DLR-IB-BT-AU-2021-165

Ermittlung und Validierung der Prozessgrößen beim elektrischen Widerstandsschweißen von faserverstärkten Hochleistungsthermoplasten und deren Einfluss auf die Verbindungsqualität

Bachelorarbeit

Anton Thomé

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DLR-IB-BT-AU-2021-165

Ermittlung und Validierung der Prozessgrößen beim elektrischen Widerstandsschweißen von faserverstärkten Hochleistungsthermoplasten und deren Einfluss auf die Verbindungsqualität

Bachelorarbeit

Anton Thomé

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

DLR-IB-BT-AU-2021-165

Ermittlung und Validierung der Prozessgrößen beim elektrischen Widerstandsschweißen von faserverstärkten Hochleistungsthermoplasten und deren Einfluss auf die Verbindungsqualität

Anton Thomé

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
Institut für Bauweisen und Strukturtechnologie
Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie,Am Technologiezentrum 4, 86159 Augsburg

Stufe der Zugänglichkeit: 1, Zugriff ohne Einschränkung

Augsburg, im September 2021

Seiten:	117	Abbildungen:	47	Tabellen:	10

Institutsdirektor	Abteilung: ZAP-MFT AU
Prof. Dr.-Ing. H. Voggenreiter	Abteilungsleiter: Prof. Dr.-Ing. M. Kupke
Manuel Endraß, Wissenschaftlicher Mitarbeiter	Anton Thomé, Bachelorand

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig
Fakultät Ingenieurwissenschaften
Bachelor-Studiengang Maschinenbau

Ermittlung und Validierung der Prozessgrößen beim elektrischen Widerstandsschweißen von faserverstärkten Hochleistungsthermoplasten und deren Einfluss auf die Verbindungsqualität

Bachelorarbeit Nr. 15/21

von

Anton Thomé
geb. am 08.10.1997
in Berlin
Matrikelnummer: 73139

Verantwortlicher Hochschulprofessor:
Prof. Dr. R. Böhm

Augsburg, Juli - September 2021

Erklärung des Verfassers

E r k l ä r u n g

Ich versichere wahrheitsgemäß, die Bachelorarbeit selbständig angefertigt, alle benutzten Hilfsmittel vollständig und genau angegeben und alles kenntlich gemacht zu haben, was aus Arbeiten anderer unverändert oder mit Abänderungen entnommen wurde.

Augsburg, den

Anton Thomé

Inhaltsverzeichnis

Erklärung des Verfassers **3**

Abbildungsverzeichnis **6**

Tabellenverzeichnis **12**

1. Einleitung **13**

2. Grundlagen **15**

2.1. Leichtbau in der Luft- und Raumfahrt 15

2.2. Kohlenstofffaserverstärkte Werkstoffe mit Polyaryletherketonmatrix 15

2.2.1. Kohlenstofffaser 16

2.2.2. Polyaryletherketone 19

2.3. Das elektrische Widerstandsschweißen 21

2.3.1. Versuchsprinzip und Aufbau des Schweißmoduls für das elektrischen Widerstandsschweißen 22

2.3.2. Die Prozessschritte 27

2.3.3. Die Prozessparameter 29

2.4. Prüfverfahren 33

2.4.1. Zugversuch Single-Lap-Shear DIN-EN 2243-1 und AITM1-0019 33

2.4.2. Bruchflächenanalyse 35

2.4.3. Wasserultraschallverfahren 37

2.4.4. Dynamische Wärmestromdifferenzkalorimetrie 39

2.4.5. Rasterelektronenmikroskopie 40

3. Grundlegende Untersuchungen zur Verbesserung des Widerstandsschweißprozesses **42**

3.1. Untersuchungen zum Einfluss des Werkstoffes der Isolationslage auf die Zugfestigkeit und das Bruchverhalten 42

3.1.1. Einfluss des Werkstoffes der Isolationslage auf die Zugfestigkeit 43

3.1.2. Einfluss des Werkstoffes der Isolationslage auf das Bruchverhalten . . . 45

3.2. Untersuchungen zum Einfluss der Schweißspannung im Prozess 48
3.2.1. Spannungsabhängigkeit des Widerstandes 48
3.2.2. Untersuchungen zum Einfluss der thermischen Historie des Schweißleiters auf seinen Widerstand 52
3.2.3. Untersuchungen zum Spannungsniveau und der Haltedauer im Abkühlprozess 57
3.2.4. Untersuchungen zum Einfluss eines initialen Spannungsimpulses auf den Schweißleiterwiderstand 66
3.3. Variation der Prozessführung und deren Auswirkung auf den Schweißprozess . 72
3.3.1. Untersuchungen zum Einfluss einer gepulsten Prozessführung auf die Homogenität der Wärmeverteilung in der Fügezone 72
3.3.2. Untersuchungen zum Einfluss einer zweistufigen Druckaufbringung auf die Verbindungsfestigkeit und die Prozesssicherheit 77

4. Bestimmung einer optimalen Prozessparameterkonfiguration mittels statistischer Versuchsplanung 82
4.1. Faktoren 85
4.2. Zielgößen 86
4.3. Analyse 88

5. Zusammenfassung und Ausblick 104

Literaturverzeichnis 108

Anhang 110

Abbildungsverzeichnis

2.1. Strukturformel von Polyaryletherketon. ([6] S. 983) 20
2.2. Aufbau einer Widerstandsschweißung mit Bezeichnung der Komponenten. ([13] S. 8) 23
2.3. Aufbau des Widerstandsschweißmoduls am DLR in der Rückansicht mit Markierung der wichtigsten Komponenten. 24
2.4. Präparierte Schweißleiter mit Isolationslage. Oben mit Glasisolation, unten mit Matrixisolation. Auf den Kontaktflächen ist das Edelstahlgewebe zu erkennen und an den Seiten die Heftpunkte der Ultraschallsonotrode. 26
2.5. Lagenaufbau der Fügezone im Querschnitt. 27
2.6. Spannungs- und Temperaturverlauf einer Schweißung mit 25 V für 25 s und einer Kühlspannung von 19 V für 10 s. Eingezeichnet sind als vertikale Linien die drei Prozessschritte mit Nummerierung. Definiert werden die Abschnitte durch das Abschalten der Spannung für die Aufheizphase (1), durch das Ende der Nachkristallisation bei 220 °C für die Fügephase (2) sowie der Glasübergangstemperatur bei 148 °C für die Abkühlphase (3). . . 28
2.7. Zuschnitt von drei 25,4 mm (1 Zoll) breiten und 195 mm langen SLS-Zugproben aus dem Organoblechverbund mittels Wasserstrahlschneidanlage. 34
2.8. Die vier verschiedenen Brucharten. Unmaßstäblich gezeichnet in der Seitenansicht. Der jeweilige Versagensort ist als rote Linie markiert. 35
2.9. Am Mikroskop ausgewertete Zugprobe in einem Maßstab von 1 mm mit markierten Flächen unterschiedlicher Brucharten und ihrer Flächeninhalte. Für einige Flächen wurde im rechten Bild die Bruchart zur Veranschaulichung eingefügt. 36
2.10. Ergebnisdarstellung zweier Wasserultraschallprüfungen mit A-, B- und C-Scan. Ultraschallprüfgerät Olympus OmniScan SX mit dem Prüfkopf Olympus 5L64-NW1 und der Wedge SNW1-OL-IHC. In rot ist im B-Scan die Position der Fügezone markiert und in schwarz die theoretische unmaßstäbliche Lage der Organobleche. 38

2.11. DSC Thermographie der Aufheizphase von presskonsolidiertem kohlenstofffaserverstärktem LM-PAEK mit eingezeichnetem exothermen Glasübergangsbereich und endothermen Schmelzbereich. [15] 40
3.1. Maximal erreichte Kraft im SLS-Zugversuch für Proben mit Schweißleiterisolierung aus Matrixwerkstoff und GF/LM-PAEK. Zu sehen ist der Mittelwert mit Standardabweichung und Median als horizontale Linie. 44
3.2. Beispiel einer Bruchfläche mit markierten Versagensarten und ausgewerteten Flächen. 45
3.3. Vergleich der Bruchflächen der im SLS-Zugversuch getesteten Proben. In schwarz zu sehen der gemittelte prozentuale Anteil der Brucharten an der gemessenen Gesamtfläche der Schweißungen mit einer Schweißleiterisolation aus Glasfaser, in orange im Vergleich die Isolation mit Matrix 46
3.4. Verlauf des Widerstandes zu Beginn der Schweißung für Schweißungen mit 1 V bis 25 V. Die Dauer der Schweißungen variiert, die Spannung wurde manuell abgeschaltet, wenn sich ein thermisch eingeschwungener Zustand einstellt, bei dem die weitere Erwärmung nicht über die Auswirkungen der Heißleitereigenschaften der Kohlenstofffaser hinaus geht. Der Versuch wurde zwei Mal durchgeführt. 50
3.5. Verlauf des Widerstandes zu Beginn der Schweißung für die Versuche 1 bis 25 (Schweißungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten) der Messreihe 1 in schwarz. Gut zu sehen ist bei den thermisch unbelasteten Proben der sinkende Widerstandswert in Abhängigkeit der angelegten elektrischen Spannung. In orange die Widerstandswerte der Versuche mit thermisch unbelasteten Schweißleitern bei 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, und 25 V. 53
3.6. Verlauf der maximal im Prozess erreichten Temperatur für die Versuche 1 bis 25 (Schweißungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten) der Messreihe 1 in schwarz. In orange die maximal erreichte Temperatur der Versuche mit thermisch unbelasteten Schweißleitern bei 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, und 25 V. Als horizontale Linien eingezeichnet sind die Glasübergangstemperatur T_g sowie die Schmelztemperatur T_m für LM-PAEK. 54

3.7. Verlauf des Widerstandes zu Beginn der Schweißung für die Versuche 1 bis 25 (Schweißungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten, halten der Spannung für 60 s) der Messreihe 2 in schwarz. In orange die Widerstandswerte der Versuche mit thermisch unbelasteten Schweißleitern bei 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, und 25 V. 54
3.8. Verlauf der maximal im Prozess erreichten Temperatur für die Versuche 1 bis 25 (Schweißungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten, halten der Spannung für 60 s) der Messreihe 2 in schwarz. In orange die maximal erreichte Temperatur der Versuche mit thermisch unbelasteten Schweißleitern bei 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, und 25 V. Als horizontale Linien eingezeichnet sind die Glasübergangstemperatur T_g sowie die Schmelztemperatur T_m für LM-PAEK. 55
3.9. Typischer Temperaturverlauf einer Schweißung bei 25 V für 25 s ohne Kühlspannung. Eingezeichnet ist die Zeit vom Abschalten der Spannung bis zum erreichen von 220 °C. 58
3.10. Maximal erreichte Temperatur in der Mitte der Fügezone für Schweißspannungen von 1 V bis 25 V. Die Spannung wurde für 60 s gehalten, bis sich ein thermisch eingeschwungener Zustand einstellte bei dem eine weitere Erwärmung nur noch auf die Heißleitereigenschaften der Kohlenstofffaser zurückzuführen war. 59
3.11. Temperaturverlauf einer Schweißung bei Prozessierung mit 25 V für 25 s mit verlangsamter Abkühlung bei einer Spannung von 20 V für 10 s 60
3.12. Auflichtmikroskopaufnahmen der Fügezone im Querschnitt mit 150-facher Vergrößerung. Im oberen Bild die Schweißung ohne verzögerte Abkühlung, im unteren wurde mit verzögerter Abkühlung geschweißt. 63
3.13. REM-Aufnahmen aus der Mitte der Fügezone im Querschnitt mit 400, bzw. 10.000-facher Vergrößerung. Im großen Bild ist die gesamte Fügezone abgebildet, im kleineren in der rechten oberen Ecke ein Ausschnitt aus dem Schweißleiter. 64
3.14. REM-Aufnahmen aus dem Organoblech mit 10.000-facher Vergrößerung. Neben vielen Artefakten aus der Präparation in Form von Kratern, sind deutlich sphärolitische Strukuren zu sehen. 65

3.15. Temperatur- und Spannungsverlauf einer Schweißung mit 25 V für 25 s, mit einer Kühlspannung von 20 V für 15 s und einem vorgeschalteten Spannungsimpuls mit 50 V für 1 s zur Verbesserung des Übergangswiderstandes. . . 67
3.16. Zwei Temperaturen im Impuls. In schwarz ist die maximal durch den Impuls erreichte Temperatur in der Mitte der Fügezone. In orange die noch in der Fügezone vorhandene Temperatur bedingt durch die Restwärme zu Prozessbeginn. In Versuch zwei wurde anschließend an den Impuls keine Schweißung durchgeführt, deshalb fehlt der Wert. 68
3.17. Widerstände vor und nach einem dem Prozess vorgeschalteten Spannungsimpuls von 50 V für 1 s. In schwarz ist der Widerstand vor dem Impuls abgebildet, in orange der Widerstand danach. 69
3.18. Widerstände vor und nach einem dem Prozess vorgeschalteten Spannungsimpuls von 50 V für 1 s. In schwarz ist der Widerstand vor dem Impuls abgebildet, in orange der Widerstand danach. Es wurden Schweißleiter mit in der Kontaktfläche per Ultraschallsonotrode degradierter Matrix verwendet. . 71
3.19. Schematische Anordnung der 7 Thermoelemente in der Fügezone zur hochauflösenden Messung der Temperaturverteilung. Gemessen wurde die Temperatur direkt zwischen Schweißleiter und Glasisolationslage (TC 2-7) bzw. direkt am Kupferkontaktklotz (TC 1). 73
3.20. Spannungsverlauf im kontinuierlichen (orange) und gepulsten (schwarz) Prozess. Beim kontinuierlichen Prozess wurde für 25 s bei 25 V geschweißt. Der gepulste Prozess bestand aus 6 Intervallen mit 3 s Dauer und einem Intervall mit 1 s Dauer bei einer Spannung von 28 V und Pausen zwischen den Intervallen von 1 s. 73
3.21. Abbildung des Histogramm mit eingezeichneter Normalverteilungskurve, sowie das Boxplot mit Mittelwert und Standardabweichung der mittleren über den Prozess gemessenen Temperaturen der gepulsten in schwarz, sowie der kontinuierlichen Prozessführung in orange. 75
3.22. Abbildung des Histogramm mit eingezeichneter Normalverteilungskurve, sowie das Boxplot mit Mittelwert und Standardabweichung der maximal im Prozess erreichten Temperaturen der gepulsten in schwarz, sowie der kontinuierlichen Prozessführung in orange. 76

3.23. Spannungs-, Temperatur- und Druckverlauf einer Schweißung mit zweistufiger Druckaufbringung. Schweißung mit 27 V für 12 s mit einer Kühlspannung von 20 V für 15 s. Der Druck wurde manuell nach erreichen von 380 °C von 1 bar auf 8 bar erhöht. Zeitpunkt der Druckerhöhung ist durch eine vertikale Linie gekennzeichnet. 79
3.24. Maximal erreichte Kraft im SLS-Zugversuch für Proben mit Schweißleiterisoloierung aus Matrixwerkstoff und GF/LM-PAEK bei Schweißungen mit variabler Druckaufbringung. Der Druck wurde kurz vor Ende der Aufheizphase von 1 bar Zylinderdruck auf 8 bar erhöht. Zu sehen ist der Mittelwert mit Standartabweichung als Punkt und Box sowie der Median als horizontale Linie. 80
4.1. Schematische Darstellung des elektrischen Widerstandsschweißens, mit Auswahl der zu untersuchenden Prozessgrößen als Faktoren, den konstant zu haltenden anderen Eingangsgrößen und den Ergebnissen. 83
4.2. Central Composite Design. Fünfstufiger Versuchsplan durch Kombination eines Würfels (zweistufiger Versuchsplan in grün) mit einem Stern (dreistufiger Versuchsplan in lila/orange). ([11] S. 41) 84
4.3. Vier Diagramme zur Validierung der Varianzanalyse. Oben links Normal Plot of Residuals, oben rechts Residuals vs. Predicted, unten links Box-Cox Plot und unten rechts Residuals vs. Run. 91
4.4. Einfluss der Schweißspannung auf die SLS-Festigkeit bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Spannung in V wird von 23 V bis 27 V untersucht und durch ein lineares Modell beschrieben. 95
4.5. Einfluss der Schweißdauer auf die SLS-Festigkeit bei konstanter Schweißspannung von 25 V, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Schweißdauer in s wird von 20 s bis 30 s untersucht und durch ein Lineares Modell beschrieben. 96
4.6. Einfluss der Spannung auf die Versagensart bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Spannung in V wird von 23 V bis 27 V untersucht und durch ein quadratisches Modell beschrieben. 97

4.7. Einfluss der Spannung auf die Bruchfläche bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Spannung in V wird von 23 V bis 27 V untersucht und durch ein quadratisches Modell beschrieben. 97
4.8. Einfluss der Faktoren C-Kühlspannung und D-Kühldauer auf die Bruchfläche bei konstanter Schweißdauer von 25 s und Spannung von 25 V. Die Kühlspannung in V wird von 18 V bis 20 V, die Dauer der Kühlspannung in s von 5 s bis 15 s untersucht und durch ein quadratisches Modell beschrieben. 98
4.9. Einfluss der Spannung auf die Zieltemperatur bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Spannung in V wird von 23 V bis 27 V untersucht und durch ein lineares Modell beschrieben. 99
4.10. Einfluss der Schweißdauer auf die Zieltemperatur bei konstanter Spannung von 25 V, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Schweißdauer in s wird von 20 s bis 30 s untersucht und durch ein lineares Modell beschrieben. 99
4.11. „Overlay Plot“ für Spannung und Schweißdauer mit folgenden Kriterien: SLS-Festigkeit 10 kN bis 16,83 kN, Versagensart 1 bis 3, Bruchfläche 1 bis 2 und Zieltemperaturniveau von 340 °C bis 380 °C. 101
4.12. „Overlay Plot“ für die numerische Berechnung der optimalen Parameterkonfiguration für Spannung und Schweißdauer mit folgenden Kriterien: SLS-Festigkeit 10 kN bis 16,83 kN, Bruchfläche 1 bis 2 und Zieltemperaturniveau von 340 °C bis 380 °C. 102

Tabellenverzeichnis

1. Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Toray Cetex® TC1225 (entnommen aus Anhang A) 25
2. Brucharten 36
3. Vergleich verschiedener Kühlspannungen und Kühldauern hinsichtlich der maximal erreichten Temperatur ($T_{\max}$) und der Zeit über 220 °C (Δt). 61
4. Prozessparameter der am Mikroskop untersuchten Schweißproben. 63
5. Auflösungsstufen 4 und 5 der statistischen Versuchsplanung. ([11] S. 31) 84
6. Zusammenfassung der statistischen Werte im DoE zur Modellbildung in der Auswertung der SLS-Festigkeit. 92
7. Zusammenfassung der statistischen Werte im DoE zur Modellbildung in der Auswertung der Versagensart. 93
8. Zusammenfassung der statistischen Werte im DoE zur Modellbildung in der Auswertung der Bruchfläche. 93
9. Zusammenfassung der statistischen Werte im DoE zur Modellbildung in der Auswertung der Zieltemperatur. 94
10. Optimale Prozessparamterkonfiguration aus graphischer und numerischer DoE-Auswertung. 102

1. Einleitung

Vor allem in Industriezweigen wie in der Luft- und Raumfahrt, in denen ein geringes Gewicht sowie hohe mechanische Eigenschaften bei gleichzeitig sehr hohen Sicherheitsanforderungen gefordert sind, kommen immer häufiger faserverstärkte Polymere zum Einsatz. Die hohen Anforderungen an Effizienz, Umweltfreundlichkeit und Fertigung erfordern ständige Innovationen, auch in den Fügetechnologien. Dies macht die Luft- und Raumfahrt in vielen Bereichen zum technologischen Vorreiter, bevor die Prozesse und Techniken auch in anderen Industriezweigen eingesetzt werden.

