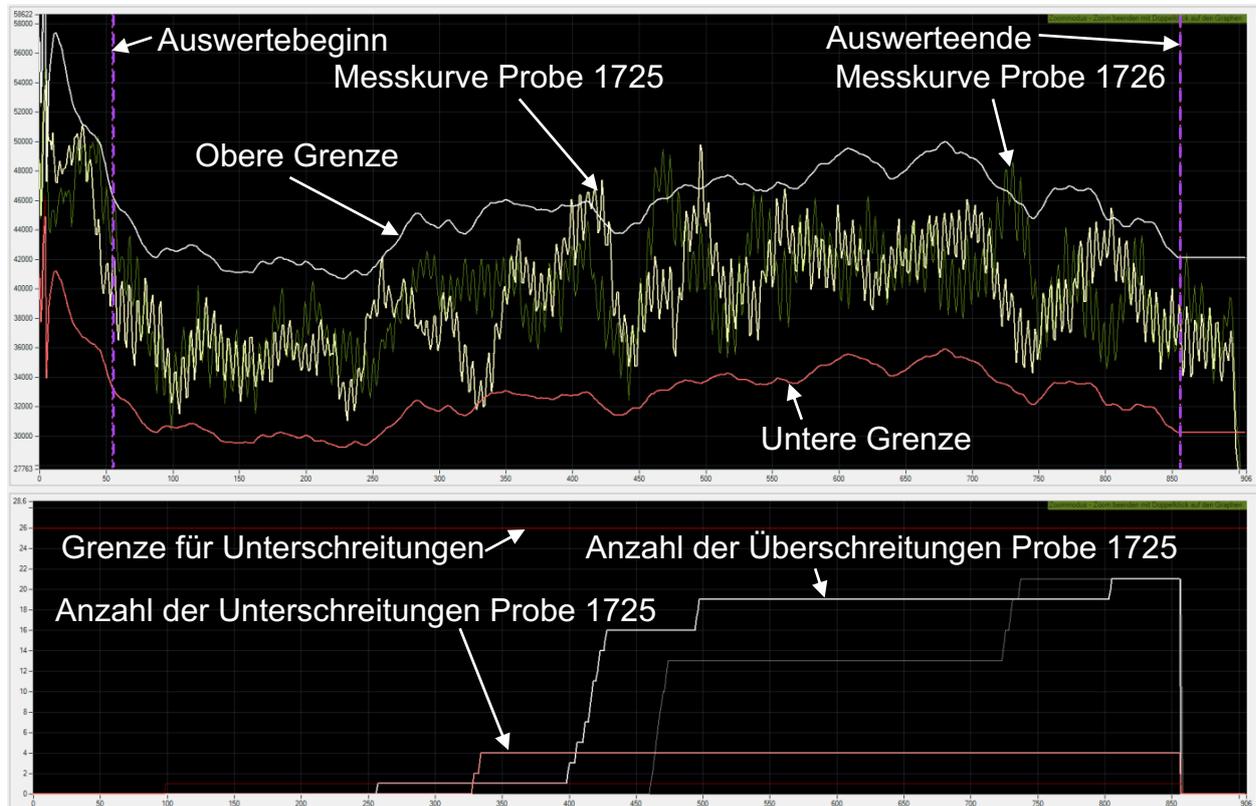


Abbildung 4-73: SIB „Dynamisch Absolute Schwellen“; Probe 1725 und 1726

Beim Grenzwert 0,2 mm ist der Spalt im Schliffbild kaum sichtbar. Der Nahteinfall ist minimal. In Abbildung 4-74 sind Unregelmäßigkeiten wie Poren und Randkerben sichtbar.

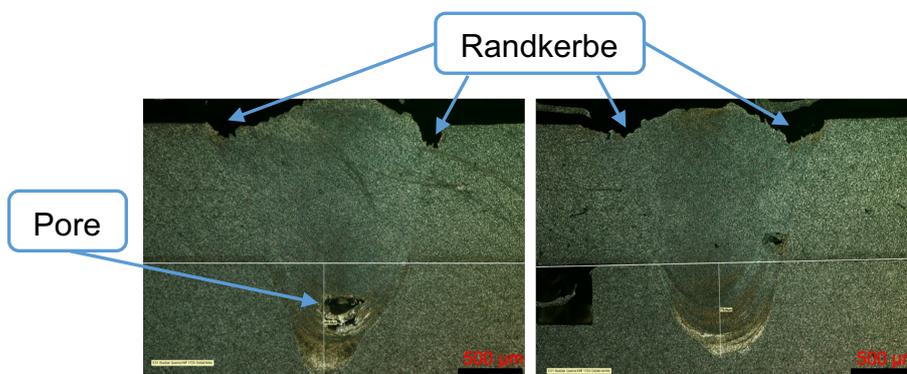


Abbildung 4-74: Probe 1725; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

## Probe 1727 – Unvollständige Kreisnaht

Bei der Probe 1727 wurde der Laser zu früh ausgeschaltet (nach etwa  $\frac{3}{4}$  der Zeit). Der Kurvenverlauf wurde vom fposo eindeutig als zu kurz identifiziert (siehe Abbildung 4-75). Zum Vergleich wurde die Kurve von Probe 1732 (Referenzschweißung) eingeblendet.

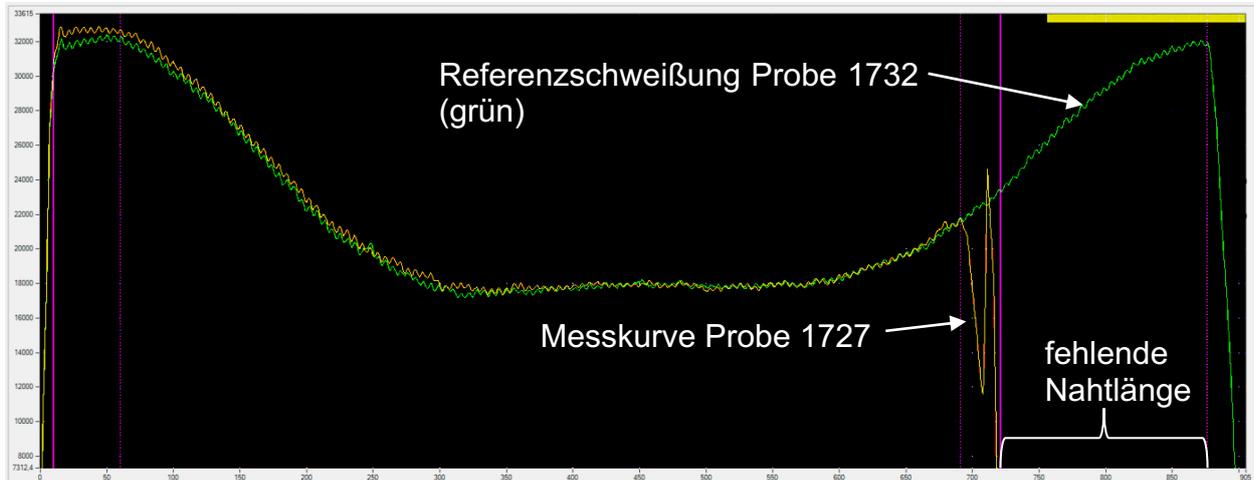


Abbildung 4-75: SiA „Nahtlänge“; Probe 1727

Das Schliffbild zeigt auf der linken Seite der Kreisnaht eine größere Pore (siehe Abbildung 4-76). Poren müssen prinzipiell nicht immer negativ angesehen werden.

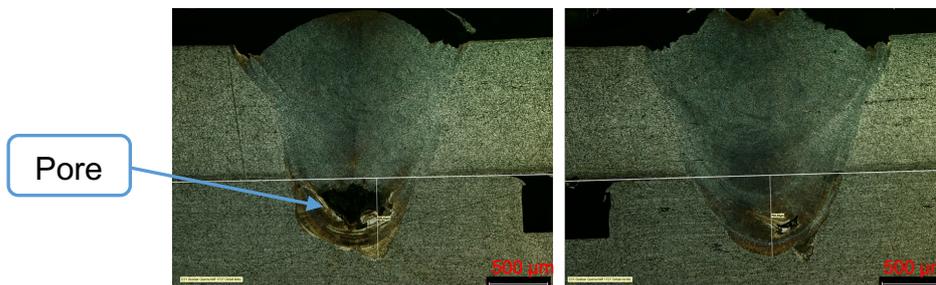


Abbildung 4-76: Probe 1727; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

### Probe 1728 – Verstellte Fokusslage -3 mm

Die Messkurve infolge einer um 2 mm verstellten Fokusslage ist in Abbildung 4-77 dargestellt. Das deutlich veränderte Signal wurde vom fposo aufgrund zu langer Überschreitung der oberen Grenze als fehlerhaft erkannt.

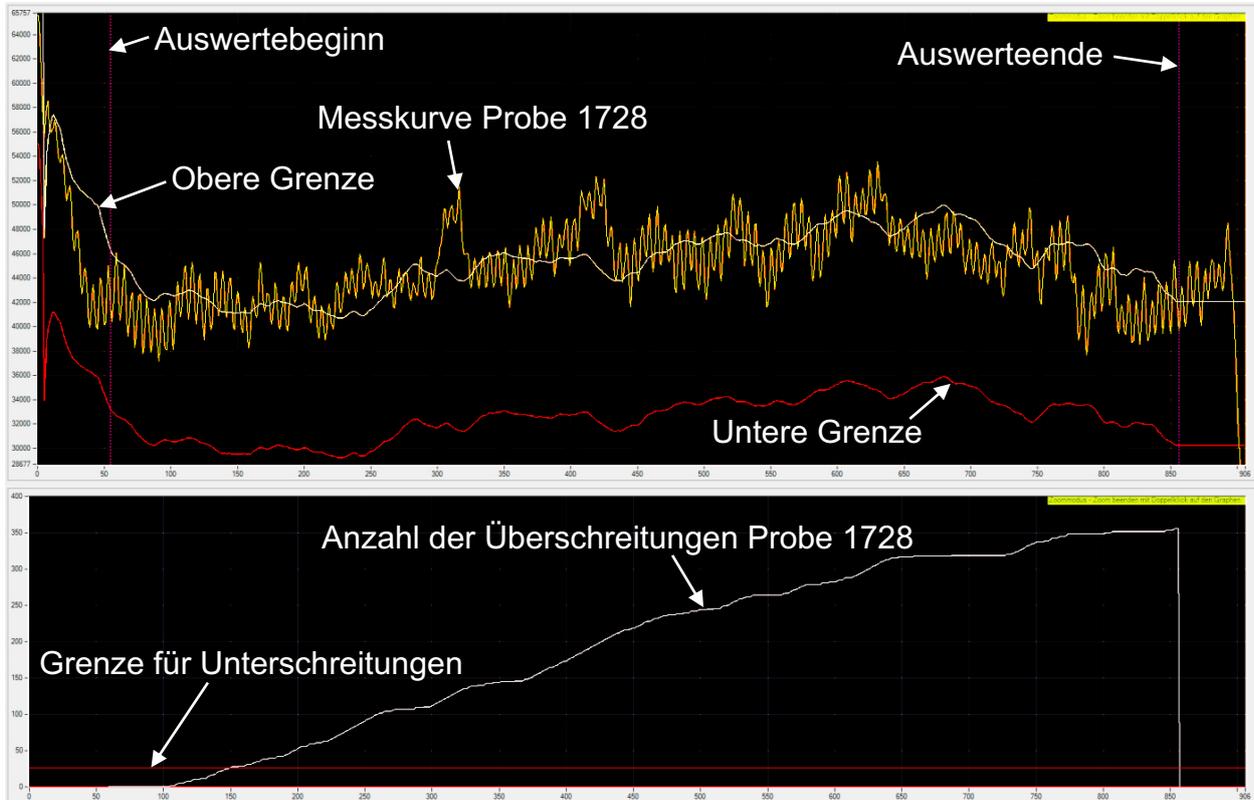


Abbildung 4-77: SiB „Dynamisch absolute Schwellen“; Probe 1728

Aus der Auswertung der Schlibfbilder (siehe Abbildung 4-78) geht eine deutlich geringere Einschweißtiefe im Vergleich zu der Referenzschweißung (siehe Abbildung 4-79) hervor.