Die faserverstärkten Thermoplasten stellen dabei eine besonders vielversprechende Werkstoffgruppe dar. Im Vergleich zu den häufig eingesetzten Duroplasten können Thermoplasten durch Erwärmung umformbar gemacht werden. Während die Duroplasten den Vorteil einer kostengünstige und vergleichsweise einfachen Fertigung besitzen, zeichnen sich die Thermoplasten vor allem durch ganz neue Möglichkeiten in den Fertigungsverfahren aus. Durch die Umformbarkeit sind Techniken wie das In-Situ-Tapelegen ohne anschließenden Aushärteprozess im Ofen möglich. Ganz besonders vorteilhaft ist allerdings die Einsatzmöglichkeit von Schweißverfahren in der Fertigung und im Reparaturprozess. Die Schweißverfahren haben, gegenüber den bei Duroplasten herkömmlichen mechanische oder adhäsiven Fügeverfahren, wie Bolzen oder Kleben, einen großen Gewichtsvorteil. Außerdem entfällt in vielen Fällen eine Materialdopplung oder ein Fremdmaterial in der Fügezone. Das staubfreie Fügen stellt ebenfalls einen großen Vorteil dar, denn der elektrisch leitende Staub der Kohlefaser kann Maschinen und Anlagentechnik beschädigen. Zusätzlich ist es möglich, aus verschiedenen differentiell gefertigten Bauteilen ein quasi-integrales Bauteil zu bilden.

Um die thermoplastischen Werkstoffe effektiv einsetzten zu können, sind die Fügeverfahren ein wichtiger Baustein. Wegen der genannten Vorteile ist einer der Forschungsschwerpunkt am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie (ZLP) des deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Augsburg das Schweißen faserverstärkter hochleistungsthermoplastischer Kunststoffe. Besonders das elektrische Widerstandsschweißen wurde am ZLP maßgeblich weiterentwickelt. Beim elektrischen Widerstandsschweißen werden die Bauteile gefügt, indem die joulsche Wärme eines stromdurchflossenen Lei-

ters die Fügepartner aufschmilzt, bevor sie durch einen aufgebrachten Schweißdruck gefügt werden. In Zusammenarbeit mit der Industrie, insbesondere mit Airbus und der Premium AEROTEC GmbH, wurde das Verfahren an praxisnahen Projekten entscheidend weiterentwickelt. So wurden bei einer thermoplastischen Druckkalotte für den Airbus A320 Schweißnähte mit einer Länge von 1500 mm realisiert. Das kontinuierliche Widerstandsschweißen, sowie das Ultraschallpunkt- und kontinuierliche Ultraschallschweißen sind ebenfalls aktueller Gegenstand der Forschung, sollen jedoch in der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des Clean Sky 2 Programms der Europäischen Union, Arbeitspaket 2.1.8 (WP Upper Shell Manufacturing, kurz MFFD) angefertigt. Ziel des Arbeitspaketes ist die Weiterentwicklung unterschiedlicher Thermoplastverarbeitungs- und Fügetechnologien und deren Validierung im Full-Scale Maßstab anhand einer acht Meter langen Flugzeug Rumpfoberschale. Dabei kommt sowohl die Technik zur Fertigung der Außenhaut mittels In-Situ-Faserablage (AFP), als auch zur Integration der Stringer mittels Ultraschallpunkt- und kontinuierlichem Ultraschallschweißen und der Spanten durch das elektrische Widerstandsschweißen vom ZLP in Augsburg zur Anwendung. [12]

In dieser Arbeit soll im Rahmen des MFFD Projektes das statische elektrische Widerstandsschweißen weiterentwickelt werden. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Ermittlung und Validierung der Prozessgrößen beim elektrischen Widerstandsschweißen zur Absicherung des Prozessfensters für die Spantintegration und deren Einfluss auf die Verbundfestigkeit. Ziel der Arbeit ist es, die optimale Parameterkonfiguration sowie eine optimiert Prozessführung für einen robusten Prozess und eine möglichst hohe Verbundfestigkeit zu finden. Dafür werden im ersten Teil der Arbeit grundlegende Untersuchungen zur Verbesserung sowohl der Prozessparameter als auch der Prozessführung durchgeführt. Neben dem Einfluss der Isolationslage auf die Zugfestigkeit und das Bruchverhalten der Schweißung wird besonders der Einfluss der Schweißspannung im Prozess betrachtet. Außerdem werden zwei Variationen in der Prozessführung hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Prozesssicherheit und die Verbundfestigkeit untersucht. Im zweiten Teil wir auf Grundlage der gewonnen Erkenntnisse eine statistische Versuchsplanung (DoE) durchgeführt mit dem Ziel, eine optimale Parameterkonfiguration für die Fertigung der Demonstratorhalbschale zu finden.

2. Grundlagen

2.1. Leichtbau in der Luft- und Raumfahrt

Leichtbau ist heute aus der Luft- und Raumfahrt nicht mehr wegzudenken. Um die immer höheren Anforderungen an Leistungsfähigkeit und Effizienz aber auch Sicherheit und Emissionsreduzierung erfüllen zu können, braucht es eine interdisziplinäre Strategie wie den Leichtbau. Da alle genannten Anforderungen in der Luft- und Raumfahrt immer direkt oder indirekt von der Masse der Primärstruktur abhängen, soll der Leichtbau vor allem dazu dienen, das Gewicht des Flugzeugs zu verringern. Das hat zur Auswirkung, dass mehr Zuladung transportiert werden kann, der Treibstoffverbrauch sinkt, bessere Sicherheitssysteme installiert werden können oder eine weitere Strecke geflogen werden kann. Dabei sollen allerdings die Flugeigenschaften gleich bleiben oder sogar verbessert werden. Das gilt analog für die Raumfahrt. Durch die hervorragenden mechanischen Kennwerte und Eigenschaften, die faserverstärkte Kunststoffe erreichen, ist es nicht verwunderlich, dass ihr Anteil am Strukturgewicht der neu entwickelten Flugzeuge stetig steigt. Heute beträgt ihr Anteil schon über 50 %, etwa beim Airbus A350 oder bei der Boeing 787; Tendenz steigend. Weitere Informationen über die Motivation hinter dem Leichtbau, seine Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt sowie seine verschiedenen Disziplinen, wurden in einer der Bachelorarbeit vorgelagerten Praktikumsarbeit mit dem Thema „Schweißtechnologien für faserverstärkte Hochleistungsthermoplasten in der Luftfahrt und deren Anwendung“ [14] zusammengefasst.

2.2. Kohlenstofffaserverstärkte Werkstoffe mit Polyaryletherketonmatrix

Faserverstärkte Kunststoffe werden immer populärer und sind aktuell die führende Werkstoffgruppe wenn die Kombination aus hoher Festigkeit bei geringem Gewicht gefordert ist. Durch die Kombination zweier sehr verschiedener Werkstoffe ist es möglich, die positiven Eigenschaften beider Werkstoffe zu nutzen bzw. die Nachteile auszugleichen. Bei faserverstärkten Kunststoffen handelt es sich immer um ein Faser-Matrixgemisch, bei

dem die Fasern in der Matrix eingebettet sind. Die Fasern tragen die Lasten während die Matrix dafür sorgt, dass eine gute Krafteinleitung, ein Lastübertrag von Faser zu Faser, sowie die äußere geometrische Gestalt sichergestellt und definiert sind. Die Eigenschaften und Lage der Fasern bestimmen hauptsächlich die mechanischen Eigenschaften des Verbundes wie Elastizitätsmodul und Festigkeit. Die Matrix dagegen bestimmt die anderen Eigenschaften des Verbundwerkstoffes wie seine Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse und Temperatur, seine Schlagzähigkeit und sein Brennverhalten. In der Luftfahrt und auch in anderen Industriezweigen wie dem Maschinenbau und bei Haushaltsgeräten, waren die Duroplasten die ersten im großen Maßstab eingesetzten Kunststoffe. In letzter Zeit kommen aber, durch verbesserte Materialien und Weiterentwicklung in der Prozesstechnik, vermehrt auch thermoplastische Kunststoffe zum Einsatz.
Weiterführende Informationen zu verschiedenen Leichtbaumaterialien, insbesondere den Faserverbundwerkstoffen sind in [14] zu finden. In den beiden folgenden Unterkapiteln wird explizit auf die in den Versuchen dieser Arbeit verwendete Matrix-Faserkombination Low Melt-Polyaryletherketon-Kohlenstofffaser (LM-PAEK) näher eingegangen.

2.2.1. Kohlenstofffaser

Erst durch eine geeignete Faserverstärkung erhalten die faserverstärkten Kunststoffe ihre hervorragenden Festigkeitswerte bei geringem Gewicht. Durch Auswahl der Faser, ihrer Länge, des Faservolumengehaltes sowie der Ausrichtung, kann ganz individuell auf den vorhandenen Lastfall eingegangen werden und somit hochoptimierte Lösungen für die anspruchsvollsten Anwendungen gefunden werden. Wie in Unterunterabschnitt 2.2.2 beschrieben, nehmen die Fasern die Kräfte auf und sorgen für die Weiterleitung, während die Matrix für die Formgebung, die Kraftübertragung zwischen den Fasern und für den Schutz der Fasern vor äußeren Einflüssen sorgt.
In [14] (S. 20 ff.) sind verschiedene Fasern und Verstärkungsmechanismen beschrieben. Im Zuge der Literaturrecherche wurden dort die wichtigsten Informationen zusammengetragen. So auch der folgende Teil über die Faserverstärkung mit Kohlenstofffaser, welche in den Schweißversuchen dieser Arbeit zum Einsatz kommt.
Kohlenstofffasern sind wegen ihrer herausragenden mechanischen Eigenschaften, beson-

ders in Bezug auf ihre Festigkeit, die wichtigsten Fasern im modernen Leichtbau. Hergestellt werden sie aus organischen Ausgangsmaterialien. Heute üblich ist die Verwendung von Polyacrylnitril (PAN) als Ausgangswerkstoff. Die PAN-Fasern werden gesponnen und die verkneulten Polymerketten durch Verstrecken in Faserrichtung ausgerichtet. Hier entstehen die anisotropen Eigenschaften auf Filamentebene. Nach einer Voroxidation in sauerstoffreicher Atmosphäre bei 200 °C bis 300 °C, werden die Fasern in einer Inertgasatmosphäre über eine schmelzbare Zwischenstufe carbonisiert. In diesem Pyrolyse genannten Prozess, werden alle anderen Atome außer die Kohlenstoffatome bei Temperaturen von 800 °C bis 1500 °C abgespalten und es bilden sich Kohlenstoffatomringe. Die Faser hat anschließend einen Kohlenstoffgehalt von über 95 %. Anschließend können die Fasern bei Temperaturen bis 3000 °C nachbehandelt werden. In der Pyrolyse lassen sich durch Temperatur und Prozessdauer das Elastizitätsmodul einstellen. Um die Anhaftung an die Matrix zu verbessern, werden in einem letzten Schritt an der Oberfläche Oberflächenoxide erzeugt, welche durch eine chemische Reaktion mit der Polymermatrix die Anhaftung zwischen Matrix und Faser deutlich verbessern. Außerdem wird noch eine Schlichte aufgetragen um die Oberfläche zu glätten. In der weiteren Verarbeitung könnten sich sonst die rauen Fasern gegenseitig durch Reibung beschädigen. Dieser variable Herstellungsprozess ermöglicht eine hohe Festigkeit (Zugfestigkeit bei HST-Fasern bis 6000 MPa, E-Moduln bei HM-Fasern bis 600 GPa) und die Option, das Elastizitätsmodul anwendungsbezogen einzustellen. Im Gegensatz zu Glasfasern haben Kohlenstofffasern ein progressives Spannungs-Dehnungsverhalten, was bedeutet, dass das Elastizitätsmodul mit steigender Belastung zunimmt. Durch die sehr geringe Dichte sind die Fasern für Leichtbauanwendungen besonders gut geeignet. Kohlenstofffasern besitzen außerdem ein stark anisotropes Verhalten. Ihre Zugfestigkeit ist in Faserrichtung um ein vielfaches höher als quer dazu. Weitere Vorteile sind eine sehr gute Ermüdungsfestigkeit im Kohlestofffaser-Matrixverbund, Beständigkeit gegen die meisten Säuren und Alkalien sowie eine Biokompatibilität, also Verträglichkeit mit menschlichem Gewebe. Für Anwendungsgebiete mit hohen Temperaturdifferenzen, wie etwa die Luft- und Raumfahrt, ist der negative Wärmeausdehnungskoeffizient in Längsrichtung sehr interessant, da er sich bei geschickter Konstruktion der Faserausrichtung und der Lagen, im Gesamtverbund auch komplett eliminieren lässt.

Nach Henning ([10] S. 345) kann man die Kohlenstofffasern in vier Typen einteilen:

- HT-Fasern: hochfeste Kohlenstofffasern (engl. high tenacity), Standardfasern
- HST-Fasern: höhere Festigkeit als HT-Fasern (engl. high strain and tenacity)
- IM-Fasern: höherer E-Modul als HT-Fasern (engl. intermediate modulus)
- HM-Fasern: hochsteife Fasern (engl. high modulus)

Die HST-Fasern besitzen eine höhere Zugfestigkeit als die HM-Fasern, welche dafür ein höheres Elastizitätsmodul besitzen.

Besonders interessant für das elektrische Widerstandsschweißen sind die thermischen und elektrischen Eigenschaften der Kohlenstofffasern. Kohlenstofffasern besitzen, unter anderem wegen ihrer temperaturinvarianten[1] Steifigkeit und der Unschmelzbarkeit von Kohlenstoff bis 4000 °C, eine sehr gute Temperaturbeständigkeit. In sauerstoffarmer Umgebung, behalten sie ihre mechanischen Eigenschaften bis 2000 °C, unter Normalbedingungen an Luft bis 400 °C. Der niedrige und einstellbare Wärmeausdehnungskoeffizient und die gute Wärmeleitung sind zwei weitere thermische Besonderheiten, welche sie auch von der Glasfaser unterscheidet. Die Kohlenstofffaser besitzt eine sehr gute elektrische Leitfähigkeit und diamagnetische Eigenschaften. Durch die gute Leitfähigkeit besteht die Möglichkeit ein aus Fasern gefertigtes Bauteil durch Anlegen einer elektrischen Spannung oder durch Induktion zu erwärmen, was sie, als Faserverbundwerkstoff in einer Kombination mit thermoplastischer Matrix, schweißbar macht. Bauteile mit Kohlenstofffaserverstärkung sind zudem elektromagnetisch undurchsichtig. Durch eine elektrochemische Potentialdifferenz zu anderen Metallen, ist eine Verstärkung von beispielsweise Aluminium ohne galvanische Trennung ausgeschlossen, da es zu galvanischer Kontaktkorrosion und damit zu Schäden im Bauteil führen würde.

Nachteile der Kohlenstofffaser sind allen voran der hohe Faserpreis, welcher aus der aufwendigen Herstellung resultiert. Außerdem schließt das spröde Bruchverhalten kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe von manchen Anwendungsgebieten aus. Die Lokalisierung von Schäden auf Verbundebene wie Brüche, Impactschäden und Delamination als auch Fehler in der Faserarchitektur wie Ondulationen[2] sind mit zerstörungsfreien Prüfverfahren, wie z. B. der Ultraschallprüfung, oft sehr aufwendig. Falls ein Schaden im Faserverbund vorliegt, ist eine Reparatur ebenfalls schwierig, da jedes Durchtrennen der Fasern zu einer Bauteilschwächung führt.

[1] Größe, die bei Eintritt gewisser Veränderungen (hier Temperaturdifferenz) unveränderlich bleibt
[2] interlaminare Welligkeit, führt zu Verringerung der Tragfähigkeit in Faserrichtung

2.2.2. Polyaryletherketone

In der Luftfahrt stehen seit den 1980er Jahren zwei verschiedenen Matrixwerkstoffe für die Herstellung der Faser-Kunststoff-Verbunden zur Verfügung, die Duroplasten sowie die Thermoplasten. Der Unterschied zwischen den beiden Materialgruppen liegt in der Vernetzung auf molekularer Ebene. Während bei den Duroplasten eine engmaschige Vernetzung der fadenförmigen Makromoleküle, Monomere genannt, vorliegt, sind bei den Thermoplasten die Monomere nur ineinander verschlauft, gehen also keine intermolekularen Bindungen mit den anderen Monomeren ein. Dementsprechend findet bei den Thermoplasten keine Vernetzung statt. Das hat zur Auswirkung, dass Thermoplasten durch Erwärmung schmelzbar und somit umformbar gemacht werden können, wohingegen Duroplasten, nach ihrer vollständigen Aushärtung, vor dem Lösen ihrer Molekülverbindungen thermisch zersetzen.

Die beiden Polymere besitzen durch ihren molekularen Aufbau völlig gegensätzliche Herstellungsprinzipien und Verarbeitungsmöglichkeiten. Duroplasten setzten sich durch ihren geringen Preis und eine vergleichsweise einfache und schnelle Herstellung als erstes durch. Durch Entwicklungen im Heißpress- sowie Autoklavprozess zur Herstellung der thermoplastischen Werkstoffe sowie durch das Aufkommen des automatisierten Tapelegens (ATP) und der Faserablage (AFP), konnte in den letzten Jahren eine starke Kosten- und Zeitreduzierung im Herstellungsprozess erreicht werden. Durch diese Annäherung der Duroplasten und Thermoplasten in Bezug auf Kosten und Prozesszeiten, treten andere Vorteile der Werkstoffe in den Vordergrund. Durch die Schmelzbarkeit der Thermoplasten sind beispielsweise Fertigungsverfahren wie das Schweißen möglich, was das fremdmaterialfreie Fügen verschiedener Teile und somit eine differentiale Bauweise ermöglicht. Die Anwendung von Fügetechnologien, ohne den Einsatz spanender Bearbeitungsverfahren stellt dabei den großen Vorteil der Thermoplasten dar. So kann aus zwei differentiell gefertigten Bauteilen durch das verschmelzen in der Fügezone eine quasi-integrale Bauweise realisiert werden. Auch das Recycling sowie die Reparatur werden durch thermoplastische Bauteile vereinfacht. Dadurch konnten sich in der Luftfahrt in den letzten Jahren, trotz steigender Anforderungen an die Prozesszeiten, Stückzahlen in der Fertigung wie auch an die Festigkeit und an das Recycling, die thermoplastischen Werkstoffe weitestgehend gegen die duroplastischen durchsetzen. ([8], [6] S. 983 ff.)

Eine in der Luftfahrt häufig genutzt Stoffgruppe sind die Polyetherketone (PEK) insbesondere die Polyaryletherketone (PAEK). Diese Hochleistungskunststoffe bestehen aus

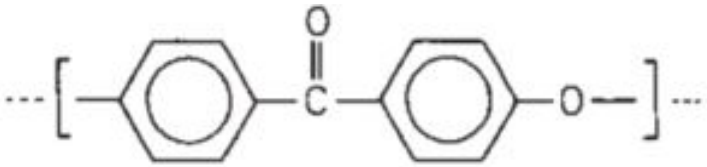


Abbildung 2.1: *Strukturformel von Polyaryletherketon. ([6] S. 983)*

abwechselnden funktionalen Keton- und Ethergruppen wie man in der Strukturformel in Abbildung 2.1 sehen kann. Bei PAEK befindet sich noch eine Arylgruppe dazwischen. Es handelt sich dabei um teilkristalline Thermoplasten. Die mit über 80 % am häufigsten verwendete Gruppe sind die Polyetheretherketone (PEEK). Zu dieser Gruppe gehören auch Polyetherketonketon (PEKK) sowie Polyetherketon-etherketonketon (PEKEKK), welche sich in Häufigkeit und Anordnung der Ether- und Ketongruppen unterscheiden. Durch ihr Verhältnis lassen sich die thermischen Eigenschaften in der Herstellung beeinflussen. Beispielsweise kann durch zusätzliche Ethergruppen das Fließverhalten der Schmelze also die molekulare Beweglichkeit des Copolymers[3] beeinflusst werden. Zusätzliche Ketongruppen erhöhen dagegen die thermische Beständigkeit. Alle Kunststoffe dieser Gruppe haben gemeinsam, dass sie besonders gut für sehr anspruchsvolle Anwendungsgebiete geeignet sind. Sie zeichnen sich durch hervorragende Eigenschaften nicht nur für einige Aufgaben, sondern in fast allen Anforderungen aus. Beispielsweise besitzen sie/sind sie:

- hohe Zug- und Biegefestigkeit
- hohe Schlagzähigkeit
- hohe Wechselfestigkeit
- hohe Formbeständigkeit in der Wärme
- gute elektrische Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich
- günstiges Gleit- und Verschleißverhalten
- hohe Chemikalienbeständigkeit
- hohe Hydrolysebeständigkeit
- hohe Strahlenbeständigkeit

[3] Copolymere sind Polymere, welche, im Gegensatz zu Homopolymeren, aus mehr als einer Monomereinheit bestehen. ([6] S. 984 ff.)

- schwer entflammbar (ohne Flammschutzmittel V-O bei 2 mm Wanddicke), mit sehr geringer Gas- und Rauchentwicklung
- leicht verarbeitbar ohne die Notwendigkeit einer thermischen Nachbehandlung von Spritzgussteilen

Diese Eigenschaften prädestinieren sie für einen Einsatz in der Luftfahrt. ([6] S. 984 ff., [8])
Eines dieser auf dem Markt erhältlichen Copolymere ist das PAEK VICTREX AE™250, der Firma Victrex Ltd, Thornton-Cleveleys, UK. Dieser Werkstoff wird in den beschriebenen Schweißversuchen als Matrix eingesetzt. Der Vorteil dieses Werkstoffes ist, dass er bei vergleichbaren mechanischen, physikalischen und chemischen Eigenschaften eine geringere Schmelztemperatur im Vergleich zu PEEK besitzt. Deswegen wird es LM (low melt, englisch für niedrigschmelzend) -PAEK genannt. Das senkt durch eine vereinfachte Herstellung und Verarbeitung die Kosten und fördert den Einsatz von thermoplastischen Werkstoffen. Die Materialeigenschaften wurden in [3] und [8] untersucht. Bei ähnlicher Glasübergangstemperatur von ca. 150 °C, liegt die Schmelztemperatur von LM-PAEK mit 305 °C etwa 38 °C unter der von PEEK. Die Kristallinität ist mit 27 % bei LM-PAEK geringer als bei PEEK (38 %).
Vorteilhaft ist die niedrige Verarbeitungstemperatur bei einem gleichbleibend großen Gebrauchstemperaturbereich. Dadurch wird die Prozesssicherheit in der weiteren Verarbeitung erhöht und Fügeverfahren wie das elektrische Widerstandsschweißen oder Prozesse wie AFP oder ATP vereinfacht bzw. in Teilen erst möglich. Durch die sehr gute Verarbeitbarkeit ist eine Faserverstärkung von LM-PAEK gut möglich und erfüllt die mechanischen Anforderungen für einen Einsatz als Strukturbauteil in der Luftfahrt. [8]

2.3. Das elektrische Widerstandsschweißen

Das elektrische Widerstandsschweißen gehört als Schweißverfahren zu den Fügeverfahren und ist in der DIN 8580 Hauptgruppe 4 Teil 6 als Fügen durch Schweißen definiert. In der Luftfahrt und dem Automobilbau ist das elektrische Widerstandsschweißen schon länger für metallische Werkstoffe im Einsatz. Durch das Aufkommen der Polymere, wurde es in

den letzten Jahren auch für die thermoplastischen Kunststoffe adaptiert und weiterentwickelt.

Das Prinzip des elektrischen Widerstandsschweißens ergibt sich aus dem Prinzip der Joulschen Wärme. Wird ein elektrisch leitfähiges Material mit dem Widerstand R von einem Strom I durchflossen, entsteht Wärme gemäß der Gesetzmäßigkeit $P = R \cdot I^2$. Der stromdurchflossene Leiter wird im folgenden Schweißleiter genannt. Der Schweißleiter wird zwischen die Fügepartner eingelegt. Die entstehende Wärme führt beim Erreichen der Schmelztemperatur der Fügepartner zum Aufschmelzen der Fügezone. Nachdem der Strom abgeschaltet wird, beginnt die Matrix der Fügepartner zu erstarren. Es entsteht eine stoffschlüssige Verbindung zwischen dem Schweißleiter und den Fügepartnern und somit indirekt auch zwischen den beiden Fügepartnern. Der Schweißleiter verbleibt dadurch in der Fügezone. Durch einen aufgebrachten Druck während des Prozesses, insbesondere während der Abkühlung, werden Lufteinschlüsse vermieden und eine gute Verbindung der Fügepartner sichergestellt. In Abbildung 2.2 ist der Aufbau zum elektrischen Widerstandsschweißen schematisch dargestellt. Über die Kontaktierung wird der Strom in den Schweißleiter geleitet. Der Schweißleiter ist durch die Isolationslagen elektrisch isoliert. Der von oben applizierte Druck sorgt für eine gute Kontaktierung und Konsolidierung[4]. Auf die verwendeten Materialien für die einzelnen Bauteile wird in Unterunterabschnitt 2.3.1 näher eingegangen. Anschließend werden die verschiedenen Prozessschritte, welche während einer Schweißung durchlaufen werden, in Unterunterabschnitt 2.3.2 beschrieben.

2.3.1. Versuchsprinzip und Aufbau des Schweißmoduls für das elektrischen Widerstandsschweißen

In diesem Abschnitt werden die Bauteile, ihre Materialien, sowie der Aufbau des Schweißmoduls beschrieben, welche für das elektrische Widerstandsschweißen in dieser Arbeit verwendet werden. In Abbildung 2.2 sind die wesentlichen, für den Widerstandsschweißprozess erforderlichen Komponenten dargestellt. In Abbildung 2.3 ist das verwendete Schweißmodul am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie des DLR (ZLP) abgebildet. Die markierten Elemente werden im Folgenden beschrieben.

[4] unter Konsolidierung versteht man die unter Druck stattfindende Verbindung der Fügepartner

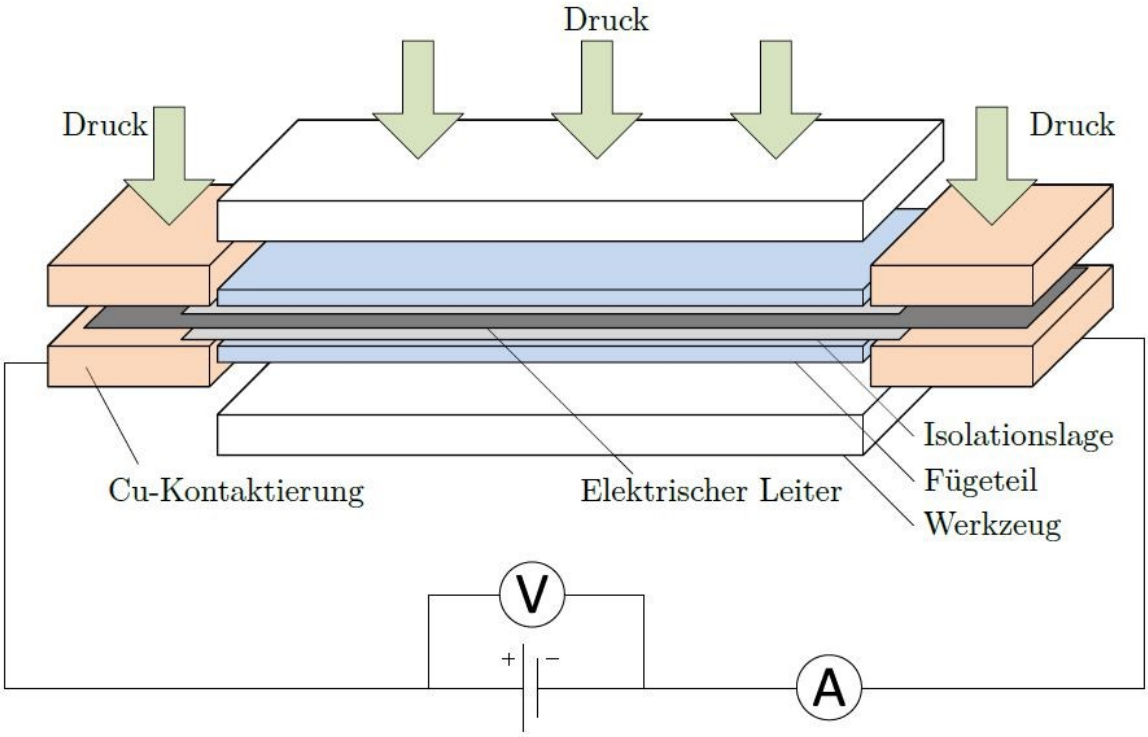


Abbildung 2.2: *Aufbau einer Widerstandsschweißung mit Bezeichnung der Komponenten. ([13] S. 8)*

Das Werkzeug besteht am verwendeten Versuchsstand aus Stahl und ist gegen ein Einkoppeln des Schweißstromes durch Kaptonklebeband von den Fügeteilen isoliert. Der Druck wird durch einen Pneumatikdruckzylinder ADN 40-25-A-P-A der Firma Festo über einen Hebel auf das obere Werkzeug übertragen. So kann mit einem Zylinderdruck von 8 bar ein Konsolidierungsdruck auf die Fügefläche von maximal 1,76 MPa erreicht werden. Durch eine eingelegte Gummischicht wird der Druck gleichmäßig auf die Fügezone verteilt. Der Druck wird außerdem über zwei Tellerfederpakete reduziert und auf die Kontaktklötze übertragen.

Die Kontaktklötze bestehen aus Kupfer um eine möglichst gute Stromleitung zu ermöglichen. Ebenfalls durch eine Gummilage gleichmäßig mit Druck beaufschlagt, wird der Schweißleiter über zwei Kupferplättchen an den beiden Enden kontaktiert.

Der Schweißleiter besteht in den folgenden Versuchen aus einem gewobenen Kohlenstofffaserprepreg mit einer LM-PAEK Matrix der Firma Toray mit dem Namen Toray Cetex® TC1225 5HS, T300JB carbon woven prepreg, 277gsm. Seine physikalischen und

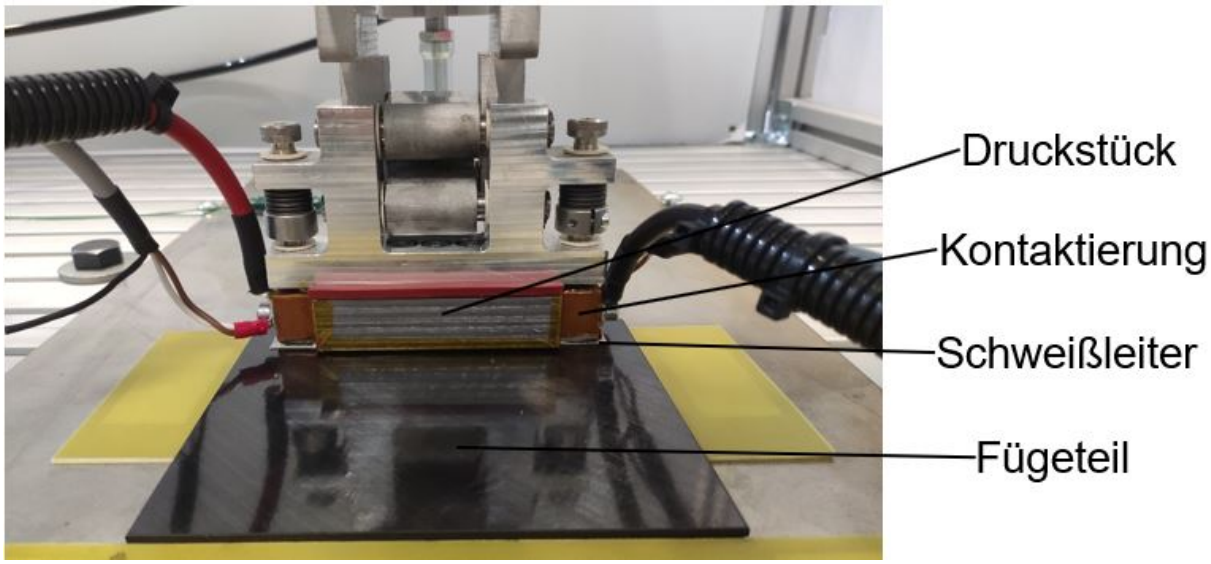


Abbildung 2.3: *Aufbau des Widerstandsschweißmoduls am DLR in der Rückansicht mit Markierung der wichtigsten Komponenten.*

mechanischen Eigenschaften, welche aus dem Datenblatt übernommen wurden, sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Alle weiteren mechanische Eigenschaften können dem Datenblatt in Anhang A entnommen werden.

Um einen parallelen Zuschnitt zum Faserverlauf sicherzustellen, erfolgt der Zuschnitt an einem automatischen Cutterzentrum. Dort werden die Schweißleiter aus den gelieferten Rollen auf eine Größe von 84 mm x 22 mm zugeschnitten. Besonders wichtig für eine gute Schweißung und einen sicheren Prozess ist die Kontaktierung zwischen den Kupferkontaktklötzen und dem Schweißleiter. In der aktuellen Konfiguration werden zur Verbesserung der Kontaktierung die beiden freien Enden des Schweißleiters durch eine zweireihige Nadelung mit Geradstich (Stichmuster L1W0) an einer Singer Nähmaschine, im 90° Winkel zur Faserorientierung perforiert. Dabei wird die Perforierung von unten durchgeführt, was zu einem Aufspreizen der Fasern an der Kontaktoberfläche führt. Auf die freie Oberseite der Schweißleiterenden wird dann ein Edelstahl-Gewebe mit einer Maschenweite von 0,3 mm und einer Drahtdicke von 0,065 mm (Bezeichnung: Spörl stainless steel DIN 1.4301/ AISI 304, d = 0,065 mm, w = 0,300 mm) mittels Ultraschallschweißen durch einen Kuka-Roboter aufkonsolidiert. Dieses soll eine gleichmäßige Kontaktierung aller Fasern sicherstellen.

Tabelle 1: *Die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Toray Cetex® TC1225 (entnommen aus Anhang A)*

Eigenschaft	Toray Cetex® TC1225
Faserflächengewicht (FAW)	$281\,\frac{g}{m^2}$
Plattengewicht (PAW)	$489\,\frac{g}{m^2}$
Matrixanteil am Gesamtgewicht (RC)	43 %
Konsolidierte Plattendicke (CPT)	$0.31\,mm\,(0.0122\,in.)$
Dichte	$1,53\,\frac{g}{cm^3}$
Zugfestigkeit 0°	$2410\,MPa$
Elastizitätsmodul 0°	$135\,GPa$
Zugfestigkeit 90°	$86\,MPa$
Elastizitätsmodul 90°	$10\,GPa$

Die Isolationslage soll den Schweißleiter von den Fügepartnern elektrisch isolieren. Da während des Schweißprozesses an den Schweißleiter eine Spannung angelegt wird, besteht die Gefahr, dass der Strom in die angrenzenden (elektrisch leitenden) Fügepartner einkoppelt und eine Erwärmung der Fügezone verhindert. Um dem Vorzubeugen, wird auf beiden Seiten des Schweißleiters noch eine Isolationslage befestigt. Dazu hat die Isolationslage etwas größere Abmessungen als der Schweißleiter, lässt aber die Kontaktflächen an seinen Enden frei. Die untere Isolationslage misst 110 mm x 25 mm und die Obere 90 mm x 25 mm bei 100 µm Dicke. In den durchgeführten Versuchen kommen zwei verschiedene Materialien als Isolationslage zum Einsatz. Das Erste ist ein glasfaserverstärktes LM-PAEK der Firma Toray, genaue Bezeichnung: Toray 4HS, EC5 E-glass prepreg, 105gsm. Wichtig ist, dass hier die gleiche Matrix verwendet wird wie im Schweißleiter und den Fügepartnern, um eine gute Verbindung zu gewährleisten. Da das verwendete LM-PAEK in beiden Fällen von der Firma Victrex bezogen wird, ist dies sichergestellt.

Das andere verwendete Material ist eine Lage thermoplastischer Film, also eine dünne Matrixschicht. Diese kommt, um eine Kompatibilität mit den anderen Werkstoffen sicherzustellen, direkt von der Firma Victrex (Produktname: APTIV AE™ Film 6013-AEG-100-0610mm Vari-Length Dev Gd). Diese Matrixisolationslage besitzt bei einer Dicke von 100 µm ebenfalls Abmessungen von 110 mm x 25 mm unten und 90 mm x 25 mm oben. Beide Materialien verhindern durch ihren sehr hohen elektrischen Widerstand einen Kontakt

zwischen Schweißleiter und Fügeteilen. In Abbildung 2.4 sieht man beide Schweißleiterkonfigurationen mit Isolationslage. Die Isolationslagen werden mit einer Handultraschallsonotrode seitlich geheftet.

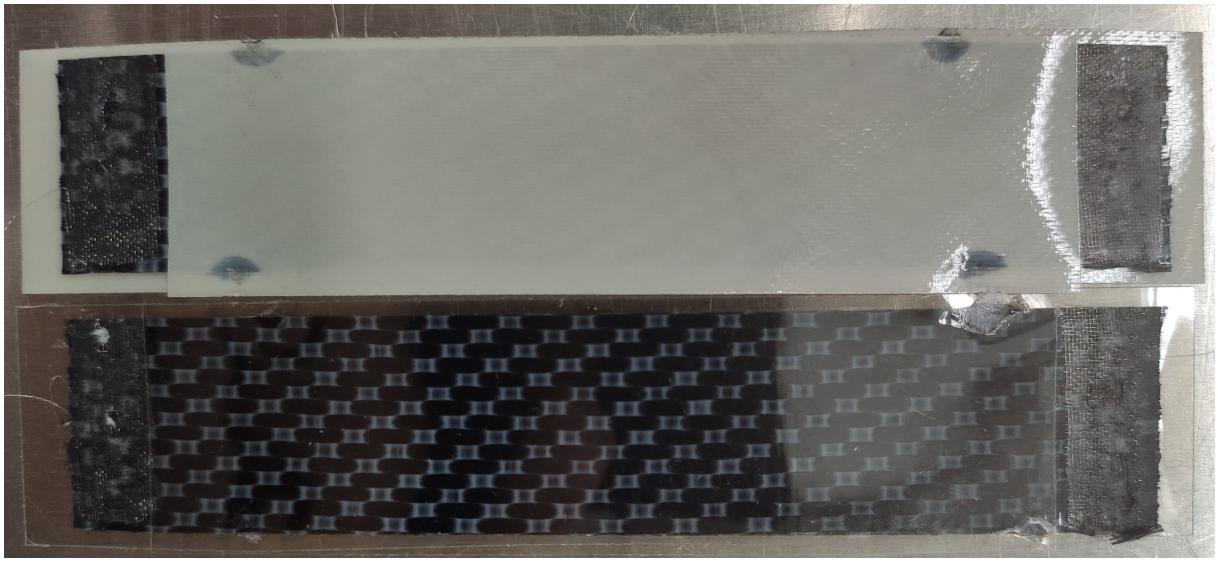


Abbildung 2.4: *Präparierte Schweißleiter mit Isolationslage. Oben mit Glasisolation, unten mit Matrixisolation. Auf den Kontaktflächen ist das Edelstahlgewebe zu erkennen und an den Seiten die Heftpunkte der Ultraschallsonotrode.*

Die Fügeteile sind in den beschriebenen Versuchen zwei Organobleche aus kohlenstofffaserverstärktem LM-PAEK Cetex® TC1225 von der Firma Toray. Dabei wird ein etwas kleineres Organoblech mit Abmessungen h x b von 120 mm x 84 mm auf ein etwas größeres Organoblech mit den Abmessungen h x b von 120 mm x 140 mm geschweißt. Die Fügezone ist durch die Abmessungen auf 84 mm x 22 mm festgelegt. In Abbildung 2.7 sieht man einen geschweißten Probekörper. Für Matrix und Faser werden die gleichen Werkstoffe verwendet wie für den Schweißleiter, um eine möglichst gute Verbindung zu ermöglichen. Die Organobleche werden presskonsolidiert und besitzen folgenden Lagenaufbau in Grad: 45,135,90,0,135,45,45,90,135,45,135,0,90,135,45. Das 15 lagige Laminat ist eine Sonderanfertigung und besitzt eine Dicke von 2,76 mm. Die Decklagen liegen in einem 45° Winkel zum Schweißleiter. Durch die Sonderanfertigung sind keine Festigkeitswerte bekannt.