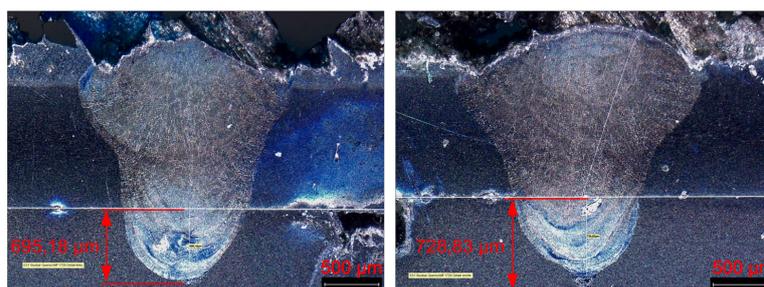


Abbildung 4-78: Probe 1728; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

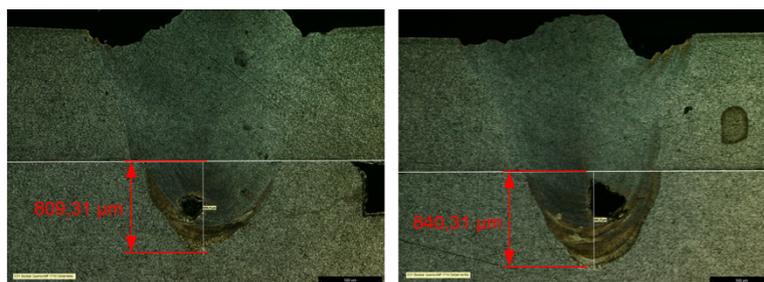


Abbildung 4-79: Probe 1718; Referenzschweißung; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

## Probe 1729 – Laserleistung auf 1800 W verringert

Die Messkurve infolge Reduktion der Laserleistung ist in Abbildung 4-80 dargestellt. Das deutlich veränderte Signal wurde vom fpsi aufgrund zu langer Unterschreitung der unteren Grenze als fehlerhaft detektiert.

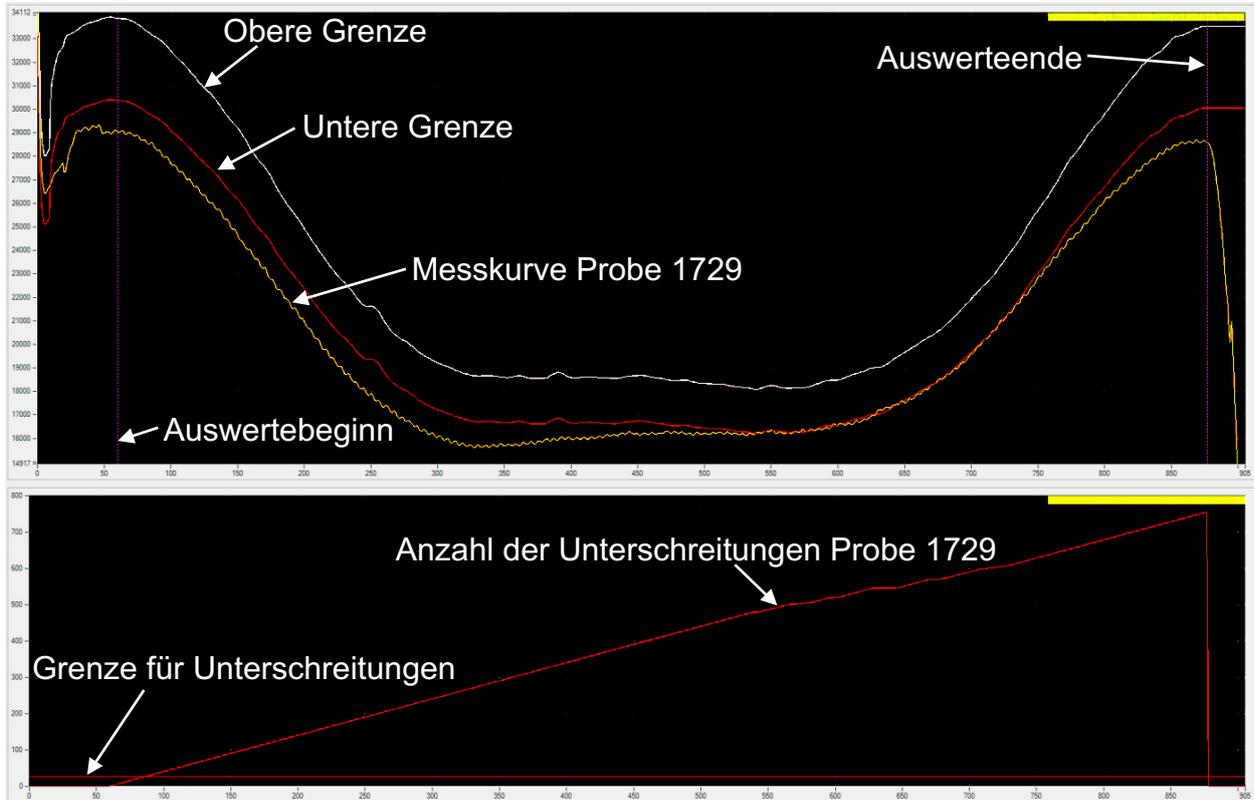


Abbildung 4-80: SiA „Dynamisch Absolute Schwellen“; Probe 1729

Aus der Auswertung der Schliffbilder (siehe Abbildung 4-81) geht eine deutlich geringere Einschweißtiefe im Vergleich zu der Referenzschweißung (siehe Abbildung 4-82) hervor.

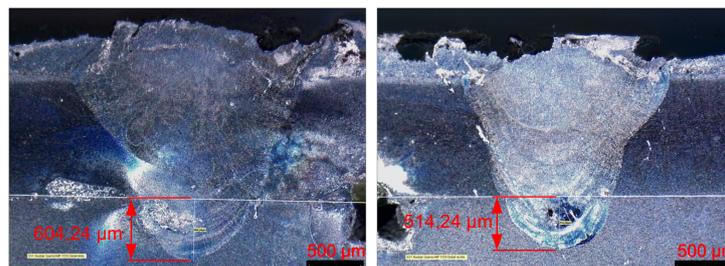


Abbildung 4-81: Probe 1729; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

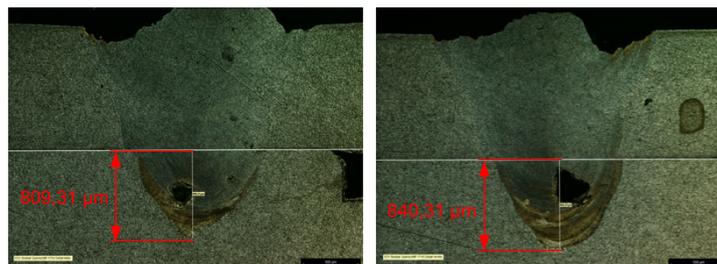


Abbildung 4-82: Probe 1718; Referenzschweißung; Querschliff links und rechts (Rundnaht)

Je nach Beschaffenheit der Oberfläche der Querschliffe werden unterschiedliche Beleuchtungsmethoden verwendet um in jedem Fall die beste Bildqualität zu erhalten. Die bläulichen Schliffbildern wurden mit einem LED Ringlicht beleuchtet. Die grünlichen Schliffbilder entstehen durch die Beleuchtung mit Koaxiallicht.

### Probe 1730 – Schweißung nur auf Busbar

Innerhalb dieses Schweißversuches wurde der Zelldeckel entfernt und nur der Busbar in die Spannvorrichtung positioniert. Das Messsignal (siehe Abbildung 4-83) wurde vom fpo eindeutig als fehlerhaft bewertet.

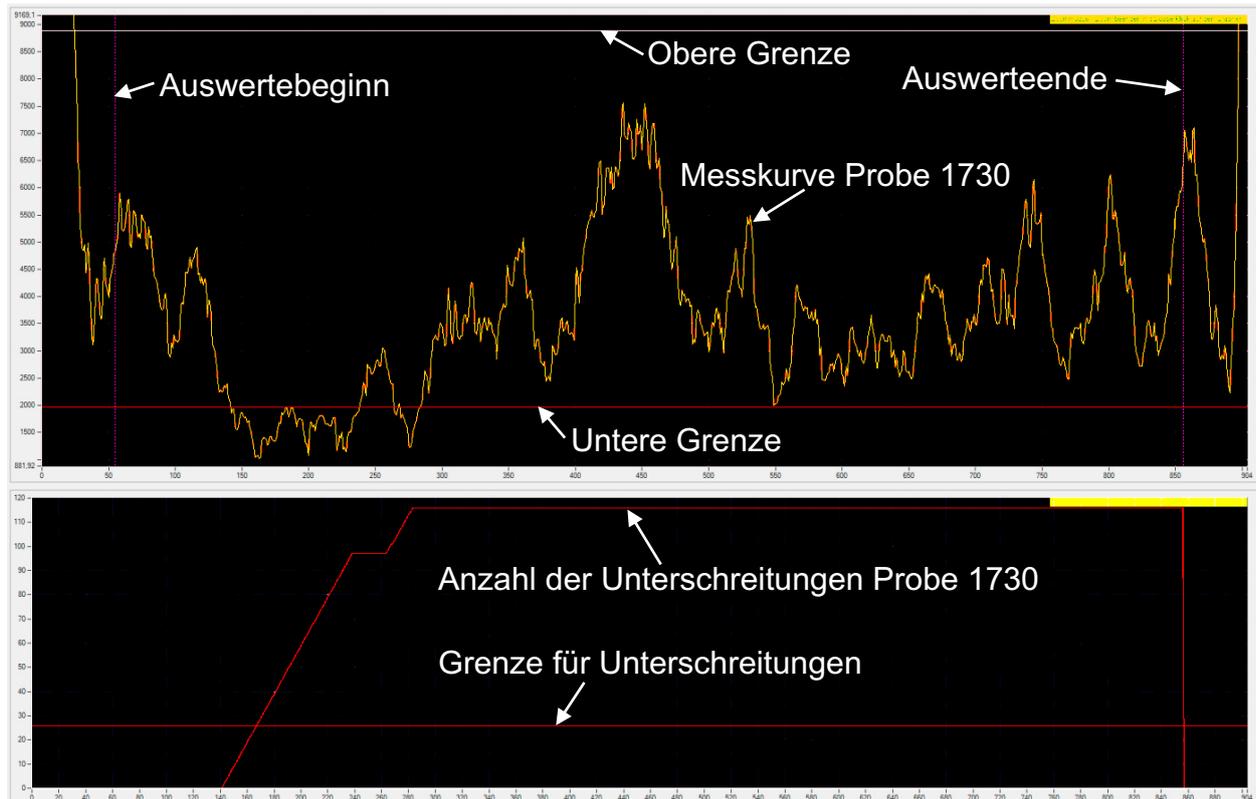


Abbildung 4-83: SiB „Signaldynamik“; Probe 1730

## Probe 1731 – Schweißung nur auf Zellpol

Bei diesem Schweißversuch wurde der Busbar entfernt. Das Messsignal überschreitet die obere Grenze zu lange und wird vom fpso eindeutig als fehlerhaft bewertet (siehe **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**).

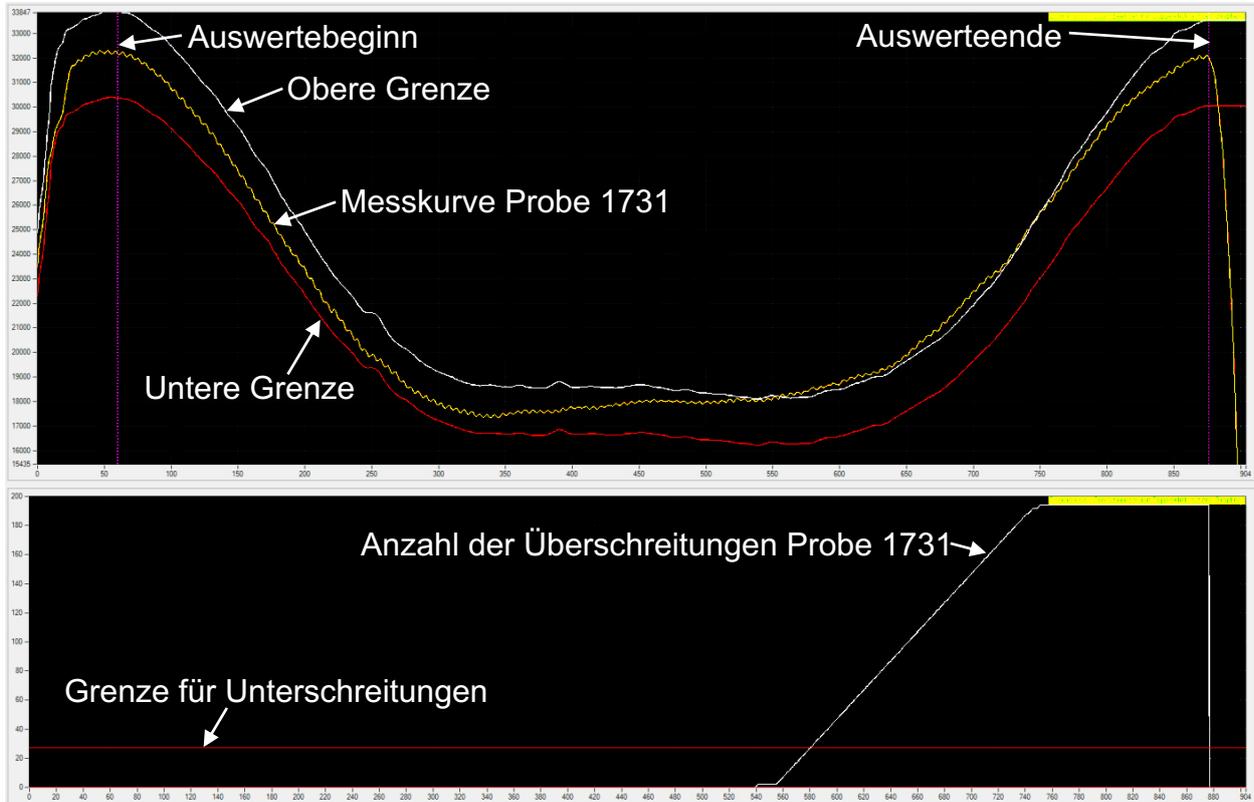


Abbildung 4-84: SiA „Dynamisch Absolute Schwellen“; Probe 1731

## Zusammenfassung und Erkenntnisse der Schweißversuche mit dem plasmofpso:

Alle Fehlerszenarien wurden vom plasmofpso System eindeutig detektiert. Der Grenzfall eines 0,2 mm Spaltes zwischen Zellpol und Busbar können sowohl als IO wie auch als NIO bewertet werden. Eine Zuordnung der Parametrierung kann später in der Serienanwendung getroffen werden. Durch die Erkenntnisse der Schweißversuche kann das plasmofpso System für die Echtzeitüberwachung bei Samsung SDI eingesetzt werden.

## 5 GEGENÜBERSTELLUNG DER ERGEBNISSE

Innerhalb dieses Kapitels sind die einzelnen ZfP-Verfahren aus Kapitel 4.2 für einen besseren Gesamtüberblick bezüglich der möglichen Fehlertypenerkennung gegenübergestellt.

Tabelle 5-1 zeigt die durch die ZfP-Verfahren detektierten Szenarien der in Kapitel 4.1 erläuterten Proben für Post-Prozessuntersuchungen. Es geht eindeutig hervor, dass weder eine Wirbelstromprüfung noch eine Thermographie-Prüfung für die Überprüfung der elektrischen Kontaktierung in der Batterieserienfertigung geeignet ist. Die OCT-Überwachungstechnologie von Lessmüller Lasertechnik konnte in einer nachsimulierten Post-Prozessüberwachung mit dem OCT-Scanner alle Szenarien bis auf Poren eindeutig detektieren. Da es sich bei Poren um Unregelmäßigkeiten im Bauteilinnern handelt und der OCT-Scanner nur die Oberfläche scannt, war dieses Szenario nicht Teil der Untersuchung und wurde deshalb in der unten angeführten Tabelle ausgeklammert.

Tabelle 5-1: Post-Prozess; mögliche Fehlertypenerkennung

Szenario / ZfP-Verfahren	1	2	3	4	5	6
Wirbelstromprüfung (Sondentyp PKA-27 H-1359)	✓	x	x	x	✓	✓
Wirbelstromprüfung (rotierende Tellersonde)	✓	x	✓	✓	x	x
Blitzthermografische Messung	x	x	x	x	x	x
Induktiv-thermografische Messung	x	x	x	x	x	x
Interferometrie - OCT	✓	(x)	✓	✓	✓	✓

In Tabelle 5-2 sind die Ergebnisse bezüglich der detektierten Fehlertypen aus den Untersuchungen während des aktiven Schweißprozesses (In(-situ)-Prozess) aufgelistet. Sowohl der plasmofast processobserver als auch der LDD-700 Sensor konnten alle inszenierten Fehler detektieren und eignen sich somit für eine ZfP-Überwachung für das Fügen der elektrischen Kontaktierung in der Batterieserienfertigung.

Tabelle 5-2: In(-situ)-Prozess; mögliche Fehlertypenerkennung

Szenario / ZfP-Verfahren	Spalt zw. Zellpol und Busbar	Kleberreste zw. Zellpol und Busbar	Unvollständige Kreisnaht	Laserleistung verringert
plasmofast processobserver	✓	✓	✓	✓
Interferometrie - LDD-700	✓	✓	✓	✓

Es wurden während den Schweißversuchen auch noch weitere Fehlerszenarien untersucht, welche nicht in obiger Liste angeführt wurden, da sie nicht an beiden Überwachungssystemen inszeniert wurden. Mit dem plasmofast processobserver wurden zusätzlich noch Schweißversuche mit einem verschmutzten Schutzglas,

verstellter Fokuslage und Schweißungen mit fehlendem Busbar sowie Zelldeckel durchgeführt. Mit dem LDD-700 wurden zusätzlich Schweißversuche mit verschmutzter Busbaroberfläche (Öl) durchgeführt. Auch diese Szenarien wurden von den beiden Überwachungssystemen detektiert.

Abschließend in diesem Kapitel werden noch die jeweiligen Vor- und Nachteile dieser Überwachungssysteme (plasmo fpso und Interferometer) angeführt.

#### **Vorteile beider Überwachungstechnologien:**

- Fehler werden in Echtzeit (online) detektiert
- Serientaugliche, berührungslose und zerstörungsreife Fehlererkennung
- Entstandene Fehler sind sofort rückverfolgbar
- Frühzeitige Fehlererkennung senkt die Prüfkosten, die Nacharbeitsquote und somit die gesamten Fertigungskosten
- Grafische Darstellung der Ergebnisse
- Kompakte Integration in die vorhandene Lasersystemtechnik (robustes Industriedesign)

#### **Vorteile Interferometer (in Anlehnung an [43]):**

- Echtzeit-Messsystem: Schnelle und präzise Online-Bestimmung von Schweißposition, Schweißebene, Einschweißtiefe und Schweißnahtprofil
- Interferometer werden durch das Prozessleuchten nicht beeinflusst

#### **Nachteile Interferometer:**

- Der LDD-700 Scanner von IPG Laser GmbH ist derzeit nur mit der passenden Schweißoptik von IPG kompatibel
- Derzeit noch beschränkt einsetzbar für Laserschweißungen mit Wobbeln
- Keine konkrete Aussage über Art der Unregelmäßigkeit möglich

#### **Vorteile plasmo fpso:**

- Liefert durch die Auswertung des Prozessleuchtens quasi den Fingerabdruck des Schweißprozesses
- Firma mit Sitz in Österreich (Wien), wodurch eine schnelle Hilfe vor Ort gewährleistet wird

#### **Nachteile plasmo fpso:**

- Es kann durch fremde Lichtquellen (Tageslicht, Hallenbeleuchtung etc.) zu Störungen kommen
- Keine konkrete Aussage über Größe und Art der auftretenden Unregelmäßigkeiten (z.B. Poren) möglich

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Die industrielle Batterieserienfertigung fordert durch den steigenden Kostendruck und die wachsenden Qualitätsanforderungen immer flexiblere und mit wenigen Fehlern (innerhalb der Bewertungsgruppe laut Norm) behaftete Fügeprozesse. Das Laserstrahlschweißen wird als ein zeitgerechtes sowie zuverlässiges Fertigungsverfahren gehandhabt und entspricht den hohen Anforderungen. Der Laserstrahlschweißprozess wird von einer Vielzahl an Parametern, wie z.B. der Laserleistung, Fokusslage und der Schweißgeschwindigkeit beeinflusst, wodurch eine hohe Flexibilität gewährleistet wird. Die stetige Erhöhung der Anforderungen an die Schweißnahtqualität der elektrischen Kontaktierung von Zellen mit Busbar erhöht die Anfälligkeit gegenüber Schweißnahtunregelmäßigkeiten. Dies führt zum Bedarf an innovativen Prozessüberwachungssystemen, um die Ausschussrate so gering wie möglich zu halten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden diverse zerstörungsfreie, serientaugliche Verfahren zur Prüfung von lasergeschweißten Batteriezellen untersucht. Dabei handelte es sich um Verfahren und Systeme, die während (In(-situ)-Prozess) bzw. unmittelbar nach (Post-Prozess) dem Laserstrahlschweißen online eine Fehlerdetektion ermöglichen. Schwerpunkt der praktischen Untersuchungen lag auf der Bewertung der Verfahren hinsichtlich Serientauglichkeit sowie der Erkennung von definierten fertigungsbedingten Unregelmäßigkeiten.