Kombiniert man alle Einzelteile, ergibt sich die Fügezone zu einem 5 lagigen Aufbau. Je zwei Organobleche und zwei Isolationslagen zwischen denen mittig der Schweißleiter liegt. In Abbildung 2.5 ist der Lagenaufbau im Querschnitt schematisch gezeichnet.

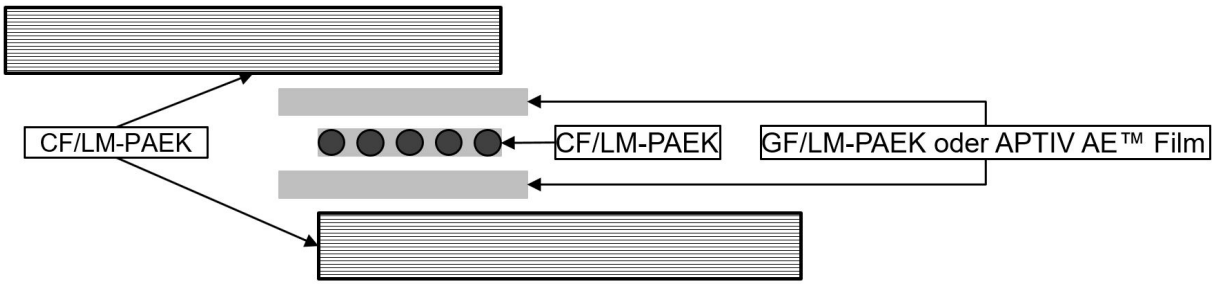


Abbildung 2.5: *Lagenaufbau der Fügezone im Querschnitt.*

2.3.2. Die Prozessschritte

Den Prozess des elektrischen Widerstandsschweißens kann man in drei Phasen gliedern: Die **Aufheizphase** beginnt, wenn durch das Netzteil eine Spannung an den Schweißleiter angelegt wird. Durch den fließenden Strom im Schweißleiter entsteht die Wärme in der Fügezone. Dieser direkt in der Fügezone stattfindende Wärmeeintrag zeichnet das elektrische Widerstandsschweißen aus, da die Verschweißung unabhängig von der Bauteildicke ist. In Abbildung 2.6 sieht man den Spannungs- sowie den Temperaturverlauf einer Schweißung mit 25 V Schweißspannung für 25 s. Die auftretenden periodischen Ausschläge in der Spannungskurve sind auf ein Fehler im Messaufbau zurückzuführen. Bei externer Messung sind sie nicht zu beobachten, liegen also nicht am Schweißmodul an. Die Aufheizphase ist im Prozess mit einer 1 gekennzeichnet. Ihre Dauer hängt stark von den verwendeten Prozessparametern ab. Diese werden in Unterunterabschnitt 2.3.3 genauer beschrieben. Je nach Schweißspannung, Schweißdruck, Übergangswiderstand und gewünschter Temperatur, variiert die Aufheizdauer. In den durchgeführten Versuchen wurde mit verschiedenen Schweißspannungen geschweißt. Eine Auswertung hinsichtlich der Auswirkungen auf die Verbindungsqualität findet in Abschnitt 4 statt. Es wurden auch verschiedenen Druckniveaus in der Aufheizphase untersucht und in Unterunterabschnitt 3.3.2 beschrieben.
Die zweite Phase, die **Fügephase**, beginnt mit Erreichen der Schmelztemperatur des verwendeten Polymers. Die nun durch die Schmelze beweglichen Molekülketten können sich durch Diffusionsvorgänge mit denen der anderen Bauteile verschlingen und somit eine Kohäsionsverbindung schaffen. Die mit 2 in Abbildung 2.6 gekennzeichnete Phase beginnt also schon bevor die Aufheizphase beendet ist. Wenn die Spannung nach der eingestellten Schweißdauer abgeschaltet wird, sinkt die Temperatur wieder. Die Phase endet, sobald die Kristallbildung abgeschlossen ist. Wichtig in dieser Phase ist ein ausreichend hoher

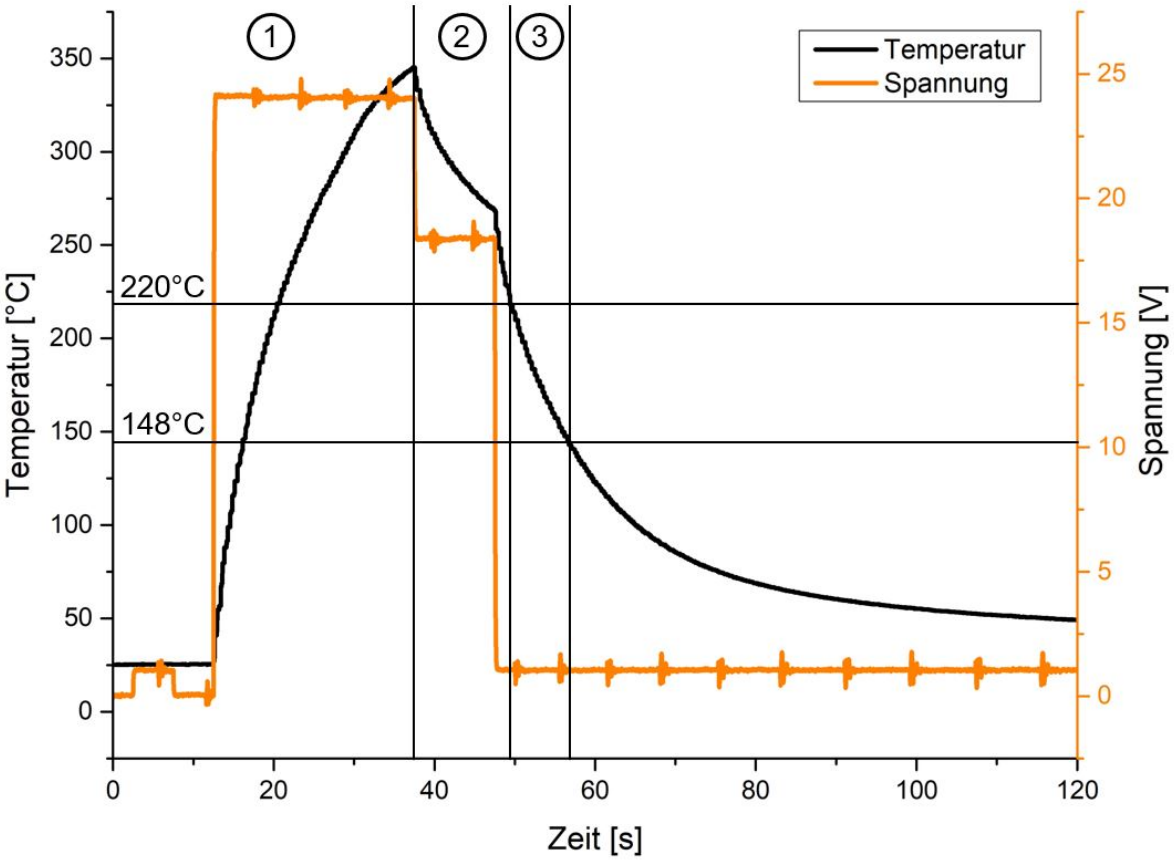


Abbildung 2.6: *Spannungs- und Temperaturverlauf einer Schweißung mit 25 V für 25 s und einer Kühlspannung von 19 V für 10 s. Eingezeichnet sind als vertikale Linien die drei Prozessschritte mit Nummerierung. Definiert werden die Abschnitte durch das Abschalten der Spannung für die Aufheizphase (1), durch das Ende der Nachkristallisation bei* 220 °C *für die Fügephase (2) sowie der Glasübergangstemperatur bei* 148 °C *für die Abkühlphase (3).*

Schweißdruck, um sicherzustellen, dass es zu einer homogenen und festen Verbindung ohne Lufteinschlüsse und anderen Fehlern zwischen den Bauteilen kommt. Die Diffusionsvorgänge können im Fügeprozess noch unter der Schmelztemperatur bis etwa 280 °C aktiv sein. Das Polymer beginnt zu erstarren und durch die Bildung der für teilkristalline Thermoplasten charakteristischen kristallinen Bereiche, werden die Molekülketten wieder in ihrer Position fixiert. Die Kristallbildung ist abgeschlossen, wenn die Kristallisationstemperatur von 220 °C erreicht ist. Die Güte und Anzahl der sich bildenden Kristalle ist wiederum stark von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Über die Prozessführung kann diese gesteuert werden, indem vorher noch eine Kühlspannung angelegt wird. Diese verlängert die Zeit über der Kristallisationstemperatur, um den Kristallitgehalt durch eine verlangsamte Abkühlung zu erhöhen. Versuche mit dieser Prozessführung werden in Abschnitt 4 untersucht und REM-Aufnahmen zur Kristallinitätsuntersuchung in Ab-

schnitt 3.2.3 ausgewertet.

Es schließt sich die dritte und letzte Phase an, die **Abkühlphase**. Nach Erreichen der Kristallisationstemperatur erfolgt die schnelle Abkühlung bis auf die Glasübergangstemperatur bei welcher das Ende des Prozesses erreicht ist. Hier gilt es, ebenso wie in der Aufheizphase, die Phase möglichst kurz zu halten um die Prozesszeit zu minimieren. Allerdings müssen Eigenspannungen in den Bauteilen vermieden werden. Durch zu hohe Abkühlraten und eine damit verbundene ungleichmäßige Abkühlung, werden Eigenspannungen begünstigt. ([2] S. 23)

Alle drei Phasen sind in ihrer Dauer stark von den verwendeten Prozessparametern abhängig. Diese werden im folgenden Unterunterabschnitt 2.3.3 näher erläutert.

2.3.3. Die Prozessparameter

Die Sicherheit, Qualität und die Wirtschaftlichkeit der Schweißung wird maßgeblich von den verwendeten Prozessparametern bestimmt. Beim elektrischen Widerstandsschweißen können die verschiedenen Prozessparameter in direkte und indirekte Parameter unterteilt werden. Über die direkten Prozessparameter lässt sich der Prozess unmittelbar steuern. Ihr Einfluss auf das Ergebnis ist also sehr groß. Die indirekten Prozessparameter sind Einflussgrößen die zwar optimiert werden können und für ein gutes Ergebnis unabkömmlich sind, vorgenommene Veränderungen beeinflussen aber beispielsweise nur Teilbereiche des Endergebnisses und können nicht den Prozess steuern.

Zu den direkten Prozessparametern gehören:

- Schweißspannung
- Schweißdauer
- Konsolidierungsdruck

Indirekte Prozessparameter sind:

- Kontaktierungsdruck
- Übergangswiderstand
- Kühlspannung
- Kühldauer

Diese werden im Folgenden erläutert.

Die Schweißspannung ist in dieser Arbeit der Schweißparameter. Über das verwendete Schweißnetzteil wird der Prozess spannungsgesteuert durchgeführt. Laut Arias ([2] S. 40 ff.) hat das gegenüber der stromgesteuerten Aufheizung Geschwindigkeitsvorteile. Über die Spannungshöhe wird in der Aufheizphase die Geschwindigkeit der Aufheizung bestimmt. Sie bestimmt außerdem die eingebrachte Schweißenergie in der Fügezone gemäß $E = U \cdot I \cdot t$. Die Leistung, welche benötigt wird um die Fügezone auf Schmelztemperatur zu erhitzen und die Wärmeverluste auszugleichen, also welche das Netzteil in der Aufheizphase leisten muss, ergibt sich bei bekannter Spannung und Widerstand aus $P = \frac{U^2}{R_{SL}}$.

Die Schweißdauer bestimmt die im Prozess erreichte Temperatur. Durch sie wird eingestellt, wie lange die Schweißspannung an den Schweißleiter angelegt wird. Die Schweißdauer beschreibt die Zeit vom Anschalten bis zum Ende der Schweißspannung. Die verschiedenen Abschnitte der Schweißung sind in Abbildung 2.6 über Temperatur und Schweißspannung eingezeichnet. Hier wird sichtbar, dass die maximale Temperatur mit dem Ende der Schweißdauer einhergeht. Je nach Haltedauer der Spannung wird ein bestimmtes Temperaturniveau erreicht und so die maximale Prozesstemperatur bestimmt. Ab einer für jedes Spannungsniveau individuellen Dauer, bildet sich ein Temperaturplateau. Die weitere Erwärmung beschränkt sich danach nur noch auf die durch die Heißleitereigenschaften der Kohlenstofffaser hervorgerufene Temperaturerhöhung.

Der Konsolidierungsdruck ist der Druck, welcher auf die Fügezone gegeben wird, um während der Fügephase die Verbindung zu realisieren. In der aktuellen Schweißstandkonfiguration kann mit einem Zylinderdruck von 8 bar bei den beschriebenen Schweißelementmaßen ein Druck von max. 1,76 MPa realisiert werden. Dabei hat der Druck in den verschiedenen Phasen unterschiedliche Aufgaben und kann durch eine am Versuchsstand verbaute zweistufige Druckaufbringung in Aufheiz- und Fügephase unterschiedlich sein. In Unterunterabschnitt 3.3.2 wird diese zweistufige Druckaufbringung beschrieben und

ihre Auswirkungen auf die Prozesssicherheit und Verbindungsfestigkeit untersucht. Während der Aufheizphase stellt der Konsolidierungsdruck einen direkten Kontakt zwischen Schweißelement und Organoblech sicher, um eine gute Wärmeeinleitung in die Organobleche zu ermöglichen. In der Fügephase verhindert der Konsolidierungsdruck das Aufquellen und Verformen der Organobleche durch Ondulationen, welche durch gespeicherte Energie der Fasern auftreten können. Er sorgt für eine blasenfreie Fügezone, indem möglicherweise vorhandene Lufteinschlüsse seitlich ausgdrückt, oder so komprimiert werden, dass ein aufbacken des Laminats verhindert wird. Außerdem kann durch an den Seiten austretendes Matrixmaterial (Quetschfluss genannt) der Faservolumenanteil in der Fügezone und damit die Festigkeit gesteigert werden. Außerdem ist der Quetschfluss ein optisches Anzeichen dafür, dass die Schmelze erreicht wurde und erleichtert durch die entstehende Bewegung in der Fügezone ein Durchmischen der Fügepartner. Ist der Druck allerdings zu stark, wird zu viel Matrix ausgequetscht. Exzessiver Quetschfluss führt dann zu einer sehr trockenen Fügezone mit hohem Faservolumengehalt. Steigt der Faservolumengehalt zu stark an, führt das direkte Aufeinanderliegen der Fasern durch den fehlenden Kraftübertrag durch die Matrix zu einem drastischen Festigkeitsabfall. Der Druck muss über den Prozess bis zum Erreichen der Glasübergangstemperatur in der Abkühlphase aufrecht gehalten werden. ([2] S. 45 f.)

Der Kontaktierungsdruck ist durch die konstruktive Auslegung des Schweißmoduls direkt vom Konsolidierungsdruck abhängig. Um eine gute Kontaktierung zwischen Kupferkontakt und Schweißleiter sicherzustellen, ist der Kontaktierungsdruck essenziell. Durch eine Verbesserung des Engewiderstandes[5] ist der Kontaktierungsdruck ein wichtiger Prozessparameter für einen kontrollierten Wärmeeintrag in die Fügezone und einen geringen Übergangswiderstand.

Der Übergangswiderstand, also der Widerstand welcher überwunden werden muss, damit der Strom in die Kohlenstofffaser einkoppeln kann, wird besonders durch zwei Dinge

[5] Widerstand welcher durch die Rauheit und Unebenheiten von zwei Kontaktflächen und die damit verbundene verkleinerte Kontaktfläche hervorgerufen wird

beeinflusst. Zum einen der erwähnte Kontaktierungsdruck, zum anderen aber auch die Beschaffenheit der Kontaktzone. In der Literatur werden verschiedene Ideen zur Präparierung der Kontaktzone diskutiert. In dieser Arbeit wird, um eine Vergleichbarkeit der Versuche sicherzustellen, hauptsächlich mit einer Kontaktflächenkonfiguration geschweißt. Dafür wird der Schweißleiter, wie in Unterunterabschnitt 2.3.1 beschrieben, an der Kontaktierungsstelle mit eine Nähmaschine transversal von unten perforiert, sodass die Kohlenstofffasern durch die Matrixschicht nach oben aufspreizen. Anschließend wird eine Edelstahlgewebe durch Ultraschallschweißen integriert, um den Kontakt der Fasern untereinander und mit dem Kupferkontakt noch einmal zu verbessern. Da das in der Literatur oft beschriebene entfernen der Matrix durch Abbrennen oder Wegätzen einen erheblichen Mehraufwand darstellt und vergleichbare Widerstandswerte ergibt, wurde sich für die beschriebene Methodik entschieden. Nur in Unterunterabschnitt 3.2.4 wird eine Versuchsreihe mit einer anderen Kontaktierung beschrieben, in der die Matrix durch eine Ultraschallsonotrode im Kontaktierungsbereich entfernt wurde.

Die Kühlspannung und die Kühldauer sind zwei Parameter welche sich auf die Fügephase beziehen. Wichtig für die Verbindungsfestigkeit ist eine hohe Verkettung der Moleküle sowie die Kristallbildung. Wird nach Erreichen der maximalen Temperatur die Spannung direkt abgeschaltet, fällt durch die gute Wärmeableitung des metallischen Werkzeugs die Temperatur sehr schnell ab. Bei so hohen Abkühlgeschwindigkeiten von teilweise über 36 °C pro Sekunde, haben die Moleküle nicht genug Zeit sich zu verketten bzw. der Kristallitgehalt ist durch die unvollständige Kristallbildung zu gering. Darunter leidet die Festigkeit und Homogenität der Verschweißung. Außerdem ist die Medienbeständigkeit mit steigender Kristallinität höher. Um der Verkettung und der Kristallbildung mehr Zeit zu geben und die Abkühlgeschwindigkeit zu senken, kann anschließend an die Schweißspannung noch eine Kühlspannung für eine bestimmte Kühldauer angelegt werden. Ein mögliches Parameterfenster für eine solche verzögerte Abkühlung wird in Unterunterabschnitt 3.2.3 ermittelt und in Abschnitt 4 hinsichtlich des Einflusses auf die Festigkeit und das Bruchverhalten untersucht.

2.4. Prüfverfahren

In der Auswertung der Versuche in dieser Arbeit kommen verschiedene Prüfverfahren zum Einsatz. Diese können in zerstörende und zerstörungsfreie Prüfverfahren unterteilt werden. Die verwendeten Verfahren werden in diesem Abschnitt kurz eingeführt und ihre Besonderheiten und Anwendung erläutert.