Für die Beurteilung der ausgewählten Post-Prozessüberwachungssystemen wurden eigens realitätsnahe Proben hergestellt. Hierfür wurden die Zellpole (EN AW-3003-H14) mit Aluminiumblättchen, welche dem Busbarwerkstoff (EN AW-1050A-H14) entsprechen, verschweißt. Es wurden sechs unterschiedliche Fehlerszenarien – wie sie auch in der Produktion auftreten – nachgestellt. Somit wurde für alle Prozessüberwachungssysteme die gleiche Ausgangslage geschaffen.

Für die Post-Prozessüberwachung wurden die Proben mittels Thermografie sowie anhand von Wirbelstromprüfungen auf Unregelmäßigkeiten untersucht. Weder die Thermografie noch die Wirbelstromprüfung brachten bezüglich der bewusst eingebrachten Unregelmäßigkeiten die gewünschten Ergebnisse. Die thermografischen Untersuchungen zeigten keinen relevanten Unterschied zwischen den fehlerhaften und fehlerfreien Proben. Hauptursache sind hier die physikalischen Eigenschaften der beiden Fügepartner, wie unter anderem die gute Wärmeleitung von Aluminium. Bei der Wirbelstromprüfung stellte sich heraus, dass die Signalanteile der unterschiedlichen IO-Nahtgeometrien (Raupenstrukturen) wesentlich dominanter als die gesuchten Fehlstellen sind, weshalb auch dieses Verfahren nicht als ZfP-Verfahren für die Prüfung von lasergeschweißten Batteriezellen in Frage kommt.

Im Gegensatz zu den oben genannten Verfahren lieferten die Untersuchungen der In(-situ)-Prozessüberwachungssysteme zufriedenstellende Ergebnisse. Der plasmofast processobserver konnte anhand der emittierten und reflektierten Strahlung von der Interaktion des Laserstrahls mit dem Werkstück alle eigens inszenierten Unregelmäßigkeiten deutlich feststellen. Der LDD-700 Sensor von IPG Laser GmbH sowie die OCT-Überwachungstechnologie von Lessmüller Lasertechnik GmbH, welche beide auf Interferometrie basieren, eignen sich ausgehend von den Erkenntnissen der durchgeführten Echtzeit-Versuche ebenfalls für die Prüfung von lasergeschweißten Batteriezellen. Verglichen mit dem plasmofast processobserver vermessen die beiden Interferometer in Echtzeit das Keyhole und liefern somit Echtzeitmessergebnisse.

## 7 AUSBLICK

Aus den praktischen Untersuchungen geht hervor, dass ausgehend von präzise eingestellten Schweißprozessen, die Qualitätssicherung von Aluminiumschweißverbindungen anhand ZfP-Methoden realisierbar ist. Die Ergebnisse aus den praktischen Untersuchungen beziehen sich innerhalb dieser Arbeit auf die Rundnaht und auf artgleiche Fügepartner. Ob diese Erkenntnisse auch für andere Nahttypen sowie für Schweißverbindungen artungleicher Werkstoffe geeignet ist, muss in Folgearbeiten überprüft werden. Ausblickend wäre auch die Untersuchung einer kombinierten Prozessüberwachung mittels Kamerasystem sinnvoll. Anhand der aufgenommenen Videos könnten Rückschlüsse auf die Ursache der vom Prozessüberwachungssystem als NIO bewertete Schweißnaht geschlossen werden.

## 8 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] „Ständig unter Strom“, *Der Spiegel*, Bd. 38, S. 80, 2014.
- [2] J. Fabian, F. Prossnigg, und N. Hochgatterer, „Lithium-Ion Batteries as Electrochemical Energy Storage within electrified Automobiles of the future“. 2018.
- [3] „ÖNORM EN ISO 6520-1: 2007-09, Schweißen und verwandte Prozesse — Einteilung von geometrischen Unregelmäßigkeiten an metallischen Werkstoffen Teil 1: Schmelzschweißen“.
- [4] „Automotive Battery - Battery Pack | Samsung SDI“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.samsungsdi.com/automotive-battery/products/prismatic-lithium-ion-battery-cell.html>. [Zugegriffen: 14-Okt-2018].
- [5] P. A. Schmidt, *Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen: Dissertation. Technische Universität München*. Herbert Utz Verlag, 2015.
- [6] A. Wiebelt, T. Isermeyer, T. Siebrecht, und T. Heckenberger, „Thermomanagement von Lithium-Ionen-Batterien“, *ATZ - Automob. Zeitschrift*, Bd. 111, Nr. 7, S. 500–504, Juli 2009.
- [7] A. Prassek, „Dynamische Energiebilanzierung verschiedener Traktionsbatteriesysteme“, Herrsching: Energie & Management-Verlag, 1996.
- [8] C. Allmann, *Verbundprojekt - Produktionsforschung zu Hochvoltspeichersystemen für die Elektromobilität*. Ingolstadt: AUDI AG, 2016.
- [9] R. Singer und J. Fleischer, „Demontagegerechtes Batteriemodul“, *ATZ - Automob. Zeitschrift*, 2018.
- [10] „EN ISO 13919-2:2004-07, Elektronen- und Laserschweißverbindungen – Richtlinie für Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten Teil 2: Aluminium und seine schweißgeeigneten Legierungen“.
- [11] DVS, „Merkblatt DVS 3203-2:2015-01, Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen - Prüfen von Schweißparametern“.
- [12] J. Neuer, H. Riegel, und M. Hofele, „Ermittlung von Prozessparametern für das Laserschweißen“, Deutschland, 2017.
- [13] D. Walter, V. R. Moldovan, und B. Schmieder, *NEUER LASERSCHWEISSPROZESS FÜR HERVORRAGENDE VERBINDUNGEN - PDF*. 2015, S. 10.
- [14] J. Skupin, *Nichtlinear dynamisches Modell zum Laserstrahlschweißen von Aluminiumlegierungen: Dissertation. Universität Bremen*. Shaker, 2004.
- [15] A. J. Birnesser, *Prozessregelung beim Laserstrahlschweißen*, Bd. 68. Herbert Utz Verlag, 2011.
- [16] E. Beyer, *Schweißen mit Laser: Grundlagen*. Springer-Verlag, 2013.
- [17] C. M. Schinzel, „Nd:YAG-Laserstrahlschweißen von Aluminiumwerkstoffen für Anwendungen im Automobilbau: Dissertation. Technische Universität Stuttgart“, S. 177, 2002.
- [18] „DIN EN ISO 15609-4:2009-10, Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe-Schweißanweisung-Teil 4: Laserstrahlschweißen“.
- [19] „Merkblatt DVS 3203-1:2017-06, Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen - Verfahren und Laserstrahlschweißanlage“.
- [20] „Merkblatt DVS 3203-3:2017-09, Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen - Schweißseignung metallischer Werkstoffe“.
- [21] „Merkblatt DVS 3203-4:2015-01, Laserstrahlschweißen von metallischen Werkstoffen - Nahtvorbereitung und konstruktive Hinweise“.
- [22] M. P. Groover, *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*, 3. Auflage. Upper Saddle River, 2008.
- [23] S. Huber, *In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen*, Bd. 286. Herbert Utz Verlag, 2014.
- [24] S. Kaielerle, *Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte: Schlussbericht zu dem IGF-Vorhaben der Forschungsstellen*

1. Laser Zentrum Han. 2014.
- [25] „Merkblatt DVS 3219:2015-01, Qualitätssichernde Sensorik während des Laserstrahlschweißens“.
- [26] M. Bastuck, B. Valeske, B. Wolfer, und H. G. Hierrmann, „Überwachung und Qualitätssicherung des Laserschweißprozesses ultrahochfester Karosseriestähle durch integrierte ZfP-Verfahren“, Saarbrücken, 2013.
- [27] M. G. Müller, *Laser in der Materialbearbeitung - Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen durch Auswertung der reflektierten Leistung*. Herbert Utz Verlag, 2002.
- [28] C. Kirby, P. Abels, A. Drenker, H. Nitsch, und E. Beyer, *Process monitoring for laser beam welding and applications*. In: Geiger, M. und Vollertsen, F. (Hrsg.): *Proc. of the 26th International CIRP Seminar on Manufacturing Systems (LANE)*. 1994. Bamberg: Meisenbach, 1994.
- [29] A. Gouffe, „Rev. d'Optique, 24, 1 (1945)“, *Google Sch.*
- [30] F. Dausinger, „Strahlwerkzeug Laser: Energieeinkopplung und Prozesseffektivität. Stuttgart: Teubner“, *Univ. Stuttgart, Habilit. der Mater. Forschungsberich-te des IFSW*, 1994.
- [31] I. Miyamoto und K. Mori, „Development of in-process monitoring system for laser welding“, in *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 1995, Bd. 1995, Nr. 1, S. 759–767.
- [32] E. Nava-Rüdiger und M. Houlot, „Integration of real time quality control systems in a welding process“, *J. Laser Appl.*, Bd. 9, Nr. 2, S. 95–102, 1997.
- [33] „Plasmo Industrietechnik GmbH“. [Online]. Verfügbar unter: [http://www.plasmo.eu/eu/wp-content/uploads/2016/03/2015-Datenblatt-ProcessObserver-advanced\\_D\\_opt.pdf](http://www.plasmo.eu/eu/wp-content/uploads/2016/03/2015-Datenblatt-ProcessObserver-advanced_D_opt.pdf). [Zugegriffen: 21-Dez-2018].
- [34] „Precitec Optronic GmbH“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.precitec.de/produkte/fuegetechnologie/prozessueberwachung/laser-welding-monitor/>. [Zugegriffen: 21-Dez-2018].
- [35] „Lessmüller Lasertechnik GmbH“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.lessmueller.de/products/weldcheck>. [Zugegriffen: 21-Dez-2018].
- [36] „4D Ingenieurgesellschaft für Technische Dienstleistungen GmbH“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.4d-gmbh.de/>. [Zugegriffen: 21-Dez-2018].
- [37] P. Norman, H. Engström, und A. F. H. Kaplan, „Theoretical analysis of photodiode monitoring of laser welding defects by imaging combined with modelling“, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, Bd. 41, Nr. 19, S. 195502, 2008.
- [38] K. W. Bonfig und Z. Liu, *Virtuelle Instrumente und Signalverarbeitung*. VDE Verlag, 2004.
- [39] R. Poprawe, „Lasertechnik für die Fertigung–Grundlagen, Perspektiven und Beispiele für den innovativen Ingenieur (Laser technology for manufacturing processes–basics, perspectives and examples for innovative engineers)“. Springer, Berlin Google Scholar, 2005.
- [40] H. J. Tiziani, „Optische Interferometrie in der Meßtechnik“, 1993.
- [41] W. Stolz, „Schwingungen und Wellen“, in *Starthilfe Physik*, Springer, 2005, S. 34–40.
- [42] D. Meschede, *Optik, Licht und Laser*. Springer-Verlag, 2009.
- [43] „OCT - Nahtführung & Überwachungssystem“. [Online]. Verfügbar unter: <http://www.lessmueller.de/products/oct>. [Zugegriffen: 29-Dez-2018].
- [44] „Welding Process Monitor for Laser Depth Measurement | IPG“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ipgphotonics.com/en/products/beam-delivery/process-monitoring/process-monitoring/ldd-700>. [Zugegriffen: 29-Dez-2018].
- [45] „Schweißnaht-Inspektion mit OCT“, *Laser - Entwicklung und Ind. Anwendung*, Bd. 3, S. 16–17.
- [46] U. Siemer, „Einsatz der Thermografie als zerstörungsfreies Prüfverfahren in der Automobilindustrie: Entwicklung einer Ingenieurplattform“, Universität des Saarlandes, 2010.
- [47] S. Ulrich, A. Klisch, S. Jahn, und S. Keitel, „Thermografische Untersuchungen beim Laserstrahlschweißen mit Faserlaser hoher Brillianz“, Halle (Saale), 2018.
- [48] „DIN 54190-1:2004-08, Zerstörungsfreie Prüfung - Thermografische Prüfung - Teil 1:

- Allgemeine Grundlagen“.
- [49] K. Heller, *Analytische Temperaturfeldbeschreibung beim Laserstrahlschweißen für thermographische Prozessbeobachtung*, Bd. 86. Herbert Utz Verlag, 2017.
- [50] A. N. Brink, „Einsatz der Impuls-Thermografie zur quantitativen zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen“, 2005.
- [51] D. Weller *u. a.*, „Online Crack Detection During Laser Welding Using Passive Thermography“, 2015. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.wlt.de/lim/Proceedings/Stick/PDF/Contribution266\\_final.pdf](https://www.wlt.de/lim/Proceedings/Stick/PDF/Contribution266_final.pdf). [Zugegriffen: 05-Jän-2019].
- [52] „ThermoProfilScanner“. [Online]. Verfügbar unter: <https://hks-prozesstechnik.de/produkte/thermoprofilscanner/>. [Zugegriffen: 05-Jän-2019].
- [53] „InfraTec GmbH-Infrarotsensorik und Messtechnik“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.infratec.de/thermografie/waermebildkamas/>. [Zugegriffen: 05-Jän-2019].
- [54] „Aktive Thermografie“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/Flyer\\_Aktive\\_Thermografie\\_de.pdf](https://www.infratec.de/fileadmin/downloads/pdf/Flyer_Aktive_Thermografie_de.pdf). [Zugegriffen: 05-Jän-2019].
- [55] „DIN 54192:2010-11, Zerstörungsfreie Prüfung - Aktive Thermografie“.
- [56] „thyssenkrupp System Engineering GmbH-Aktive Thermografie zur zerstörungsfreien Qualitätsprüfung in der Batterieproduktion“.
- [57] C. Döttinger, „Qualitätskontrolle bei Laserschweißnähten: Wärmefluss-Thermografie mit Infrarotkamas“, *Laser Tech. J.*, Bd. 6, Nr. 6, S. 23–25, 2009.
- [58] „Heitronics Infrarot Messtechnik GmbH - Thermografiesysteme“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heitronics.com/de/infrarot-messtechnik/produkte/thermographie/>. [Zugegriffen: 06-Jän-2019].
- [59] W. B. Klemmt, „Wirbelstromprüfung an Flugzeugstrukturen mit SQUID's“, *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, 1998. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ndt.net/article/v04n01/dglrsqui/dglrsqui.htm>. [Zugegriffen: 30-Jän-2019].
- [60] „Im Fokus: Wirbelstromprüfung - Lufthansa Technik AG“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.lufthansa-technik.com/de/eddy-current-testing>. [Zugegriffen: 30-Jän-2019].
- [61] „ROHMANN Produkte Wirbelstrom-Prüfgeräte und -Systeme“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rohmann.com/produkte/>. [Zugegriffen: 30-Jän-2019].
- [62] „Wie entsteht Wirbelstrom? - Rohmann GmbH“. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.rohmann.com/faq/wie-entsteht-wirbelstrom/>. [Zugegriffen: 30-Jän-2019].
- [63] „Welding Process Monitor for Laser Depth Measurement | IPG“. [Online]. Verfügbar unter: [https://www.ipgphotonics.com/en/products/beam-delivery/process-monitoring/process-monitoring/ldd-700#\[optical-characteristics-1\]](https://www.ipgphotonics.com/en/products/beam-delivery/process-monitoring/process-monitoring/ldd-700#[optical-characteristics-1]). [Zugegriffen: 26-Feb-2019].

## 9 ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2-1: Zelle mit prismatischer Bauform [4] .....	4
Abbildung 2-2: Derzeit verwendete Zelltypen in Lithium-Ionen-Batteriesystemen; Rundzelle (links); Prismatische Zelle (mittig); Pouch-Zelle (rechts) [6].....	4
Abbildung 2-3: Aufbau einer prismatischen Samsung SDI Lithium-Ionen-Zelle [SDIBS, confidential].....	4
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung eines Batteriesystems [7].....	5
Abbildung 2-5: Zellen mit Zellverbindern verbunden (Batteriemodul) [SDIBS, confidential] .....	6
Abbildung 2-6: Produktentwicklungszyklus eines automotiven Batteriesystems von der Zelle bis zum Batteriepack in Serienfertigung [2].....	6
Abbildung 2-7: Produktportfolio markterhältlicher Batteriesysteme von SAMSUNG SDI Battery Systems [2].....	7
Abbildung 2-8: Aufbau der Roboterzelle mit Ytterbium Faser Laser System YLS-1500, [SDIBS, confidential].....	8
Abbildung 2-9: Verbindungsstellen zwischen den Zellen [9].....	9
Abbildung 2-10: Entwicklung der idealen Schweißparameter [Dokument: FCA_PROCESS_CCU-WELDING_V1.1, SDIBS, confidential].....	10
Abbildung 2-11: Darstellung wichtiger geometrischer Kenngrößen von Laserstrahlen; in Anlehnung an [11].....	11
Abbildung 2-12: Einfluss der Fokusslage auf die Schweißnahtgeometrie (Makroschliff) [12] .....	12
Abbildung 2-13: Schweißnahtausführung [Dokument: FCA_PROCESS_CCU-WELDING_V1.1, SDIBS, confidential].....	12
Abbildung 2-14: Beispiel: Kreisförmige Wobbelgeometrie bei 0,5 mm Amplitude [13]..	13
Abbildung 2-15: Schweißbereich auf den Zellpolen [SDIBS, confidential].....	13
Abbildung 2-16: Verfahrensvarianten Laserstahlschweißen [16].....	14
Abbildung 2-17: Erstarrungs- bzw. Heißrisse in der Fügeverbindung (NIO), [SDIBS, confidential].....	21
Abbildung 2-18: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Risse [10].....	22
Abbildung 2-19: Längsschliff Zellpol: vereinzelte Poren sowie eine sehr große Pore in der Nahtwurzel (NIO), [SDIBS, confidential] .....	22
Abbildung 2-20: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Poren [10].....	23
Abbildung 2-21: Ausgeschleuderte Schmelze infolge einer Kunststoffverunreinigung, [SDIBS, confidential] .....	23
Abbildung 2-22: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Nahtüberhöhung [10] .....	24
Abbildung 2-23: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Nahtunterwölbung [10] .....	24
Abbildung 2-24: Auszug aus DIN EN ISO 13919-2, Grenzwerte für Risse [10].....	24
Abbildung 2-25: Verschmutzte Linse der Schweißoptik infolge eines Schweißspritzers, [SDIBS, confidential] .....	25
Abbildung 2-26: Maximalabstand $X_{max}$ zwischen Zellpol und Zellverbinder, [SDIBS, confidential].....	26
Abbildung 2-27: Querschliffbild Zellpol: Mindestabstand $S_{min}$ zwischen Schweißnaht und Befestigungsniete, [SDIBS, confidential] .....	26
Abbildung 2-28: Maximale Höhendifferenz $Z_{max}$ zwischen den Zellpolen, [SDIBS, confidential].....	26
Abbildung 2-29: Maximale Temp. Innerhalb der Zelle, [SDIBS, confidential] .....	28

Abbildung 2-30: Verifikationsprozedur für Schweißfehler und NOK Bewertungen, [Dokument: FCA_PROCESS_CCU-WELDING_V1.1, SDIBS, confidential].....	29
Abbildung 3-1: Offline-, Inline- und Online-Erfassung von Indikatoren innerhalb eines Fertigungsprozesses [22].....	33
Abbildung 3-2: Unterteilung in Präprozess, In-situ-Prozess und Postprozess [23].....	33
Abbildung 3-3: Indikatoren zur Online-Prozessüberwachung beim Laserstrahlschweißen [27].....	35
Abbildung 3-4: Sensorikanordnung [15].....	36
Abbildung 3-5: Messung der Prozessekondärstrahlung (extern) und reflektierten Laserstrahlung (koaxial) [24].....	36
Abbildung 3-6: Abhängigkeit des Gesamtabsorptionsgrad des Keyholes vom Schachtverhältnis für die Werkstoffe Eisen und Aluminium [27].....	37
Abbildung 3-7: Reflexionsgrad in Abhängigkeit der Einschweißtiefe für die Werkstoffe Eisen und Aluminium mit und ohne Plasmaeinfluss [27].....	38
Abbildung 3-8:Aufbau des Laser Welding Monitor (LMW) der Firma Precitec Optronic GmbH [23].....	41
Abbildung 3-9: Signalauswertung mithilfe von Hüllkurven [23].....	42
Abbildung 3-10: Prinzipieller Aufbau eines Michelson-Interferometers.....	43
Abbildung 3-11: Prinzipieller Aufbau eines Weißlicht-Interferometers [39].....	44
Abbildung 3-12: Integration des OCT-Nahtführungs- und Überwachungssystem in die Schweißoptik [43].....	45
Abbildung 3-13: Wichtige Begriffsdefinitionen nach DIN 54190-1 [48].....	46
Abbildung 3-14: Thermoprofilscanner der HKS Prozesstechnik GmbH [53].....	47
Abbildung 3-15: Ablauf der aktiven Thermografieprüfung, in Anlehnung an [46].....	47
Abbildung 3-16: Prinzipdarstellung der aktiven Thermografie [46].....	48
Abbildung 3-17: Prüfanordnungen in der aktiven Thermografie [46].....	49
Abbildung 3-18: Entstehung des Magnetfeldes in einer Spule [62].....	50
Abbildung 3-19: Entstehung von Wirbelstrom im Prüfmaterial [62].....	50
Abbildung 3-20: Auswirkung des Wirbelstroms im Prüfmaterial [62].....	51
Abbildung 3-21: Wirbelstrom im Prüfmaterial mit Unregelmäßigkeit [62].....	51
Abbildung 4-1: Probe1_Probe2 (kurz P1_P2).....	53
Abbildung 4-3: Digitalmikroskop Leica DVM6 M bei Samsung SDIBS GmbH.....	54
Abbildung 4-4: Probe P1_P2; hochauflösende Oberflächenbilder.....	55
Abbildung 4-5: Computertomographie Aufbau (ÖGI).....	55
Abbildung 4-6: CT-Bilder von P1_P2.....	56
Abbildung 4-7: Prüfposition der Sonde (links); Verwendetes Prüfequipment (rechts)...	56
Abbildung 4-8: Wirbelstromsignal Spalterkennung.....	57
Abbildung 4-9: Rotierende Tellersonde.....	57
Abbildung 4-10: Probenszenario 3 und 4; unterbrochenes Signal.....	58
Abbildung 4-11: Probenszenario 1; durchgehendes Signalbild.....	58
Abbildung 4-12: Probenszenario 5 und 6; Nahteinfall (ebene Naht).....	59
Abbildung 4-13: Versuchsaufbau; blitzthermografische Messung.....	60
Abbildung 4-14:Temperaturbild einer Messung; 205 ms nach dem Blitzpuls; Oben: P23_P24; Unten: P1_P2 (Referenz).....	60
Abbildung 4-15: Auswertung: Oben Probe P23_P24 (mit Spalt 0,5 mm); Unten Probe P1_P2 (Referenz).....	61
Abbildung 4-16: Versuchsaufbau; induktiv-thermografische Messung.....	62
Abbildung 4-17: Temperaturbild der Probe P1.....	62
Abbildung 4-18: Auswertung: Probe P1.....	63
Abbildung 4-19: Versuchsaufbau bei IPG Laser GmbH.....	65
Abbildung 4-20: Hauptkomponenten des LDD-700 Inline-Schweißprozessmonitors ....	65