2.4.1. Zugversuch Single-Lap-Shear DIN-EN 2243-1 und AITM1-0019

Der SLS-Zugversuch[6] ist ein zerstörendes Prüfverfahren und das am häufigsten durchgeführte Prüfverfahren in der Werkstoffprüfung. Um Zugproben international vergleichbar zu machen, ist das Verfahren standardisiert. Der in dieser Arbeit verwendete Zugversuch ist in der DIN-EN 2243-1 unter „Luft- und Raumfahrt - Nichtmetallische Werkstoffe - Strukturelle Klebstoffsysteme - Prüfverfahren - Teil 1: Bestimmung der Bindefestigkeit von einschnittig überlappten Klebungen im Zugversuch“ beschrieben. Getestet werden Ausschnitte aus den geschweißten Proben mit einer Breite von einem Zoll (25,4 mm). Aus dem geschweißten Organoblechverbund mit einer Schweißnahtlänge von 84 mm, können so an einer Wasserstrahlschneidemaschine drei Zugproben getrennt werden. In Abbildung 2.7 sieht man die Lage der drei Zugproben. Je nachdem, ob mit einem mittig eingelegten Thermoelement geschweißt wurde, können alle drei oder nur die beiden äußeren Zugproben getestet werden, da das Thermoelement großen Einfluss auf die Festigkeit hat und die Ergebnisse verfälschen würde. Die Tests werden an einer Zwick BTC Z100 Zugprüfmaschine der Firma ZwickRoell durchgeführt. Die Proben werden dabei an beiden Enden eingespannt und mit einer konstanten Geschwindigkeit auseinandergezogen, bis ein Schubversagen in der Fügezone eintritt. Sie stehen dabei unter einer einachsigen, über den Querschnitt gleichmäßig verteilten Zugbeanspruchung. Während der Prüfung wird die Kraft an der Probe sowie die Längenänderung konstant gemessen. Anschließend kann das Spannungs-Dehnungsdiagramm gebildet werden. Daraus können unter anderem Elastizitätsmodul und Zugfestigkeit ermittelt werde. Am interessantesten für die Verschweißung sind aber die maximal erreichte Kraft in N bzw. die Bindefestigkeit in MPa. Die erreichte Maximalkraft wird direkt von der Zugprüfmaschine ausgegeben, wohingegen

[6] englisch Single-Lap-Shear, auf deutsch einfachüberlappender-scher-Zugversuch

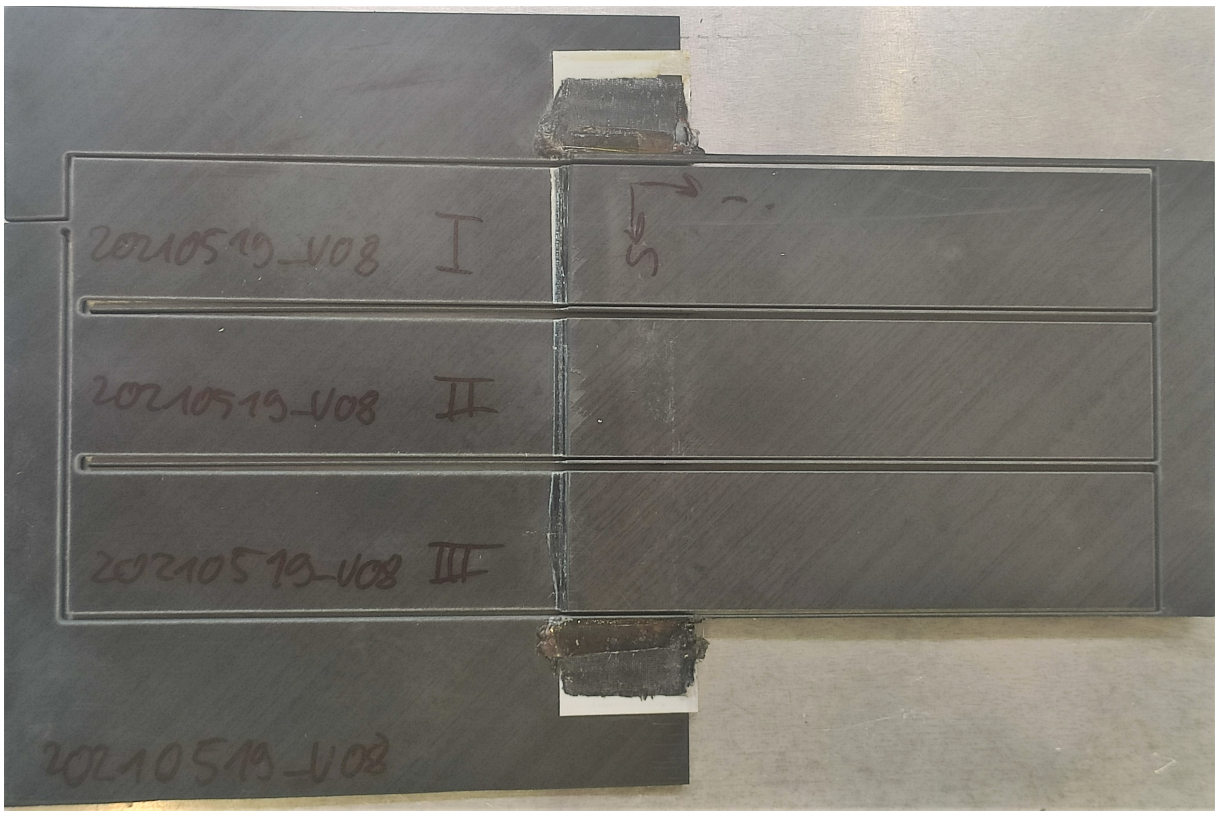


Abbildung 2.7: *Zuschnitt von drei 25,4 mm (1 Zoll) breiten und 195 mm langen SLS-Zugproben aus dem Organoblechverbund mittels Wasserstrahlschneidanlage.*

die Bindefestigkeit sich als Quotient der verschweißten Fläche und der Maximalkraft ergibt. Für verschweißte Proben erfolgt die Bewertung am DLR durch einen Schweißfaktor. Für den Schweißfaktor wird ein Referenzlaminat hergestellt, welches den gleichen Lagenaufbau wie die Fügezone besitzt, allerdings nicht geschweißt, sondern in einer Heißpresse unter optimalen Bedingungen hergestellt wurde. Das Referenzlaminat wird ebenfalls im Zugversuch getestet. Im Schweißfaktor wird nun der Quotient aus den Festigkeitswerten der Schweißung und denen des Referenzlaminats gebildet. Es ergibt sich eine Zahl <1. Je näher sie an der Eins liegt, desto hochwertiger ist die Schweißung. So können auch Schweißungen verglichen werden, welche nicht den gleichen Lagenaufbau haben. Dies ist sinnvoller, da immer das Verhältnis zur Festigkeit eines Referenzlaminats mit gleichem Aufbau bewertet wird. Für den aktuell geschweißten Lagenaufbau wurde noch kein Referenzlaminat hergestellt, weswegen ein Vergleich der Schweißungen nur untereinander möglich ist. ([4] S. 97 ff., [9])

2.4.2. Bruchflächenanalyse

Nachdem die Zugprobe durchgeführt wurde, hat man zwar Werte zur Zugfestigkeit und Bindefestigkeit, allerdings können anschließend durch eine Bruchflächenanalyse noch weitere Informationen zu Bruch- und Versagensart sowie dem Versagensort gewonnen werden. Dafür wird die Bruchfläche der Probe an einem Auflichtmikroskop untersucht und ausgewertet. Das verwendete Auflichtmikroskop ist das VHX-5000 von der Firma Keyence mit einem Objektiv mit 20 - 200 - facher Vergrößerung. Wenn die Probe in das Mikroskop eingelegt ist, können mit der gewünschten Vergrößerung Aufnahmen der Bruchfläche gemacht werden. Zur Identifizierung des Bruchverhaltens müssen vor der Untersuchung die möglichen Brucharten definiert werden. In dieser Arbeit werden vier Brucharten unterschieden und in Tabelle 2 beschrieben. In Abbildung 2.8 sind die möglichen Brucharten außerdem schematisch abgebildet.

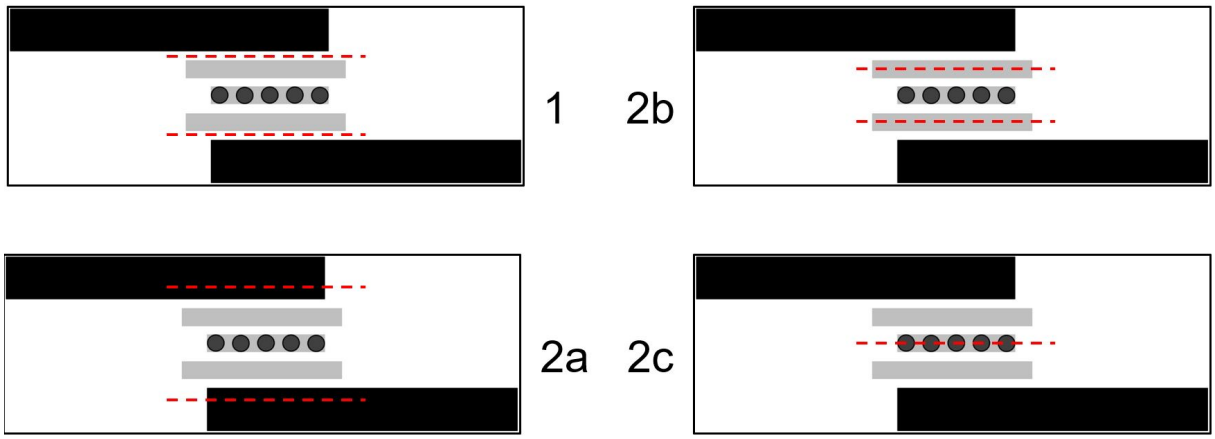


Abbildung 2.8: *Die vier verschiedenen Brucharten. Unmaßstäblich gezeichnet in der Seitenansicht. Der jeweilige Versagensort ist als rote Linie markiert.*

Bei den Bruchflächen der gezogenen Proben handelt es sich in fast allen Fällen um einen Mischbruch, also eine Kombination der beschriebenen Brucharten. Um diese trennen zu können und Hauptbruchart sowie die Anteile der Brucharten an der Gesamtfläche bestimmen zu können, bedarf es weiterer Schritte. Am Mikroskop können in der Auswertung am erstellten Foto der Bruchfläche mit einer Polygonzugfunktion beliebige Bereiche markiert werden. Die Software des Mikroskops errechnet automatisch, je nach verwendetem Maßstab, den Flächeninhalt der markierten Flächen und speichert diese in einer Datei ab. In dieser können dann, nach der Zuordnung der Bruchart zu den jeweiligen Flächen, die gewünschten Informationen wie Hauptbruchart und die Anteile der Brucharten an der

Tabelle 2: *Brucharten*

Bruchart	Beschreibung
1	Kaltverschweißung. Keine Anbindung zwischen Schweißleiter und Isolationslage bzw. Isolationslage und Organoblech. Erkennbar an einer glänzenden Oberfläche. Kein Aufschmelzen der Fügezone in diesem Bereich im Prozess
2a	kohäsives Substratversagen. Versagen im Organoblech, keine Aussage über die Festigkeit der Verschweißung möglich. Erkennbar an freiliegenden Fasern des Organobleches bzw. an der deutlich tiefer liegenden Bruchfläche.
2b	kohäsives Versagen in der Isolationslage. Erkennbar an Matrixrückständen der Isolationslage an den Organoblechen oder freiliegenden Glasfasern bei einer Isolation mit Glasisolationslage.
2c	kohösives Versagen im Schweißleiter. Erkennbar an den freiliegenden, unidirektionalen Schweißleiterfasern.

Gesamtfläche errechnet werden. In Abbildung 2.9 sieht man auf der linken Seite das Foto der Probe mit beispielhaft markierten Brucharten und auf der rechten Seite die selbe Probe nach der Analyse am Mikroskop mit den markierten Flächen und ihren Flächeninhalten. Besonders wichtig ist die Bruchflächenanalyse für die statistische Versuchsplanung

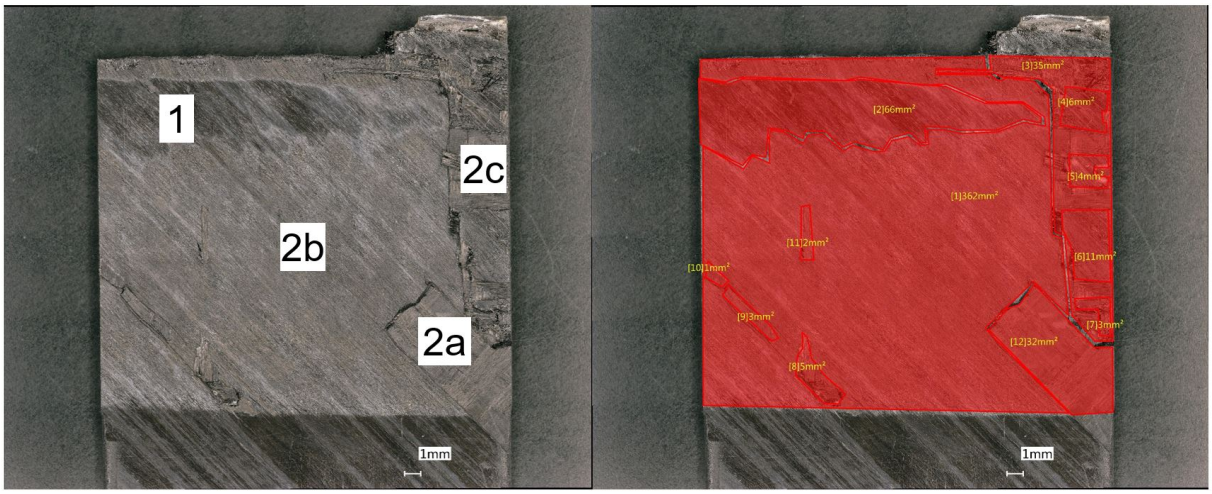


Abbildung 2.9: *Am Mikroskop ausgewertete Zugprobe in einem Maßstab von 1 mm mit markierten Flächen unterschiedlicher Brucharten und ihrer Flächeninhalte. Für einige Flächen wurde im rechten Bild die Bruchart zur Veranschaulichung eingefügt.*

in Abschnitt 4, da die Hauptbruchart und der prozentuale Anteil der verschweißten Fläche an der Gesamtfläche (Anteil der Brucharten 2a-c an der Gesamtfläche) zwei der vier ausgewerteten Ergebnisse sind.

2.4.3. Wasserultraschallverfahren

Das Wasserultraschallverfahren ist das einzige zerstörungsfreie Prüfverfahren, welches in dieser Arbeit verwendet wird. Deswegen wird es bei jeder Probe angewendet bevor weitere, die Probe zerstörende, Prüfungen erfolgen um sich ein schnelles Bild über Qualität und Homogenität der Verschweißung bilden zu können. Die Prüfung erfolgt durch ein Ultraschallgerät der Firma Olympus. Die Prüfung mit Ultraschall ist ein akustisches Verfahren, bei dem über einen Prüfkopf Longitudinalwellen in das zu untersuchende Bauteil eingekoppelt werden. Longitudinalwellen sind Wellen, bei denen die Schwingungsrichtung der Teilchen in der gleichen Ebene wie die Ausbreitungsrichtung der Welle liegt. Damit ist eine Übertragung in festen, flüssigen und gasförmigen Medien möglich. Dabei wird der Effekt genutzt, dass unterschiedliche physikalische Medien die Wellen verschieden stark reflektieren respektive transmittieren. Durch die reflektierten Strahlen, welche durch ein Umschalten des Senders in einen Empfänger, durch Ausnutzung des inversen piezoelektrischen Effekts, in Laufzeit, Frequenz und Intensität empfangen werden können, kann das Gerät ein verwertbares Bild mit Informationen über mögliche Ungänzen und Grenzflächen sowie ihre Lage im untersuchten Material geben. Das verwendete Ultraschallgerät Omniscan SX besteht dabei aus dem Rechner mit Anzeige sowie einem Prüfkopf (Olympus 5L64-NW1) welcher in einer Wedge genannten Einkoppelhilfe (SNW1-OL-IHC) sitzt. Zwischen Wedge und Prüfkopf wird durch Glyzerin als Koppelmedium eine möglichst geringe Schallreflektion erzeugt. Zwischen Wedge und Prüfteil kommt Wasser als Koppelmittel zum Einsatz. Der Prüfkopf gibt eine Frequenz von 5 MHz über ein lineares Array mit 64 Elementen ab. Auf der Anzeige des Omniscan wird nach dem Aufsetzen des Prüfkopfes auf die Probe der A- B- und C-Scan angezeigt. In Abbildung 2.10 sind zur besseren Verdeutlichung zwei Schweißungen zu sehen.

Die Ausgabe ist dabei immer gleich aufgebaut. Oben links befindet sich der A-Scan, welcher den Betrag der Amplitude des empfangenen Reflektionssignals angibt. Dafür wird der Betrag der negativen Halbwellen gebildet, wodurch man Dämpfungen des Ultraschallsignals durch Unterschiede in der Amplitudenhöhe auf einen Blick sehen kann. Es ist in beiden Bildern gut das Einkoppelsignal zu erkennen, welches durch den Übergang von der Wedge in das erste Organoblech erzeugt wird. In der Mitte des Scans ist die Fügezone zu sehen. Je nach Qualität der Verschweißung sieht man sie mit einer deutlichen (unterer

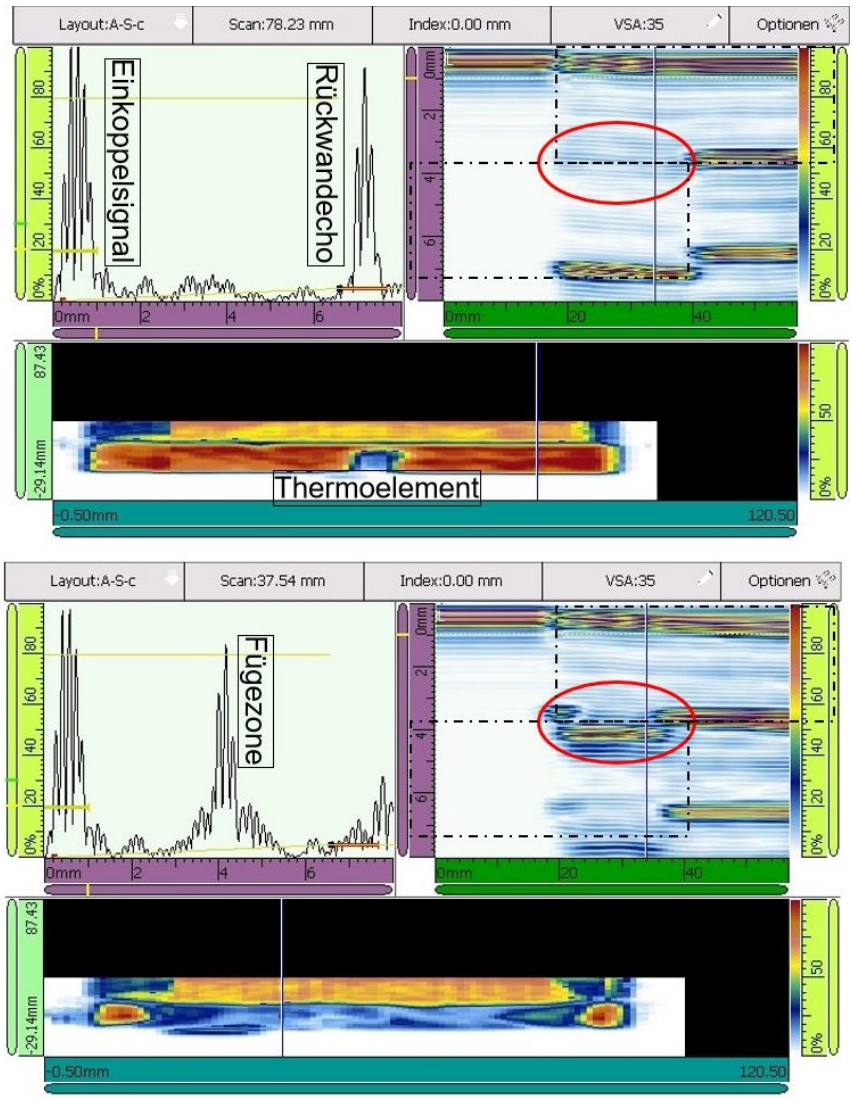


Abbildung 2.10: *Ergebnisdarstellung zweier Wasserultraschallprüfungen mit A-, B- und C-Scan. Ultraschallprüfgerät Olympus OmniScan SX mit dem Prüfkopf Olympus 5L64-NW1 und der Wedge SNW1-OL-IHC. In rot ist im B-Scan die Position der Fügezone markiert und in schwarz die theoretische unmaßstäbliche Lage der Organobleche.*

Scan, schlechte Verschweißung) oder weniger deutlichen (oberer Scan, gute Verschweißung) Schallschwächung und entsprechender Amplitude. Auf der rechten Seite im A-Scan befindet sich das Rückwandecho. An diesem wird, durch den Übergang in Luft, der restliche Schall reflektiert. Je nach vorheriger Schwächung, fällt diese Reflektion stark oder weniger stark aus. Ist ein deutliches Rückwandecho zu erkennen, kann man von geringer vorheriger Schallschwächung, also einer guten Verbindung ausgehen.