Abbildung 4-21: LDD-700 Steuereinheit [63] .....	66
Abbildung 4-22: mögliche Überwachungsmodi des LDD-700 [63] .....	66
Abbildung 4-23: Benutzeroberfläche der OmniWELD Scanning-Software .....	67
Abbildung 4-24: Probe 1; Draufsicht auf Schweißnaht .....	68
Abbildung 4-25: Probe 1; Keyholemessung (oben); Messung der Schweißnahtbreite (mittig); Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (unten).....	68
Abbildung 4-26: Probe 2 (links); Probe 3 (rechts);.....	69
Abbildung 4-27: Probe 3; Keyholemessung.....	69
Abbildung 4-28: Schweißlänge verkürzt .....	69
Abbildung 4-29: Probe 4; Keyholemessung.....	70
Abbildung 4-30: Probe 1; Keyholemessung - Referenzschweißung.....	70
Abbildung 4-31: Probe 5; Spalt von 0,4 mm, Nahteinfall .....	70
Abbildung 4-32: Probe 5; Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (Höhe der Busbaroberfläche).....	70
Abbildung 4-33: Probe 6; Spalt von 0,4 mm, Nahteinfall .....	71
Abbildung 4-34: Probe 6; Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (Höhe der Busbaroberfläche).....	71
Abbildung 4-35: Probe 7; Vollflächig aufgebracht Kleber .....	72
Abbildung 4-36: Probe 7; Poröse Schweißnaht infolge des Klebers .....	72
Abbildung 4-37: Probe 7; Unverschweißte Fügepartner .....	72
Abbildung 4-38: Probe 7; Keyholemessung.....	73
Abbildung 4-39: Probe 7; Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (Höhe der Busbaroberfläche).....	73
Abbildung 4-40: Probe 8; Kleber auf halbe Zellpolfläche aufgebracht.....	73
Abbildung 4-41: Probe 8; Keyholemessung.....	74
Abbildung 4-42: Probe 8; Referenzpunktmessung neben der Schweißnaht (Höhe der Busbaroberfläche).....	74
Abbildung 4-43: Probe 8; Kleber am Zellpol (Stecknadelgröße).....	74
Abbildung 4-44: Probe 10; Verunreinigung der Busbaroberfläche durch Fahrradöl .....	75
Abbildung 4-45: Probe 10; Nahtverfärbung .....	75
Abbildung 4-46: Probe 11; Verunreinigung der Busbaroberfläche durch Fahrradöl .....	76
Abbildung 4-47: Probe 11; Nahtverfärbung .....	76
Abbildung 4-48: Probe 11; Keyholemessung.....	76
Abbildung 4-49: Probe 12; keine sichtbaren Nahtauffälligkeiten .....	77
Abbildung 4-50: Probe 12; Keyholemessung.....	77
Abbildung 4-51: Probe 13; Sichtbarer Bereich der Leistungserhöhung .....	77
Abbildung 4-52: Probe 13; Keyholemessung.....	77
Abbildung 4-53: Probe 14; Oberflächenporen .....	78
Abbildung 4-54: Probe 14; Verschmutztes Schutzglas.....	78
Abbildung 4-55: Probe 14; Keyholemessung.....	78
Abbildung 4-56: Versuchsaufbau bei Lessmüller Lasertechnik .....	79
Abbildung 4-57: OCT-Bild (links); OCT-Bild mit Grenzen (rechts).....	80
Abbildung 4-58: Graph für Auswertung.....	80
Abbildung 4-59: Gesamtansicht des OCT-Players .....	81
Abbildung 4-60: Probe 2; Evaluation: OCT_POST_PROCESS_SIMPLE_DIST_MEAN .....	81
Abbildung 4-61: Probe 2; Evaluation: OCT_POST_PROCESS_SIMPLE .....	82
Abbildung 4-62: Probe 14; Evaluation: OCT_POST_PROCESS_SIMPLE_DIST_MEAN .....	82
Abbildung 4-63: Probe 14; Evaluation: OCT_POST_PROCESS_SIMPLE_DIST_MEAN .....	83

Abbildung 4-64: Probe 19; Evaluation: OCT_POST_PROCESS_SIMPLE .....	83
Abbildung 4-65: Probe 23; Evaluation: OCT_POST_PROCESS_SIMPLE .....	84
Abbildung 4-66: Integration des plasmoprozessobservers in die Lasertechnik von Samsung SDIBS .....	85
Abbildung 4-67: Über Kameraadapter realisierte Integration der plasmofaser am Schweißkopf (links); über off-axialen Halter realisierte Integration der plasmofaser am Schweißkopf (rechts) .....	86
Abbildung 4-68: SiB „Dynamisch Absolute Schwellen“; Probe 1716 (helle Kurve), 1717 und 1720 .....	87
Abbildung 4-69: Probe 1716; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	87
Abbildung 4-70: SiA „Absolute Grenzen“ (Messsignal der Kameraintegration); Probe 1721 und 1722 .....	88
Abbildung 4-71: Probe 1721; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	88
Abbildung 4-72: SiA „Signaldynamik“; Probe 1723 und 1724 .....	89
Abbildung 4-73: Probe 1723; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	89
Abbildung 4-74: SiB „Dynamisch Absolute Schwellen“; Probe 1725 und 1726 .....	90
Abbildung 4-75: Probe 1725; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	90
Abbildung 4-76: SiA „Nahtlänge“; Probe 1727 .....	91
Abbildung 4-77: Probe 1727; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	91
Abbildung 4-78: SiB „Dynamisch absolute Schwellen“; Probe 1728 .....	92
Abbildung 4-79: Probe 1728; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	92
Abbildung 4-80: Probe 1718; Referenzschweißung; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	92
Abbildung 4-81: SiA „Dynamisch Absolute Schwellen“; Probe 1729 .....	93
Abbildung 4-82: Probe 1729; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	93
Abbildung 4-83: Probe 1718; Referenzschweißung; Querschliff links und rechts (Rundnaht) .....	93
Abbildung 4-84: SiB „Signaldynamik“; Probe 1730 .....	94
Abbildung 4-85: SiA „Dynamisch Absolute Schwellen“; Probe 1731 .....	95

## 10 TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1: Technische Daten einer prismatischen Samsung SDI Lithium-Ionen-Zelle [SDIBS, confidential] .....	5
Tabelle 2-2: Kenngrößen von Strahlquelle und Objektiv .....	8
Tabelle 2-3: Schweißparameter für das Laserstrahlschweißen von Batteriemodulen [SDIBS, confidential] .....	11
Tabelle 2-4: Elektrische Leitfähigkeit und Mechanische Eigenschaften nach DIN EN 485-2 von Busbarwerkstoff und Zellpolwerkstoff .....	15
Tabelle 2-5: Vergleich physikalischer Eigenschaften von Aluminium und Eisen [5], [17] .....	15
Tabelle 2-6: Verwendete Normen für den Laserschweißprozess bei Samsung SDIBS	16
Tabelle 2-7: Hauptgruppen von geometrischen Unregelmäßigkeiten in ÖNORM EN ISO 6520-1, Auszug aus [3] .....	17
Tabelle 2-8: Kurzbezeichnung diverser Rissarten in ÖNORM EN ISO 6520-1 [3] .....	18
Tabelle 2-9: Bewertungsgruppen für Unregelmäßigkeiten; Auszug aus [10] .....	18
Tabelle 2-11: Beispiel Unregelmäßigkeit – Riss; Auszug aus [10] .....	19
Tabelle 2-12: Unregelmäßigkeiten laut Norm EN ISO 6520-1 [3] .....	21
Tabelle 2-13: Übersicht der Zielgrößen, [Dokument: FCA_PROCESS_CCU-WELDING_V1.1, SDIBS, confidential] .....	28
Tabelle 2-14: Überblick über die derzeitige Qualitätssicherung, [SDIBS, confidential]..	29
Tabelle 3-1: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme unter Verwendung von Photodioden .....	40
Tabelle 3-2: Interferometer-Grundtypen [42] .....	42
Tabelle 3-3: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme auf Basis von Interferometern .....	42
Tabelle 3-4: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme auf Basis von passiver Thermografie .....	46
Tabelle 3-5: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme auf Basis von aktiver Thermografie .....	49
Tabelle 3-6: Kommerziell erhältliche Prozessüberwachungssysteme auf Basis induzierter Wirbelströme .....	49
Tabelle 3-7: Gegenüberstellung wesentlicher Vor- und Nachteile der einzelnen ZfP-Methoden .....	52
Tabelle 4-1: Szenarien für die Post-Prozessüberwachung .....	54
Tabelle 4-2: Überprüfte Fehlerszenarien; LDD-700 .....	64
Tabelle 4-3: Optisches Setup .....	64
Tabelle 4-4: Schweißparameter .....	64
Tabelle 4-5: Probe 1; Einschweißtiefe und Höhe der Busbaroberfläche Referenzwerte für die folgenden Schweißversuche .....	68
Tabelle 4-6: Probe 3; Einschweißtiefe; Vergleich mit der Referenzschweißung .....	69
Tabelle 4-7: Probe 5; Höhe der Busbaroberfläche; Vergleich mit der Referenzschweißung .....	70
Tabelle 4-8: Probe 6; Höhe der Busbaroberfläche; Vergleich mit der Referenzschweißung .....	71
Tabelle 4-9: Probe 7; Einschweißtiefe; Vergleich mit der Referenzschweißung .....	73
Tabelle 4-10 :Probe 7; Höhe der Busbaroberfläche, Vergleich mit der Referenzschweißung .....	73
Tabelle 4-11: Probe 8; Einschweißtiefe, Vergleich mit der Referenzschweißung .....	74
Tabelle 4-12: Probe 8; Höhe der Busbaroberfläche, Vergleich mit der Referenzschweißung .....	74

Tabelle 4-13: Ausgewählte Proben für die Post-Prozessüberwachung .....	79
Tabelle 4-14: Inszenierte Fehlerszenarien; plasmo fpso .....	85
Tabelle 5-1: Post-Prozess; mögliche Fehlertyperkennung .....	96
Tabelle 5-2: In(-situ)-Prozess; mögliche Fehlertypenerkennung .....	96
Tabelle 11-1: Hauptgruppe 1; wichtige Risse; Auszug aus [3] .....	109
Tabelle 11-2: Hauptgruppe 2; wichtige Hohlräume; Auszug aus [3].....	110
Tabelle 11-3: Hauptgruppe 3; feste Einschlüsse; Auszug aus [3] .....	111
Tabelle 11-4: Hauptgruppe 4; Bindefehler; Auszug aus [3] .....	111
Tabelle 11-5: Hauptgruppe 4; ungenügende Durchschweißung; Auszug aus [3].....	112
Tabelle 11-6: Hauptgruppe 6; Beispiel: Einbrandkerbe; Auszug aus [3] .....	112
Tabelle 11-7:Hauptgruppe 5; Form- und Maßabweichungen; Auszug aus [3] .....	113
Tabelle 11-8: Hauptgruppe 6; Sonstige Unregelmäßigkeiten; Auszug aus [3] .....	114
Tabelle 11-9: Oberflächenbilder P1 bis P12 .....	117
Tabelle 11-10: Oberflächenbilder P13 bis P24 .....	118