Rechts daneben befindet sich der B-Scan, welcher einen Querschnitt durch das geprüfte Bauteil darstellt. Für seine Erzeugung werden verschiedene A-Scans an einer linearen Messreihe parallel angeordnet und den Amplitudenwerten Farben zugeordnet. Dadurch ergibt sich ein zweidimensionaler Querschnitt des geprüften Objekts.

Der darunter angezeigte C-Scan wird ebenfalls aus den A-Scans gebildet mit dem Unterschied, dass durch eine Aufsummierung der Amplituden jeder A-Scan nur einem Wert entspricht. Werden diese Werte mit einer Farbgebung versehen und nebeneinander angeordnet, erhält man eine Draufsicht des Prüfobjektes. Dadurch kann direkt die Lage einer möglichen Fehlstelle in Scanrichtung ermittelt werden. Im A- bzw. B-Scan kann dann die Lage in Dickenrichtung der Probe ermittelt werden. Ein Beispiel für eine Ungänze ist das im C-Scan der oberen Probe in Abbildung 2.10 deutlich zu erkennende Thermoelement. Im unteren Teil ist eine Verschweißung mit einer sehr schlechten Verbindung mit deutlicher Schallreflektion in der Fügezone zu sehen. Im oberen Teil ist eine Schweißung mit einer sehr guten und homogenen Verschweißung zu sehen. Dadurch ist kaum eine Reflektion in der Fügezone zu sehen und ein deutliches Rückwandecho zu erkennen.
Durch seine zerstörungsfreie und vergleichsweise einfache Prüfung eignet sich die Wasserultraschallprüfung sehr gut, um einen ersten Eindruck über die Qualität und Homogenität einer Schweißnaht zu bekommen. Anschließende zerstörende Prüfungen wie der Zugversuch komplettieren die Auswertung mit Daten zur Festigkeit. [9]

2.4.4. Dynamische Wärmestromdifferenzkalorimetrie

Die Dynamische Wärmestromdifferenzkalorimetrie wird verwendet, um die thermischen Eigenschaften eines Materials zu bestimmen. Durch eine Messung der Wärmeenergie während der Erwärmung und Abkühlung können Phasenänderungen also endo- oder exotherme Vorgänge im untersuchten Material aufgezeichnet werden. Dadurch kann bei Kunststoffen beispielsweise die Glasübergangstemperatur, die Schmelztemperatur sowie die Kristallisationstemperatur bestimmt werden. In der DIN EN ISO 11357 ist das Verfahren der Messung beschrieben. Dabei werden zwei Materialien, das zu untersuchende Material und ein Referenzmaterial (meistens Luft), simultan in einer bestimmten Geschwindigkeit erhitzt bzw. wieder abgekühlt und die Temperatur unter beiden Proben gemessen. Bildet sich eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Proben aus, welche im Idealfall mit der spezifischen Wärmekapazität proportional ist, kann das als Spitze (engl. Peak) im Bereich der Schmelztemperatur oder als Stufe im Bereich der Glasübergangstemperatur in der graphischen Darstellung erkannt werden. In Abbildung 2.11 ist

eine DSC-Messung des in Unterunterabschnitt 2.2.2 beschriebenen LM-PAEK abgebildet. In der abgebildeten Aufheizphase kann der Glasübergangsbereich als exotherme Stufe so-

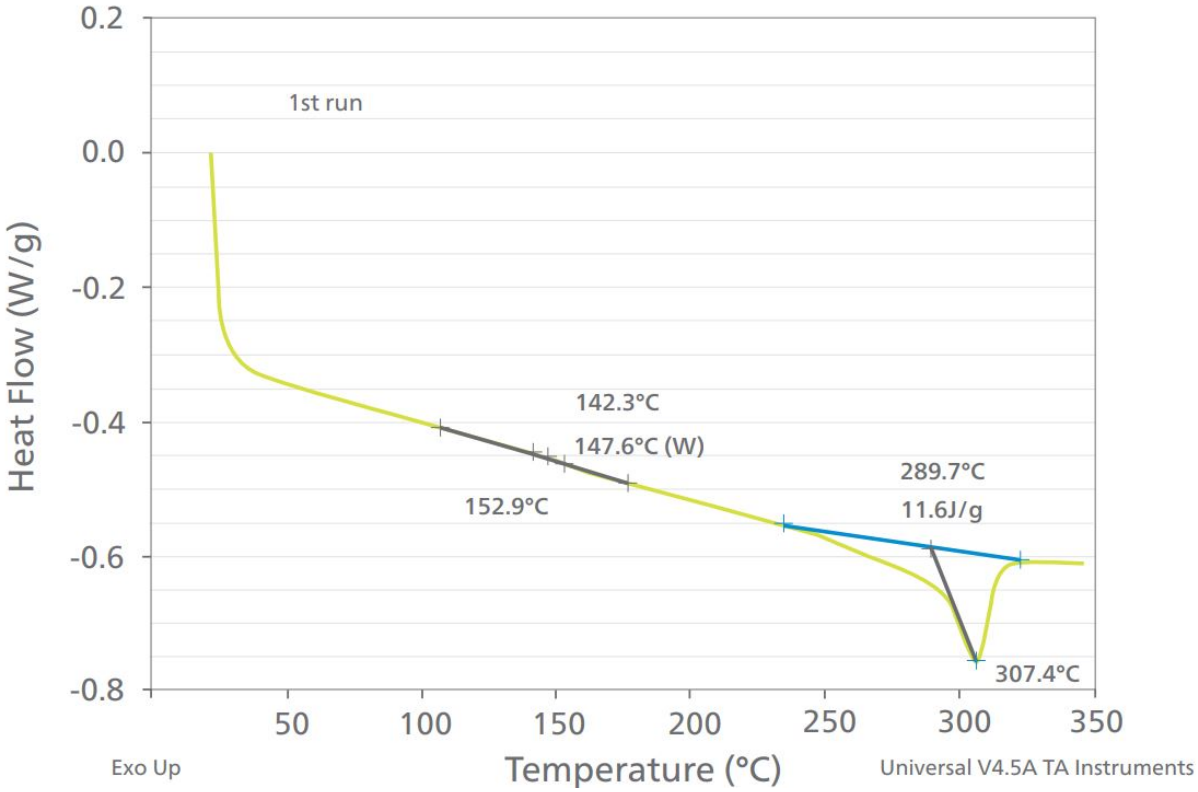


Abbildung 2.11: *DSC Thermographie der Aufheizphase von presskonsolidiertem kohlenstofffaserverstärktem LM-PAEK mit eingezeichnetem exothermen Glasübergangsbereich und endothermen Schmelzbereich. [15]*

wie der Schmelzbereich als endothermer Peak und in der anschließenden Abkühlung der Kristallisationsbereich als exothermer Peak (nicht abgebildet) beobachtet werden.
Solche Messungen erlauben erste Anhaltspunkte für ein mögliches Prozessparameterfenster und sind somit eine große Hilfe zur Reduzierung der Anzahl der nötigen Vorversuche sowie zum Verständnis der thermischen Eigenschaften eines Materials. [9]

2.4.5. Rasterelektronenmikroskopie

Ein weiteres bildgebendes Prüfverfahren ist die Rasterelektronenmikroskopie (REM). In Unterunterabschnitt 3.2.3 soll die Auswirkung einer verzögerten Abkühlung auf die Kristallbildung im Material untersucht werden. Da die Kristallite mit dem Auflichtmikroskop aus Unterunterabschnitt 2.4.2 nicht zu erkennen sind, wird eine höhere Vergrößerung benötigt, welche nur mit einem Rasterelektronenmikroskop erreicht wird. Im Gegensatz

zu einem Auflichtmikroskop erfolgt die Bildgebung hier nicht durch Licht, sondern durch einen Elektronenstrahl, welcher die untersuchte Oberfläche punktweise abrastert. Der auftreffende Elektronenstrahl löst auf der Probenoberfläche verschiedene Reaktionen aus, deren Signale zur Bildgebung genutzt werden können. Am häufigsten ist eine Bildgebung durch die Sekundärelektronen, Rückstreuelektronen sowie Röntgenstrahlung. Das in dieser Arbeit verwendete REM kann für die Bildgebung Sekundär- sowie Rückstreuelektronen verwenden. Damit die hochsensible Sensorik ohne Störung arbeitet und der Elektronenstrahl ungehindert auf die Probe trifft, wird zur Untersuchung ein Hochvakuum erzeugt. Außerdem muss die Probe besonders präpariert werden, um ein deutliches Bild der Kristalle zu erhalten.

Besonders wichtig bei thermoplastischen Werkstoffen ist eine wärmeeintragsfreie Präparierung, damit sich die kristalline Struktur nicht durch einen Wärmeeintrag verändert. Die in Unterunterabschnitt 3.2.3 beschriebenen Proben werden folgendermaßen präpariert: Als erstes wird die Probe in ein elektrisch leitendes Einbettmittel kalteingebettet und in verschiedenen Stufen geschliffen und anschließend poliert. Geschliffen wird mit einem Siliziumcarbidschleifpapier mit Korngrößen von 58,5 µm welche bis auf 8 µm reduziert werden. Anschließend erfolgt die Politur mit einer Diamantlösung mit Partikelgrößen von 3 µm bis 1 µm. Die so präparierten Proben werden in einer Gatan MET-ETCH (Model 683) Maschine ionengeätzt. Die Ionen greifen die amorphen Bereiche stärker an als die kristallinen, wodurch die Kristalle ein im Rasterelektronenmikroskop gut sichtbares Relief bilden. Die Probe wird dafür in der Ionenätzanlage in einem 45° Winkel gekippt und mit 20-30 rpm rotiert. Um eine Erwärmung der Probe durch den Ionenbeschuss auszuschließen, erfolgt die Ätzung mit 3 keV in 5 Sequenzen mit einer Dauer von 15 min. Bevor die Aufnahmen gemacht werden, wird die Probenoberfläche noch in einem letzten Schritt mit einer wenige Nanometer dicken Platinschicht besputtert, um auch die nichtleitenden Bereiche mit dem REM analysieren zu können. Anschließend werden die Proben in das Rasterelektronenmikroskop Ultra 55 der Firma Zeiss eingelegt und die Aufnahmen gemacht. In Abbildung 3.14 ist eine Aufnahme der Kristallstruktur einer Schweißung zu sehen, welche im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde. [9]

3. Grundlegende Untersuchungen zur Verbesserung des Widerstandsschweißprozesses

3.1. Untersuchungen zum Einfluss des Werkstoffes der Isolationslage auf die Zugfestigkeit und das Bruchverhalten

Damit in einer Versuchsreihe nicht noch zusätzliche Faktoren durch eine Werkstoffvariation hinzu kommen, muss man die Materialien zu Beginn definieren. Wechselt man das Material und ändert gleichzeitig Prozessgrößen, kann man nicht ohne viel statistischen Aufwand die Ursache für die beobachteten Resultate erkennen. Da die meisten der in Abschnitt 2 beschriebenen Materialien durch das Projekt vorgegeben waren, steht der Werkstoff für Organobleche, Schweißleiter und Kontaktierung bereits fest. Nur bei der Isolationslage war noch nicht zwischen Glasisolation und Matrixisolation entschieden. Um diese Entscheidung zu treffen wird in diesem Abschnitt der Einfluss der Isolationslage auf die Verbindungsfestigkeit und das Bruchverhalten untersucht.

Die Isolationslage beim elektrischen Widerstandssschweißen ist Teil des Schweißelements und liegt, wie in Abbildung 2.5 zu sehen ist, über und unter dem Schweißleiter. Das Ziel dieser Isolationslagen ist es, einen elektrischen Durchschlag zu verhindern. Das Einkoppeln des Stromes in die (elektrisch leitfähigen) Fügepartner würde den Stromfluss weg von der Fügezone leiten und somit eine Erwärmung verhindern. Wie in Unterunterabschnitt 2.3.1 beschrieben ist, stehen aktuell zwei Materialien als Isolationslagen zur Verfügung. Zum einen die in der Vergangenheit oft benutzte Glasfaserisolation, zum anderen eine Isolation aus reinem Matrixwerkstoff, für welche allerdings die Prozessicherheit noch nicht validiert wurde und keine Festigkeitswerte vorliegen. Vorweg lässt sich sagen, dass eine Isolation mit Glaslage theoretisch keine optimale Lösung darstellt, da jedes Fremdmaterial in der Fügezone eine zusätzliche und dadurch möglicherweise ungenügende Anbindung und somit eine Schwachstelle darstellt. In dieser Versuchsreihe sollten beide Isolationswerkstoffe hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Verbundfestigkeit untersucht und die Prozesssicherheit der Schweißungen mit Matrixisolation validiert werden.

Für die folgende Versuchsreihe wurden Schweißungen sowohl mit einer Isolationslage aus Glasfaser (Toray 4HS, EC5 E-Glas Prepreg mit 105 gsm, 0,1 mm Dicke) als auch aus

Reinmatrix (Victrex APTIV AE™ Film 6013-AEG-100-0610mm Vari-Length Dev Gd) durchgeführt und im SLS-Zugversuch hinsichtlich ihrer Zugfestigkeit geprüft, um den Einfluss des verwendeten Isolationslagenmaterials auf die Fügefestigkeit zu untersuchen. Die Decklagen der Organobleche befinden sich in einem 45° Winkel zum Faserverlauf des Schweißleiters. Der genaue Lagenaufbau wurde in Unterunterabschnitt 2.3.1 erläutert. Anschließend an den Zugversuch erfolgte die Bestimmung der Bruchart am Mikroskop, nach den in Unterunterabschnitt 2.4.2 definierten Kriterien. Die Schweißungen wurden auf dem in Unterabschnitt 2.3 beschriebenen Schweißstand durchgeführt. Geschweißt wurde bei allen Versuchen mit 25 V für 30 s. Nach der Schweißung werden die Organobleche mittels einer Wasserstrahlschneidemaschine in 1 Zoll (2,54 cm) breite Proben geschnitten und anschließend gezogen. Je nachdem, ob mit oder ohne ein Thermoelement geschweißt wurde, konnten aus einer Schweißprobe zwei bzw. drei Probekörper entnommen werden. In Abbildung 2.7 sieht man die drei möglichen Positionen der Probenkörper im Organoblechverbund.

Die Zugversuche wurden nach DIN EN 2243-1 (Bestimmung der Bindefestigkeit) und AITM1-0019 (Bestimmung der Scherfestigkeit bzw. $F_{\max}$) auf einer Zwick BTC Z100 MUP508 Zugprüfmaschine bei 24 °C Raumtemperatur und 34 % relative Luftfeuchtigkeit mit einer Prüfgeschwindigkeit von 3500 N/min durchgeführt.

3.1.1. Einfluss des Werkstoffes der Isolationslage auf die Zugfestigkeit

Im ersten Abschnitt soll untersucht werden, welchen Einfluss der Werkstoff der Isolationslage des Schweißleiters auf die Festigkeit hat.

Die Werte der maximal beim Zugversuch erreichten Kräfte sind in Abbildung 3.1 dargestellt. Obwohl die Werte stark streuen, unterscheiden sich die Mittelwerte signifikant (Student´s t-Test, $p<0{,}05$). Bei den Proben mit Glasisolation liegt die mittlere maximale Kraft bei 7940,90 N mit einer Standardabweichung von 1420,24 N. Bei den Proben mit Matrixisolation liegt der Wert bei 12005,69 N mit einer Standardabweichung von 2372,65 N. Somit ist eindeutig zu erkennen, dass es einen Einfluss auf die Festigkeit hat, welches Material man für die Isolationslage verwendet. Durch die Substitution der Glaslage durch

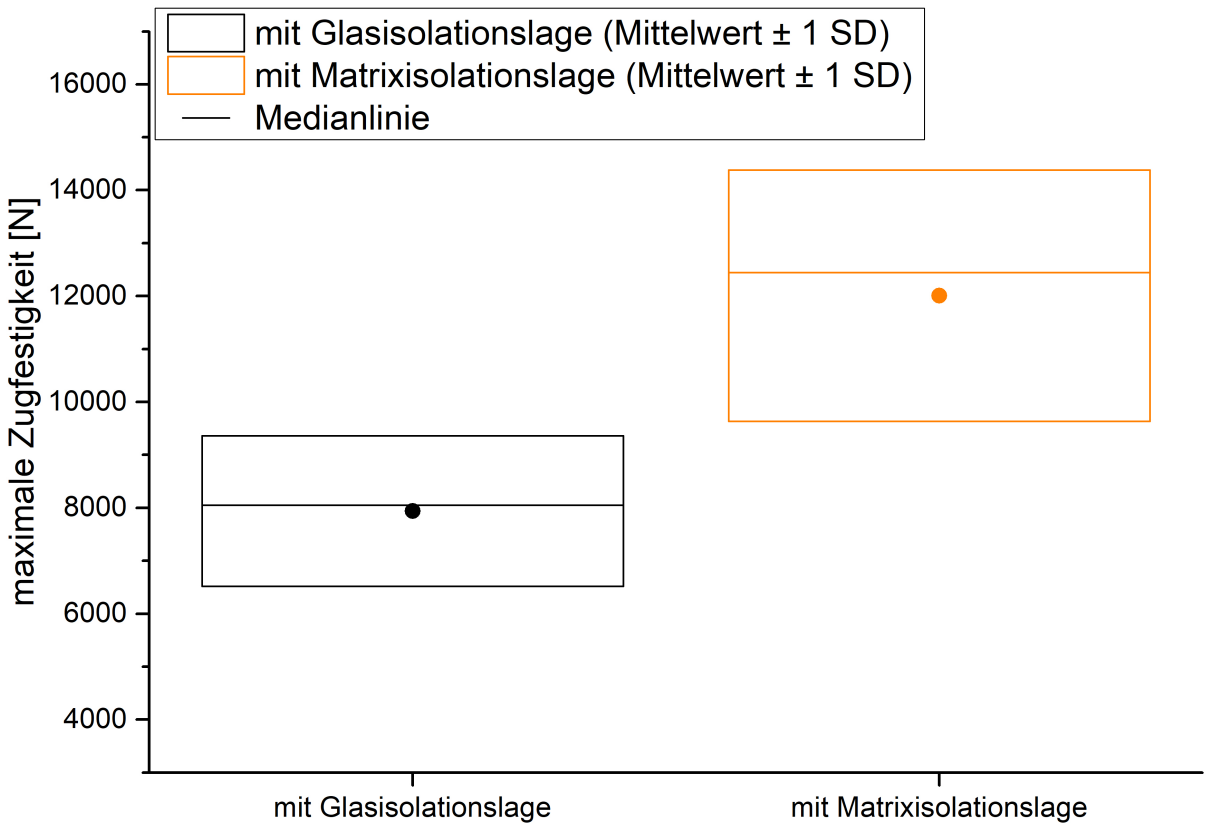


Abbildung 3.1: *Maximal erreichte Kraft im SLS-Zugversuch für Proben mit Schweißleiterisolierung aus Matrixwerkstoff und GF/LM-PAEK. Zu sehen ist der Mittelwert mit Standardabweichung und Median als horizontale Linie.*

eine Matrixlage konnte die Festigkeit im Mittelwert in dieser ersten Versuchsreihe um über 51 % gesteigert werden. Grund dafür könnte sein, dass das Fremdmaterial in der Fügezone entfällt. Die daraus resultierende direkte Anbindung zwischen Organoblech und Schweißleiter könnte die Festigkeitssteigerung bewirkt haben. Zusätzlich hilft eine Isolation mit Reinmatrix, die durch Quetschfluss seitlich austretende Matrix von Organoblech und Schweißleiter zu ersetzen und so einen Kontakt zwischen den Fasern des Organoblechs und denen des Schweißleiters zu verhindern. Zu wenig Matrix in der Fügezone würde zu einem zu hohen Faservolumengehalt führen, was eine starke Schwächung der Verbindung darstellen würde.