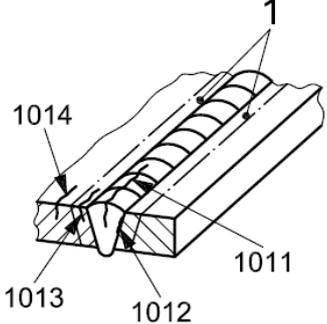
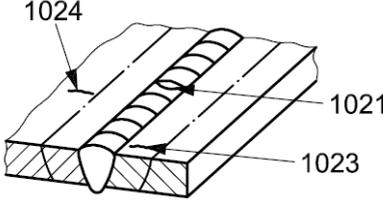
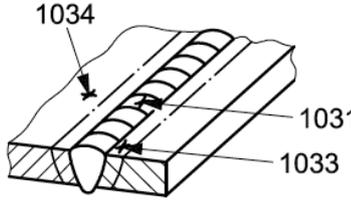
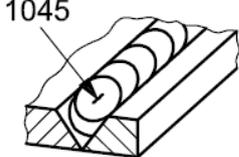
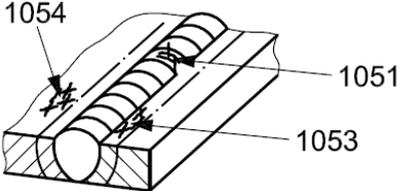
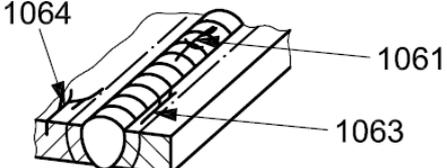
## 11 ANHANG

### 11.1 ÖNORM EN ISO 6520-1 – Unregelmäßigkeiten laut Hauptgruppen

#### Hauptgruppe 1 – Risse:

Risse treten an den unterschiedlichsten Orten der Schweißverbindung auf, wie aus Tabelle 11-1 ersichtlich ist.

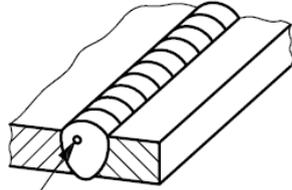
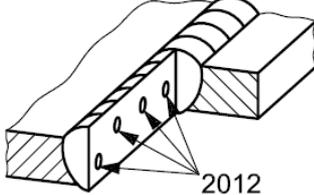
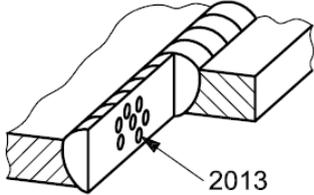
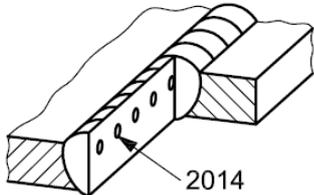
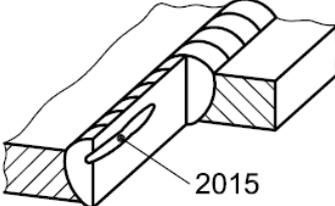
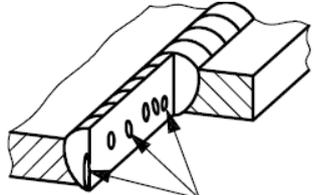
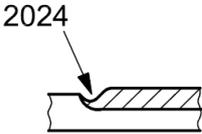
Tabelle 11-1: Hauptgruppe 1; wichtige Risse; Auszug aus [3]

Benennung	Darstellung
Längsriss	
Querriss	
Sternförmige Risse	
Kraterriss	
Rissanhäufung	
Verästelte Risse	

**Hauptgruppe 2 – Hohlräume:**

Werden durch eingeschlossenes Gas in der Schweißnaht gebildet (siehe Tabelle 11-2). Dazu kommt es aufgrund mangelnden Gasschutzes des Schmelzbades oder wenn zu viel Feuchtigkeit im Nahtbereich vorhanden ist.

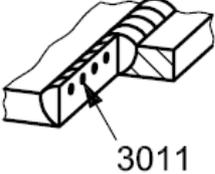
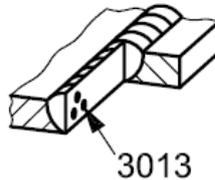
Tabelle 11-2: Hauptgruppe 2; wichtige Hohlräume; Auszug aus [3]

Benennung/ Beschreibung	Darstellung
Pore: darunter versteht man einen kugelförmigen Gaseinschluss	 <p>2011</p>
Gleichmäßig verteilte Porosität: Anzahl von Poren, die im Wesentlichen gleichmäßig im Schweißgut verteilt sind; nicht zu verwechseln mit der Porenzeile (2014) und mit dem Porennest (2013)	 <p>2012</p>
Porennest: unregelmäßige örtliche Anhäufung von Poren	 <p>2013</p>
Porenzeile: Reihe von Poren, parallel zur Achse der Schweißnaht angeordnet	 <p>2014</p>
Gaskanal: langgestreckter Hohlraum mit seiner größten Abmessung etwa parallel zur Achse der Schweißnaht	 <p>2015</p>
Schlauchpore: röhrenförmiger Hohlraum im Schweißgut, hervorgerufen durch ausgeschiedenes Gas. Meist sind sie zu Nestern gruppiert und fischgrätenartig verteilt. Einige Schlauchporen können zur Oberfläche der Schweißnaht offen sein.	 <p>2016</p>
Endkraterlunker Lunker am Ende einer Schweißraupe, der weder vor noch durch nachfolgende Schweißraupen beseitigt wurde.	 <p>2024</p>

### Hauptgruppe 3 – feste Einschlüsse

Darunter versteht man feste Fremdstoffeinlagerungen wie z.B. die in Tabelle 11-3 dargestellten Schlackeneinschlüsse.

Tabelle 11-3: Hauptgruppe 3; feste Einschlüsse; Auszug aus [3]

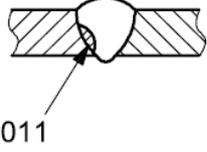
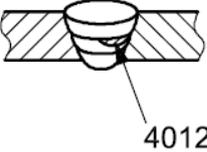
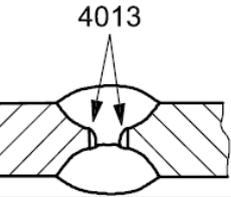
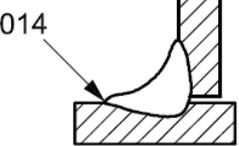
Benennung	Darstellung
Zeilenförmige Schlackeneinschlüsse	
Vereinzelte Schlackeneinschlüsse	
Örtlich gehäufte Schlackeneinschlüsse	

Man unterscheidet auch noch Flussmitteleinschlüsse, Oxideinschlüsse und Fremdmetalleinschlüsse. Auch bei diesen wird gleich wie bei den Schlackeneinschlüssen in zeilenförmig, vereinzelt und örtlich gehäuft unterschieden. [3]

### Hauptgruppe 4 – Bindefehler und ungenügende Durchschweißung

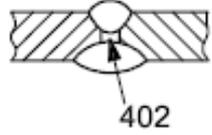
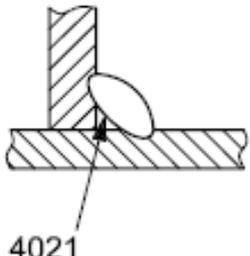
Die unterschiedlichen Bindefehler werden in Tabelle 11-4 aufgelistet.

Tabelle 11-4: Hauptgruppe 4; Bindefehler; Auszug aus [3]

Benennung	Darstellung
Flankenbindefehler	
Lagenbindefehler	
Wurzelbindefehler	
Mikrobindefehler	

Von ungenügender Durchschweißung (siehe Tabelle 11-5) spricht man, wenn der tatsächliche Einbrand (1) vom Soll einbrand (2) abweicht. Ein ungenügender Wurzeleinbrand zählt ebenfalls zur ungenügenden Durchschweißung und liegt vor, wenn eine oder beide Stegflanken der Wurzel nicht aufgeschmolzen sind.

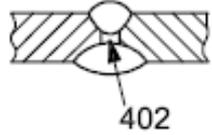
Tabelle 11-5: Hauptgruppe 4; ungenügende Durchschweißung; Auszug aus [3]

Benennung	Darstellung
Ungenügende Durchschweißung	
Ungenügender Wurzeleinbrand	

**Hauptgruppe 5 – Form- und Maßabweichungen:**

Eine unvollkommene Form der äußeren Oberfläche der Schweißung oder eine mangelhafte Geometrie der Verbindung wird als Formfehler 500 bezeichnet. Typische Formfehler sind z.B. Einbrandkerben, welche als Vertiefung beim Schweißen an den Nahtübergängen oder der Wurzel entstehen (siehe Tabelle 11-6). [3]

Tabelle 11-6: Hauptgruppe 6; Beispiel: Einbrandkerbe; Auszug aus [3]

Benennung	Darstellung
Einbrandkerben	

In Tabelle 11-7 sind die Unregelmäßigkeiten ohne Berücksichtigung der 4. Stelle – welche die Lage der Unregelmäßigkeit angibt – überblicksmäßig zusammengefasst.

Tabelle 11-7:Hauptgruppe 5; Form- und Maßabweichungen; Auszug aus [3]

<b>Referenz Nr.</b>	<b>Benennung, Unregelmäßigkeit</b>	<b>Erklärung</b>
502	zu große Nahtüberhöhung	bei Stumpfnähten
503	zu große Nahtüberhöhung	bei Kehlnähten
504	zu große Wurzelüberhöhung	übermäßig große Schweißgutmenge infolge Wurzeldurchtropfung
505	schroffer Nahtübergang	fehlerhaftes Nahtprofil
506	Schweißgutüberlauf	übermäßige Menge Schweißgut, die die Oberfläche des Grundwerkstoffes ohne Aufschmelzung bedeckt
507	Kantenversatz	Versatz zwischen zwei verschweißten Teilen (Oberfläche parallel)
508	Winkelversatz	Versatz zwischen zwei verschweißten Teilen (Oberfläche nicht parallel)
509	verlaufendes Schweißgut	durch Schwerkraft hervorgerufenes verlaufenes Schweißgut
510	Durchbrand	Durchbrand im Schmelzbad, der ein durchgehendes Loch in der Schweißnaht verursacht
511	Decklagenunterwölbung	längs durchgehende oder unterbrochene Vertiefung in der Nahtoberfläche infolge fehlenden Schweißguts
512	übermäßige Ungleichschenkligkeit bei Kehlnähten	Erklärung nicht notwendig
513	unregelmäßige (Naht-) Breite	übermäßige Schwenkung der Nahtbreite
514	unregelmäßige Nahtzeichnung	übermäßige Oberflächenrauheit
515	Wurzelrückfall	flache Vertiefung in der Wurzellage infolge Schwindung bei einer Stumpfnah
516	Wurzelporosität	schwammige Ausbildung der Nahtwurzel als Folge von Blasenbildungen des Schweißgutes bei der Erstarrung
517	Ansatzfehler	örtliche Unregelmäßigkeit beim Wiederezünden
520	zu großer Verzug	Maßabweichung infolge von Schrumpfung und Verzug beim Schweißen
521	mangelhafte Abmessungen der Schweißung	Abweichung von den vorgeschriebenen Maßen der Schweißung

### Hauptgruppe 6 – Sonstige Unregelmäßigkeiten

Unter sonstige Unregelmäßigkeiten 600 versteht man Unregelmäßigkeiten, die nicht in die Gruppen 1 bis 5 eingeordnet werden können. [3] Gleich wie bei Hauptgruppe 5, zeigt Tabelle 11-8 ebenfalls nur sonstige Unregelmäßigkeiten ohne Berücksichtigung der 4. Stelle (Lage).

Tabelle 11-8: Hauptgruppe 6; Sonstige Unregelmäßigkeiten; Auszug aus [3]

Referenz Nr.	Benennung, Unregelmäßigkeit	Erklärung
601	Zündstelle	örtliche Beschädigung der Werkstückoberfläche durch Brennen oder Zünden des Lichtbogens
602	Spritzer	während des Schweißens entstehende Spritzer, die aus dem Schweißgut bzw. Zusatzwerkstoff stammen
603	Ausbrechung	beschädigte Oberfläche als Folge des Entfernens von temporären Fertigungshilfsmitteln durch Abbrechen
604	Schleifkerbe	örtliche Beschädigung durch Schleifen
605	Meißelkerbe	örtliche Beschädigung durch Anwendung eines Meißels oder anderer Werkzeuge
606	Unterschleifung	mangelnde Dicke des Werkstücks durch übermäßiges Schleifen
607	Heftnahtunregelmäßigkeit	Unregelmäßigkeit als Folge einer fehlerhaften Heftschweißung
608	Nahtversatz gegenüberliegender Schweißraupen	Abstand zwischen den Mittellinien von zwei Raupen von gegenüberliegenden Schweißungen
610	Anlauffarben	leicht oxidierte Oberfläche im Schweißbereich
613	verzunderte Oberfläche	stark oxidierte Oberfläche im Schweißbereich
614	Flussmittelrest	Flussmittel wurde nicht ausreichend von der Oberfläche entfernt
615	Schlackenrest	anhaftende Schlacke ist nicht ausreichend von der Schweißnaht entfernt worden
617	schlechte Passung bei Kehlnähten	übermäßiger oder mangelhafter Stirnflächenabstand zwischen den zu verbindenden Teilen
618	Schwellung	Unregelmäßigkeit, bedingt durch Überhitzung einer geschweißten Leichtmetallverbindung, hervorgerufen durch eine verzögerte Haltezeit

## 11.2 Genannte Firmen und Forschungseinrichtungen

### **SAMSUNG SDI Battery Systems GmbH**

Frikusweg 1  
8141 Premstätten, Österreich  
[www.samsungsdibs.at](http://www.samsungsdibs.at)

### **plasmo Industrietechnik GmbH**

Dresdner Str. 81-85  
1200 Wien, Österreich  
[www.plasmo.eu](http://www.plasmo.eu)

### **Lessmüller Lasertechnik GmbH**

Gollierstraße 12  
80339 München, Deutschland  
[www.lessmueller.de](http://www.lessmueller.de)

### **Österreichisches Gießerei-Institut**

Parkstraße 21  
8700 Leoben, Österreich  
[www.ogi.at](http://www.ogi.at)

### **IPG Laser GmbH**

Carl-Benz-Straße 28  
57299 Burbach, Deutschland  
[www.ipgphotonics.com](http://www.ipgphotonics.com)

### **Rohmann GmbH**

Carl-Benz-Straße 23  
67227 Frankenthal (Pfalz), Deutschland  
[www.rohmann.com](http://www.rohmann.com)

### **Department Product Engineering Montanuniversitaet Leoben**

Peter-Tunner-Strasse 25  
8700 Leoben, Österreich  
<https://automation.unileoben.ac.at/>

### **Precitec Optronik GmbH**

Schleussnerstraße 54  
63263 Neu-Isenburg, Deutschland  
[www.precitec.de](http://www.precitec.de)

### **4D Ingenieurgesellschaft für Technische Dienstleistungen GmbH**

Im Torfstich 5  
30916 Isernhagen, Deutschland  
[www.4d-gmbh.de](http://www.4d-gmbh.de)

**HKS Prozeßtechnik GmbH**

Heinrich-Damerow-Straße 2  
06120 Halle (Saale), Deutschland  
<https://hks-prozesstechnik.de/>

**InfraTec GmbH Infrarotsensorik und Messtechnik**

Gostritzer Str. 61  
01217 Dresden, Deutschland  
[www.infratec.de](http://www.infratec.de)

**HEITRONICS Infrarot Messtechnik GmbH**

Kreuzberger Ring 40  
65205 Wiesbaden, Deutschland  
<https://www.heitronics.com/de/infrarot-messtechnik>

## 11.3 Oberflächenbilder der Proben

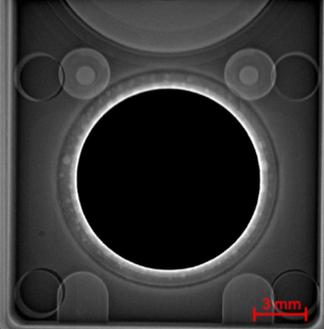
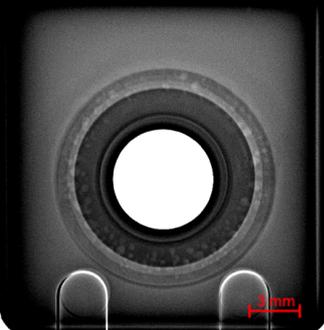
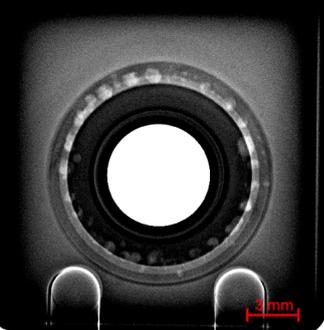
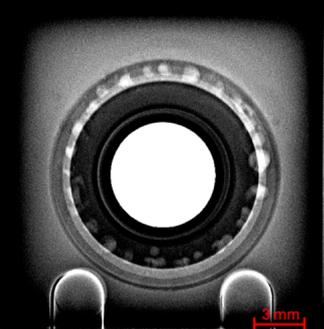
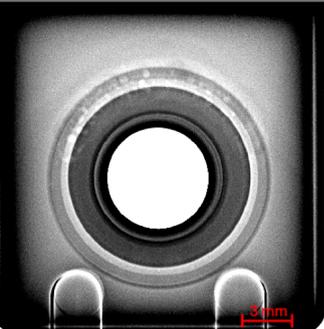
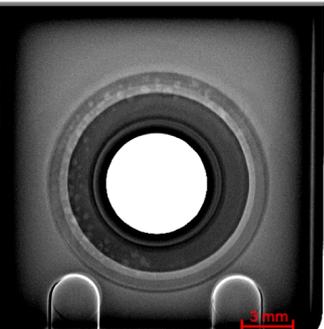
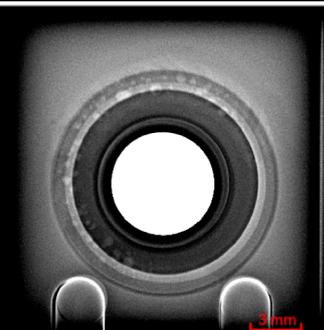
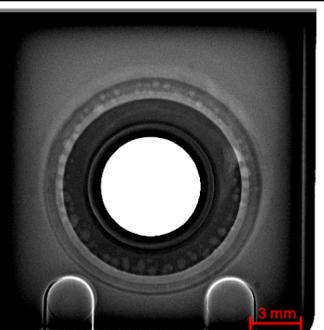
Tabelle 11-9: Oberflächenbilder P1 bis P12

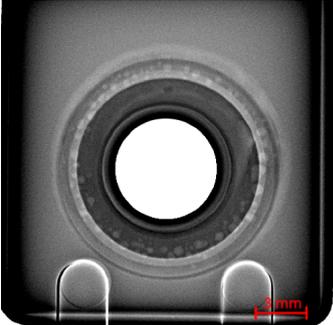
Probennummer	Oberflächenbilder	
P1_P2		
P3_P4		
P5_P6		
P7_P8		
P9_P10		
P11_P12		

Tabelle 11-10: Oberflächenbilder P13 bis P24

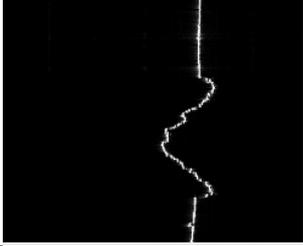
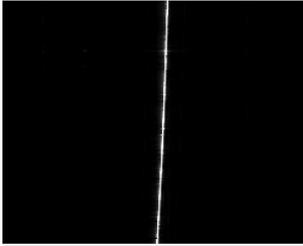
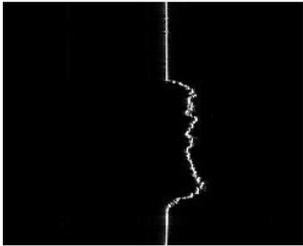
Probennummer	Oberflächenbilder	
P13_P14		
P15_P16		
P17_P18		
P19_P20		
P21_P22		
P23_P24		

## 11.4 CT-Bilder der Proben

Probennummer	CT-Bilder	
P1_P2	 A grayscale CT scan of a circular object. The object has a dark central hole and a lighter outer ring. There are four small circular features around the ring. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.	 A grayscale CT scan of the same circular object from a different angle. The central hole is white, and the outer ring is dark. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.
P3 und P6	 A grayscale CT scan of a circular object with a dark central hole and a lighter outer ring. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.	 A grayscale CT scan of the same circular object from a different angle. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.
P8 und P10	 A grayscale CT scan of a circular object with a dark central hole and a lighter outer ring. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.	 A grayscale CT scan of the same circular object from a different angle. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.
P12 und P14	 A grayscale CT scan of a circular object with a dark central hole and a lighter outer ring. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.	 A grayscale CT scan of the same circular object from a different angle. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.
P16 und P18	 A grayscale CT scan of a circular object with a dark central hole and a lighter outer ring. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.	 A grayscale CT scan of the same circular object from a different angle. A red scale bar at the bottom right indicates 3 mm.

Probennummer	CT-Bilder	
P19 und P22	 A grayscale CT scan image of a circular object, likely a ring or a thin-walled cylinder, viewed from the side. The object is centered in the frame. At the bottom, two small, rounded protrusions are visible. A red scale bar at the bottom right indicates a length of 3 mm.	 A grayscale CT scan image of the same circular object as in the left view, viewed from the opposite side. The object is centered. At the bottom, two small, rounded protrusions are visible. A red scale bar at the bottom right indicates a length of 3 mm.
P23	 A grayscale CT scan image of a circular object, similar to the previous ones, viewed from the side. The object is centered. At the bottom, two small, rounded protrusions are visible. A red scale bar at the bottom right indicates a length of 3 mm.	

## 11.5 OCT-Bilder

Probennummer	Position/Time	OCT-Bilder	
2	82 ms		
14	57 ms (links) und 147 ms (rechts)		
19	321 ms		
23	259 ms	