Außerdem lässt sich eine Abhängigkeit von der Lage der Probe in der Fügezone und der Festigkeit erkennen. Die Standardabweichung zwischen den Positionen beträgt für Schweißungen mit Glasisolation 480,11 N, für Schweißungen mit Matrixisolation 733,07 N. Die in Abbildung 2.7 gezeigt Position 1 hat dabei bei beiden Messreihen die höchsten und die mittlere Probe, auf Position 2, die niedrigsten Werte. Sie unterscheiden sich im Mittel bei Schweißungen mit Glasisolation um 1158 N und bei Schweißungen mit Matrixisolation um

1630,59 N. Ein Grund könnte sein, dass die Anzahl an Proben von Postion 2 viel geringer ist als von Position 1 und 3, da nur Schweißungen welche ohne Thermoelement durchgeführt wurden eine Probe von Position 2 zulassen. Ansonsten wäre eine ungleichmäßige Druckaufbringung über der Fügezone eine weitere mögliche Ursache.

3.1.2. Einfluss des Werkstoffes der Isolationslage auf das Bruchverhalten

Im zweiten Abschnitt wird untersucht, ob die verwendete Isolationslage auch einen Einfluss auf das Bruchverhalten hat. Um das zu untersuchen, werden die Bruchflächen der in Unterabschnitt 3.1 beschriebenen Zugproben nach der in Unterunterabschnitt 2.4.2 definierten Methodik in die unterschiedlichen Brucharten unterteilt. Anschließend wird der prozentuale Anteil an der Gesamtfläche berechnet und verglichen. In Abbildung 3.2 sieht

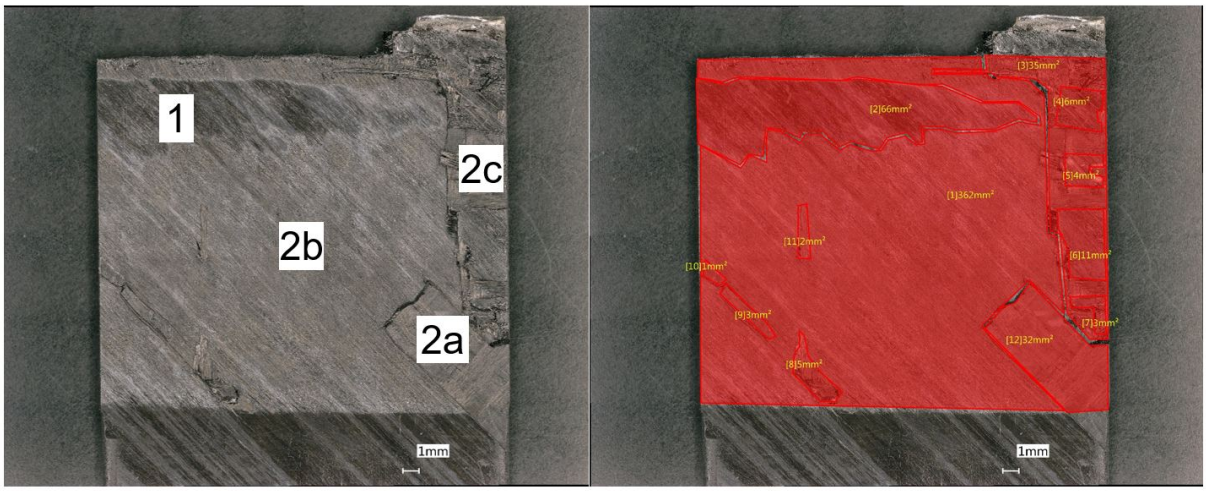


Abbildung 3.2: *Beispiel einer Bruchfläche mit markierten Versagensarten und ausgewerteten Flächen.*

man zur Verdeutlichung die Bruchfläche einer ausgewerteten Zugprobe mit am Auflichtmikroskop markierten Bruchflächen und zugeteilter Bruchart.

Für die Auswertung des Bruchverhaltens wird der prozentuale Anteil jeder Bruchart an der gemessenen Gesamtfläche untersucht. Wie man in Abbildung 3.3 sehen kann, sind bei beiden Schweißkonfigurationen die Versagensart 2b (kohäsives Versagen zwischen Organoblech und Isolation) vorherrschend. Bei den Schweißungen mit Glasisolation ist der Anteil der Versagensart 2b an der Gesamtfläche mit 85,14 % etwas größer als bei den Proben mit Matrixisolation, wo der Anteil bei 67,52 % liegt. Bei der Isolation mit Matrixlage sind dafür die Anteile an Versagensart 2a (kohäsives Versagen im Organoblech) mit 22,29 %

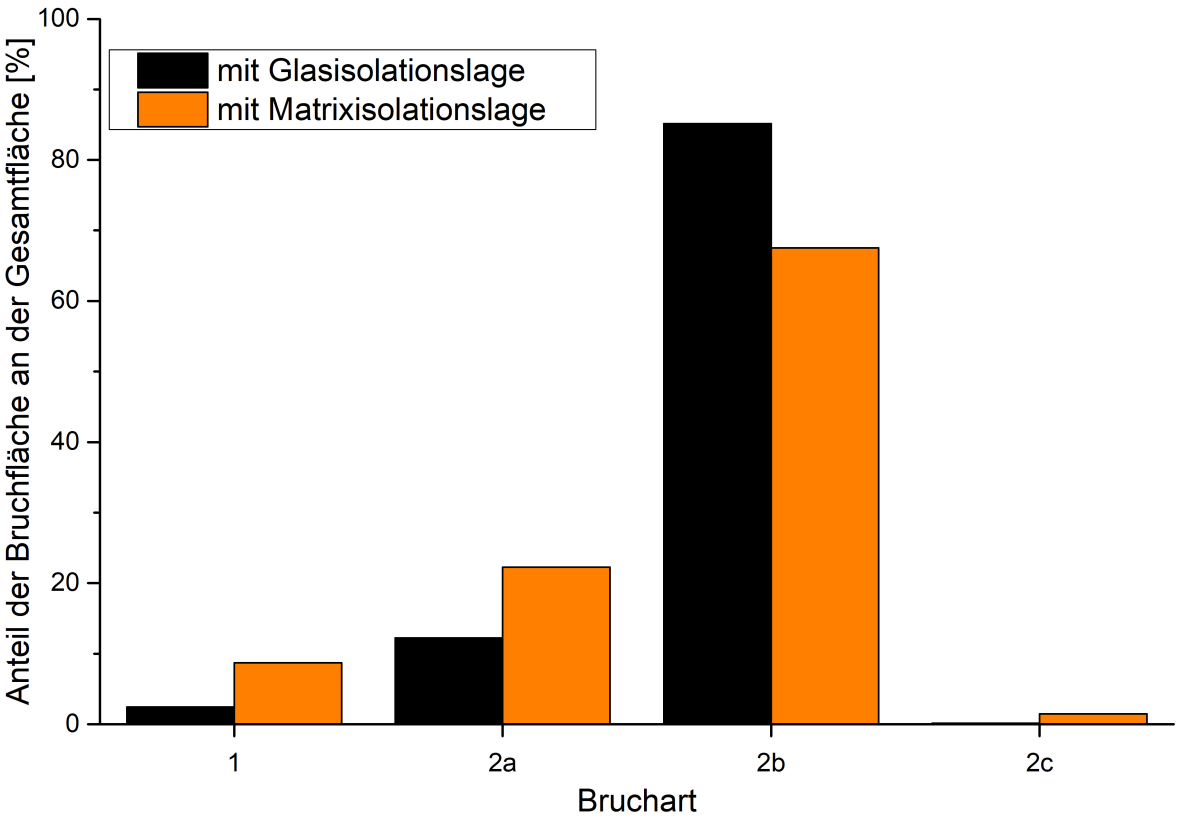


Abbildung 3.3: *Vergleich der Bruchflächen der im SLS-Zugversuch getesteten Proben. In schwarz zu sehen der gemittelte prozentuale Anteil der Brucharten an der gemessenen Gesamtfläche der Schweißungen mit einer Schweißleiterisolation aus Glasfaser, in orange im Vergleich die Isolation mit Matrix*

zu 12,22 % und 1 (Kaltverschweißung bzw. keine Anbindung) mit 8,71 % zu 2,46 % höher. Die Anteile der Versagensart 2c (kohäsives Versagen im Schweißleiter) waren bei beiden Versuchsreihen mit mit 1,47 % bei der Matrixisolation und 0,15 % bei der Glasisolation vernachlässigbar klein.

Der gesteigerte Anteil der Fläche 2a bei den Schweißungen mit Matrixisolation gegenüber einer Glaslage spricht für eine bessere Verschweißung, lässt durch das auftretende Substratversagen allerdings nur bedingt Rückschlüsse auf die reale Verbindungsfestigkeit zu. Dagegen ist der höhere Anteil der Fläche 1 eine eindeutig negative Entwicklung und spricht für eine schlechtere Anbindung zwischen den Fügepartnern. Teilweise unvollständige Anbindungen entstehen durch eine inhomogene Wärmeverteilung in der Fügezone, etwa durch Fehler in der Kontaktierung oder durch eine zu kurzen Schweißdauer. In Unterunterabschnitt 3.3.1 wird deshalb eine Prozessführung untersucht, welche durch einen gepulsten Prozess zu einer homogeneren Wärmeverteilung während der Schweißung führen soll. In Betrachtung der in Unterabschnitt 3.1 beschriebenen deutlich höheren maximalen

Zugkraft der Proben mit Matrixisolation und der sonst gleichen Rahmenbedingungen, kann man davon ausgehen, dass die Steigerung des Anteils der Fläche 2a diesen Festigkeitszuwachs bewirkt hat. Außerdem wird deutlich, dass eine Erhöhung der Flächenanteile von 2a wesentlich größere Auswirkungen auf die Verbundfestigkeit hat, als eine Steigerung der Fläche 1. Um dem Substratversagen vorzubeugen und aussagekräftige Werte für die Zugfestigkeit zu erhalten, müsste die Faserorientierung der Decklagen der Organobleche geändert werden. Bei den Proben liegt, wie oben beschrieben, ein 45° Winkel zwischen Organoblech und Schweißleiter. Dies wurde gewählt, da es der realen Lagenkonfiguration im Projekt MFFD entspricht. Um maximale Festigkeiten zu erreichen müsste ein 90° Winkel zwischen der Faserorientierung des Schweißleiters und des Organoblechs liegen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Substitution der Glasisolationslage durch eine Matrixschicht einen positiven Einfluss auf die Verbundfestigkeit hat. Außerdem führt es zu einer Steigerung des kohäsiven Substratversagens (Bruchart 2a). In folgenden Versuchen sollte überprüft werden, ob durch Organobleche mit optimaler (unidirektionaler) Faserorientierung und einer optimierten Prozessführung noch höhere Festigkeiten und ein homogeneres Bruchbild erreicht werden können. Gerade die Erhöhung der Bruchart 1 stellt nämlich für die Luftfahrt ein Problem dar, da jede unvollständige Anbindung in einer Fügezone, durch Eindringen von Feuchtigkeit beispielsweise durch Kondensation, wegen der hohen Temperaturunterschiede und der damit verbundene Ausdehnung zu Problemen und Schwächung der Verbindung führen kann. Die Prozesssicherheit konnte für beide Isolationen validiert werden. Im Prozessverlauf sind keine Unterschiede zwischen den beiden Isolationen erkennbar, Durchschläge waren nicht zu beobachten.

3.2. Untersuchungen zum Einfluss der Schweißspannung im Prozess

Nachdem die verwendeten Materialien feststehen, ist der nächste Schritt die Untersuchung der Prozessparameter. Für ein besseres Verständnis des Prozesses ist es wichtig, das Verhalten der verwendeten Materialien im Prozess zu verstehen. Außerdem sollten die Folgen und physikalischen Auswirkungen welche der Prozess bzw. die Prozessparameter, insbesondere auf den Schweißleiter haben, bekannt sein.
Im folgenden Abschnitt geht es um die Spannungsabhängigkeit des Schweißleiterwiderstandes. Spannungsabhängigkeit bedeutet, dass der Widerstandswert des Schweißleiters bei Spannungsänderungen nicht konstant bleibt. Durch die Widerstandsänderung müssen die anderen Prozessparameter entsprechend angepasst werden, um diese zu kompensieren. Dafür wird in Unterunterabschnitt 3.2.1 das Verhalten des Schweißleiterwiderstandes unter verschiedenen Spannungsniveaus und in Unterunterabschnitt 3.2.2 die Folgen der resultierenden Wärmeentwicklung auf den Schweißleiterwiderstand untersucht.

3.2.1. Spannungsabhängigkeit des Widerstandes

Vorangegangene Untersuchungen von L. Ziche zur Spannungsabhängigkeit des elektrischen Widerstandes der Schweißleiter in [16] haben gezeigt, dass gerade bei Schweißleitern mit sehr hohen Widerständen eine Spannungsabhängigkeit zu beobachten ist. Der Widerstand der Schweißleiter schwankt durch die größtenteils manuelle Fertigung sehr stark. Die Reproduzierbarkeit dieser, erster Voruntersuchungen, wurde bislang jedoch noch nicht nachgewiesen und soll hier vertiefend untersucht werden.
Der Widerstand eines Schweißleiters (R_{SL}) setzt sich zusammen aus dem Übergangswiderstand zwischen Kupferklotz und Schweißleiter, R_{ue}, sowie dem Leitungswiderstand der Kohlenstofffasern, $R_L = \rho * \frac{l}{A}$. Insgesamt ergibt sich der Schweißleiterwiderstand bei zwei Kontaktierungspunkten zu:

$$R_{SL} = \frac{U}{I} = 2 \cdot R_{ue} + R_L = 2 \cdot R_{ue} + \rho \cdot \frac{l}{A}. \tag{1}$$

Insbesondere bei kurzen Schweißleitern, bei denen der Leitungswiderstand in sich bereits sehr gering ist, hat ein hoher Übergangswiderstand einen großen Einfluss auf das Schwei-

ßergebnis. Ist der Widerstand der Kontaktierung (hier Übergangswiderstand genannt) zu groß, wird ein Teil der joulschen Wärme bereits im Kontaktbereich erzeugt und reduziert so die Erwärmung in der eigentlichen Schweißnat, was zu einer unvollständigen Verschweißung führen kann.

Für die Versuche kommt der in Unterunterabschnitt 2.3.1 beschriebenen Schweißaufbau zum Einsatz. Als Isolation kommt die beschriebene Glasisolationslage zum Einsatz. Zur Ermittlung der Temperatur in der Fügezone während des Prozesses, wurde ein Thermoelement vom Typ K mittig zwischen den Schweißleiter und das untere Organoblech eingelegt (Position 3 in Abbildung 3.19). Die Versuchsreihe wurde mit aktivierter SENSE-Funktion durchgeführt um eine, wie in [14] beschrieben, genauere Prozessführung zu ermöglichen.

In diesem Versuch wurde die Schweißspannung, von 1 V ausgehend, in 1 V Schritten erhöht. Dabei wird am Netzteil die Spannung eingestellt und der Strom entsprechend automatisch nachgeregelt. Spannung und Stromstärke werden durch das Netzteil aufgenommen, woraus anschließend der Schweißleiterwiderstand berechnet wird. Die Spannung wird manuell abgeschaltet, sobald sich ein thermisch eingeschwungener Zustand einstellt. Von einem eingeschwungenen Zustand wird im Prozess ausgegangen, wenn die weitere Erwärmung nur noch auf die Heißleitereigenschaften der Kohlenstofffaser zurückzuführen ist, die Temperatur sich also um nicht mehr als ca. 10 $\frac{°C}{min}$ ändert. Anschließend wird der Anfangswiderstand des Schweißleiters in Abhängigkeit zum Spannungsniveau bewertet. Der Anfangswiderstand, also der Widerstand welcher direkt nach dem Einschalten der Spannung gemessen wird, ist deswegen interessant, weil die ab einer bestimmten Spannung eintretende Erwärmung des Schweißleiters, durch seine Heißleitereigenschaften, einen großen Einfluss auf die Stromstärke und somit auch auf den Widerstand hat. Dadurch, dass die Erwärmung allerdings verzögert einsetzt, kann man den Widerstand ohne Störung messen. Im verwendeten Analyseprogramm von L. Ziche, welches in [16] beschrieben ist, wird der Anfangswiderstand durch den Spannungsanstieg definiert. Ausgegeben wird der gemittelte Widerstand über 10 Messpunkte an dem Punkt wo die Differenz von Maximalwert der Spannung und dem Messpunkt bei unter 20 % liegt, also bei Erreichen von 80 % der eingestellten Spannung. Eine andere Möglichkeit ist es, den Widerstand über die ganze Schweißung zu mitteln. Auch dann ist eine bessere Kontaktierung durch einen geringeren Widerstand über den ganzen Prozess erkennbar, allerdings nur, wenn alle zu vergleichenden Schweißungen mit der gleichen Schweißdauer durchgeführt wurden.

In Abbildung 3.4 sieht man den Verlauf des Widerstandes bei steigender Spannung und

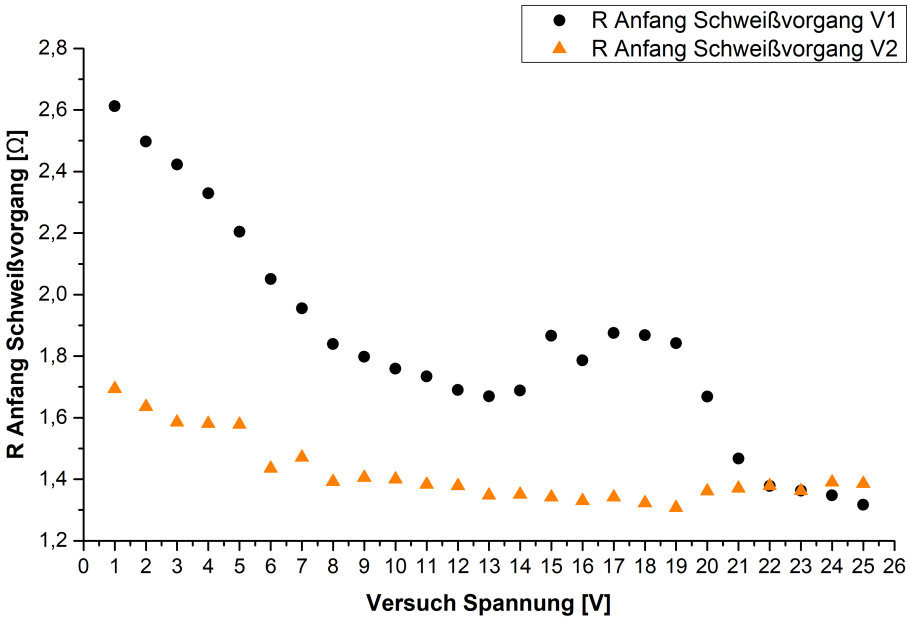


Abbildung 3.4: *Verlauf des Widerstandes zu Beginn der Schweißung für Schweißungen mit 1 V bis 25 V. Die Dauer der Schweißungen variiert, die Spannung wurde manuell abgeschaltet, wenn sich ein thermisch eingeschwungener Zustand einstellt, bei dem die weitere Erwärmung nicht über die Auswirkungen der Heißleitereigenschaften der Kohlenstofffaser hinaus geht. Der Versuch wurde zwei Mal durchgeführt.*

weitestgehend gleichbleibender Temperatur. Wie am Anfang beschrieben, lässt sich die Spannungsabhängigkeit besonders gut bei Schweißleitern mit einem hohen Übergangswiderstand erkennen. Die in Abbildung 3.4 dargestellten Versuche wurden mit zwei Schweißleitern mit sehr unterschiedlichen Übergangswiderständen durchgeführt. Der Schweißleiter, welcher bei der in schwarz dargestellten Messung verwendet wurde, hat einen besonders hohen Widerstand. Allerdings ist die Messung durch die starke Temperaturabhängigkeit des Widerstandes nur bis zu einer Versuchsspannung von 10 V wirklich aussagekräftig, da sich durch Schwankungen der Temperatur zum Zeitpunkt der Messung, das in der Abbildung zu sehende Plateau bildet. Bis 10 V liegt die Temperatur der Schweißleiter noch unter 30 °C, darüber steigt sie an und es ist mit einem deutlichen Einfluss der Temperatur auf den Widerstand zu rechnen.

Zu sehen ist eine klare Verringerung des Schweißleiterwiderstandes mit steigender Spannung. Der in schwarz dargestellte Versuch, mit einem sehr hohen Übergangswiderstand, zeigt die Spannungsabhängigkeit besonders deutlich. Bei 1 Volt Spannung und 21,37 °C Temperatur, liegt der Widerstand bei $2,61\,\Omega$. Bei einem Spannungsniveau 7 V und 22,5 °C

liegt er noch bei $1,96\,\Omega$. Bei 25 V und 63,3 °C ist er bis auf $1,32\,\Omega$ abgesunken. Mit steigender Spannung, war eine Erwärmung des Versuchsstandes durch die vorherige Messung nicht mehr zu vermeiden. Da die Verminderung des Widerstandes auch bei nahezu konstanter Temperatur, wie zu Beginn der Messung, zu beobachten war und alle anderen Prozessparameter und Störgrößen konstant blieben, kann dieser Effekt auf eine Spannungsabhängigkeit zurückgeführt werden.

Wie zu Beginn beschrieben, setzt sich der Schweißleiterwiderstand aus dem Kontaktwiderstand und dem Leitungswiderstand zusammen. Der Kontaktwiderstand setzt sich dabei aus zwei Teilen zusammen, dem Engewiderstand und dem Fremdschichtwiderstand. Der Engewiderstand resultiert aus der Mikrostruktur der beiden Kontakflächen, welche durch Ihre Rauheit und Unebenheiten keine perfekte bzw. maximal großflächige Kontaktierung ermöglichen. Durch die inhomogene Verteilung der Faserfilamente in der Matrix auf Einzelschichtebene, ist eine vollständig homogene Kontaktierung nicht möglich. Dieser Widerstand ist allerdings druck- und nicht spannungsabhängig. Deswegen könnte der sinkende Widerstand auf eine Änderung des Fremdschichtwiderstandes zurückzuführen sein. Dieser entsteht durch sogenannte Fremdschichten, welche sich auf der Oberfläche der Kontaktstücke befinden. Bei Metallen wie Aluminium oder Kupfer, sind sie wegen der sich an Luft bildenden Korrosionsschichten am häufigsten. In der Elektrotechnik werden die Fremdschichten durch einen elektrischen Durchschlag entfernt. Dieses Verfahren nennt sich Frittung und stellt einen geringen Kontaktwiderstand auch bei geringer Spannung sicher. Die Höhe der Spannung, welche für einen Durchschlag nötig ist, hängt von der Dicke der Fremdschicht ab. Somit wäre eine Möglichkeit, um den Kontaktwiderstand vor Beginn der Schweißung zu verringern, eine kurze aber hohe Spannungsspitze auf den Schweißleiter zu geben, um die Fremdschichten zu durchschlagen und die Kontaktierung zu verbessern. Außerdem kann die gezielte, kurzzeitige Wärmeentwicklung in der Kontaktzone zu einer Degradation bzw. Carbonisierung der Matrix führen, damit diese anschließend leitend wird und somit den Übergangswiderstand senkt. Eine Versuchsreihe, welche den Einfluss eines solchen vorgeschalteten Spannungsimpuls auf den Übergangswiderstand untersucht, wird in Unterunterabschnitt 3.2.4 beschrieben.

Abschließend lässt sich durch diese Versuchsreihe nicht klar trennen, welcher Teil des Schweißleiterwiderstandes für den sinkenden Gesamtwiderstand verantwortlich ist. Fest steht allerdings, dass eine höhere Spannung zu einem insgesamt geringeren Widerstand

des Schweißleiters führt. Zur genaueren Bestimmung und Verortung der beobachteten Effekte, sind weiter Versuchsreihen nötig. Es könnte zum einen untersucht werden, ob der gleiche Effekt auch bei höherer Temperatur z.B. durch ein beheiztes Druckstück zu beobachten ist. L. Ziche hat dazu in [16] eine erste Versuchsreihe durchgeführt, welche darauf hindeutet. Außerdem kann die Länge des Schweißleiters variiert werden, um den Einfluss des Leitungswiderstandes zu untersuchen. Wichtig ist, dass Schweißleiter mit homogenen Widerstandswerten zur Verfügung stehen, damit die durch die manuelle Fertigung entstehenden Unregelmäßigkeiten nicht das Ergebnis verfälschen.

3.2.2. Untersuchungen zum Einfluss der thermischen Historie des Schweißleiters auf seinen Widerstand

Der in Unterunterabschnitt 3.2.1 beschriebene Versuch ermöglichte es, den Einfluss einer thermischen Vergangenheit des Schweißleiters auf seinen Widerstand und die erreichte Temperatur zu untersuchen. Dafür wurde der Widerstand eines Schweißleiters mit vorhergegangener mehrfacher Aufheizung mit dem eines neuen, also einem Schweißleiter ohne thermische Vergangenheit, verglichen. Die verwendeten Materialien und der Versuchsaufbau sind bei den Versuchen die gleichen wie in Unterunterabschnitt 3.2.1.
Die Spannung wurde im ersten Teil der Messreihe in 1 V Schritten von 1 V bis auf 25 V erhöht. Dabei wurde jedes Spannungsniveau für 60 s gehalten und zu Beginn des Spannungseintrages der Widerstand gemessen. Nach den 60 s beschränkte sich die weitere Erwärmung nur noch auf die Heißleitereigenschaften der Kohlenstofffaser (Erwärmung von ca. $10\frac{°C}{min}$), es stellt sich also ein annähernd thermisch eingeschwungener Zustand ein. Nachdem die Spannung abgeschaltet wurde, wird der Schweißleiter durch die Umgebung abgekühlt, um anschließend den gleichen Versuch mit einer um ein Volt erhöhten Spannung erneut durchzuführen. Dabei wurde immer der gleiche Schweißleiter verwendet, die thermische Historie des Leiters wächst also mit jedem Versuch. Die so gemessenen Widerstände und erreichten maximalen Temperaturen, wurden mit einer zweiten Messreihe verglichen. In dieser wurden bei fünf ausgewählten Spannungsniveaus (5 V, 10 V, 15 V, 20 V und 25 V) thermisch unbelastete Schweißleiter verwendet und für 60 Sekunden mit der entsprechenden Spannung beaufschlagt, bis sich wiederum ein thermisch eingeschwun-

gener Zustand einstellt. Beide Messreihen wurden zwei mal durchgeführt.

In der ersten Messreihe, welche man in Abbildung 3.5 und Abbildung 3.6 sehen kann, liegt der Widerstandswert des thermisch unbelasteten Schweißleiters zur Beginn der Schweißung tendenziell unter dem der thermisch belasteten Schweißleiter. Die anschließend in

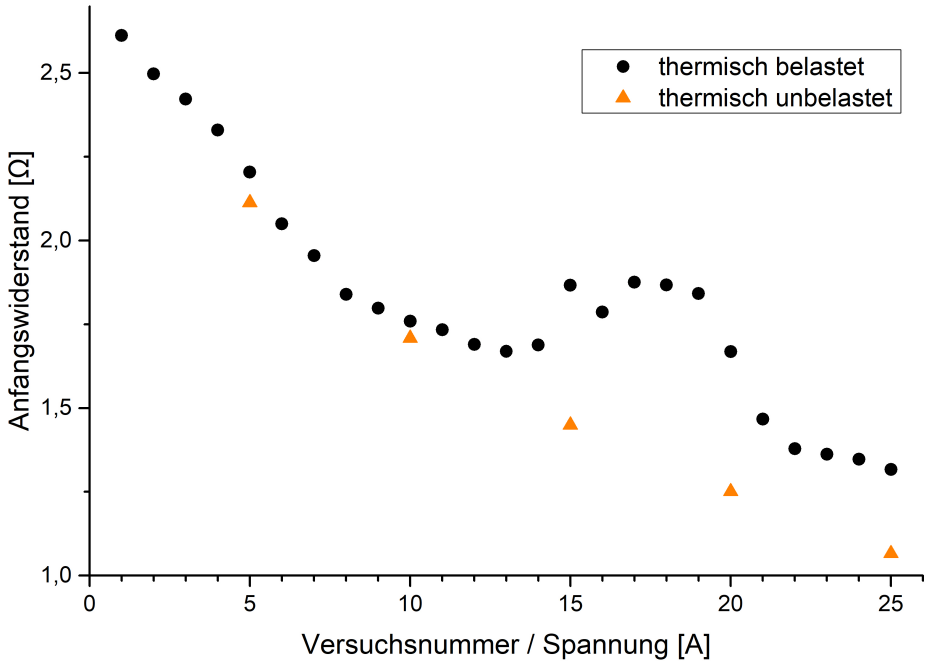


Abbildung 3.5: *Verlauf des Widerstandes zu Beginn der Schweißung für die Versuche 1 bis 25 (Schweißungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten) der Messreihe 1 in schwarz. Gut zu sehen ist bei den thermisch unbelasteten Proben der sinkende Widerstandswert in Abhängigkeit der angelegten elektrischen Spannung. In orange die Widerstandswerte der Versuche mit thermisch unbelasteten Schweißleitern bei 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, und 25 V.*

der Schweißung erreichte maximale Temperatur in der Fügezone liegt bei den unbelasteten Schweißleitern, durch den geringeren Widerstand, höher als bei den thermisch belasteten. Ab 22 V stagniert der Temperaturanstieg auch bei höherer Spannung. Dies könnte an einem Ausquetschen des Schweißleiters liegen, wodurch sich dort eine lokaler Hotspot bildet. Die globale Temperatur erhöht sich dadurch nicht weiter. Eine Prozessführung mit variablem Druck, welche ein Ausquetschen verhindern soll, wird in Unterunterabschnitt 3.3.2 beschrieben.

In der zweiten Versuchsreihe, welche man in Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8 sehen kann, kann man den höheren Widerstand der thermisch unbelasteten Schweißleiter allerdings nicht erkennen, hier liegt der Widerstand tendenziell über dem der thermisch belasteten Schweißleiter. Durch den höheren Widerstand bedingt, werden in diesen Schweißungen auch niedrigere Temperaturen erreicht als bei denen mit thermisch belasteten Schweißlei-

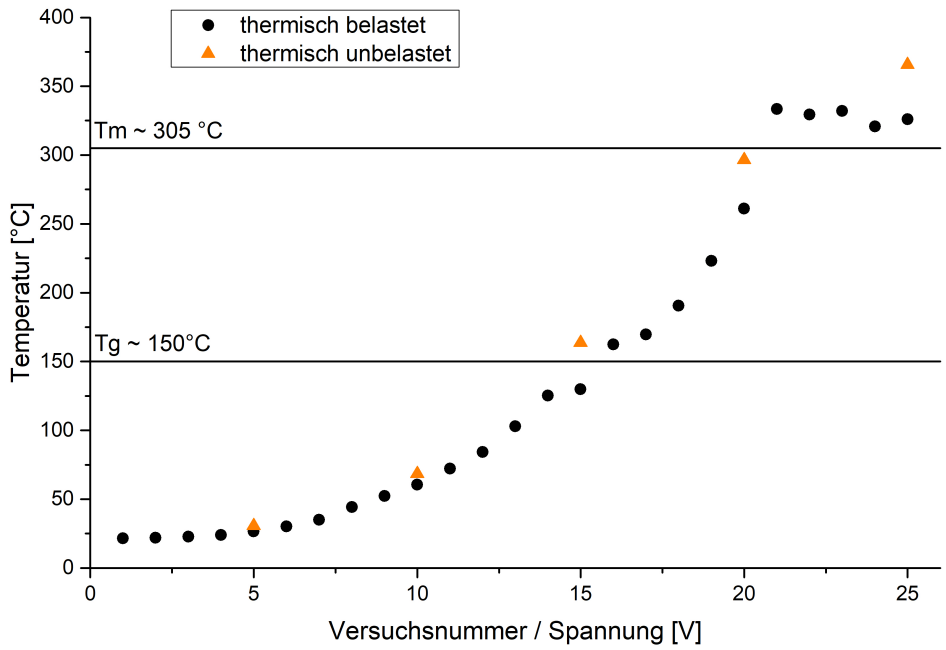


Abbildung 3.6: *Verlauf der maximal im Prozess erreichten Temperatur für die Versuche 1 bis 25 (Schweißungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten) der Messreihe 1 in schwarz. In orange die maximal erreichte Temperatur der Versuche mit thermisch unbelasteten Schweißleitern bei 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, und 25 V. Als horizontale Linien eingezeichnet sind die Glasübergangstemperatur T_g sowie die Schmelztemperatur T_m für LM-PAEK.*

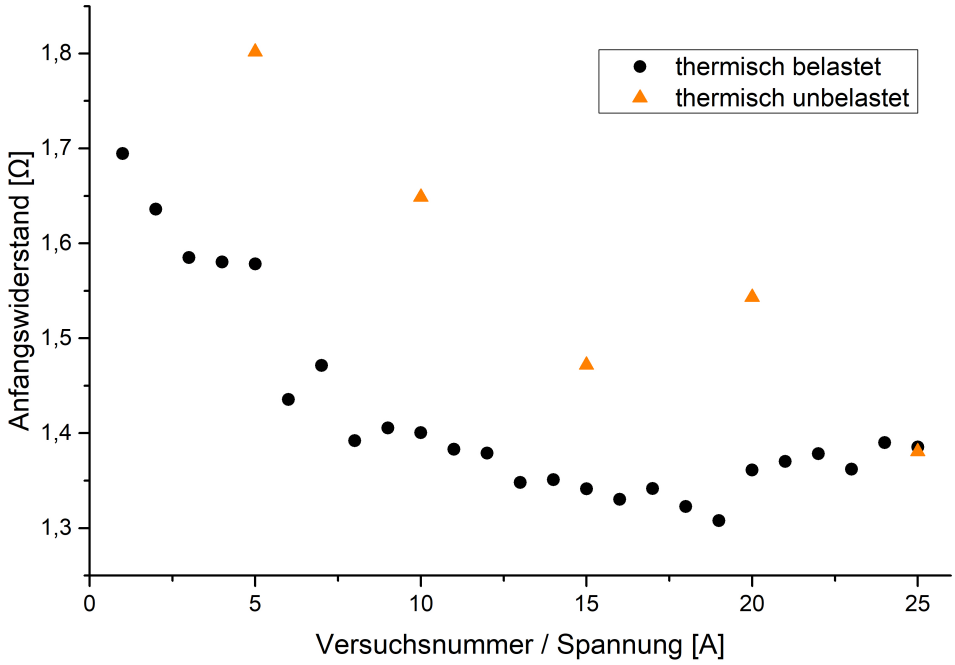


Abbildung 3.7: *Verlauf des Widerstandes zu Beginn der Schweißung für die Versuche 1 bis 25 (Schweißungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten, halten der Spannung für 60 s) der Messreihe 2 in schwarz. In orange die Widerstandswerte der Versuche mit thermisch unbelasteten Schweißleitern bei 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, und 25 V.*

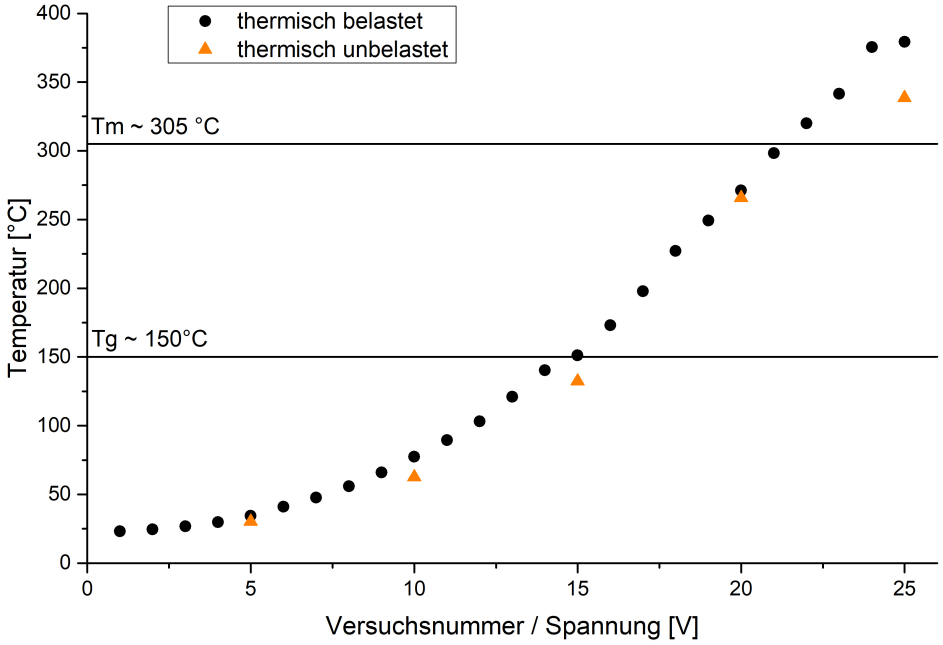


Abbildung 3.8: *Verlauf der maximal im Prozess erreichten Temperatur für die Versuche 1 bis 25 (Schweißungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten, halten der Spannung für 60 s) der Messreihe 2 in schwarz. In orange die maximal erreichte Temperatur der Versuche mit thermisch unbelasteten Schweißleitern bei 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, und 25 V. Als horizontale Linien eingezeichnet sind die Glasübergangstemperatur T_g sowie die Schmelztemperatur T_m für LM-PAEK.*

tern.

Die Ergebnisse zeigen also weder eine klare Tendenz, ob der Widerstand durch eine thermische Beeinflussung sinkt oder steigt, noch einen klaren Zusammenhang zwischen Temperatur und Widerstand, welcher eine Schlussfolgerung zulässt, inwiefern die thermische Vergangenheit eine Auswirkung auf die erreichte Temperatur hat. Ein Grund könnte sein, dass in der ersten Messreihe die Abschaltung der Spannung manuell erfolgte, wenn sich ein thermisch eingeschwungener Zustand ausbildete. Dadurch wurde die Spannung länger gehalten als in der zweiten Messreihe, in welcher jede Messung nach 60 s automatisch beendet wurde. Um genauere Aussagen treffen zu können, sind hier noch weitere Versuche nötig, welche mit der gleichen Prozessführung (Abschaltung nach 60 s) durchgeführt werden. Auch ist keine Steigerung der Differenz zwischen den Widerstandswerten der thermisch belasteten und thermisch unbelasteten Schweißleiter mit steigender Spannung zu sehen, obwohl die thermische Historie des Schweißleiters mit jedem Spannungsniveau ansteigt und sich somit mögliche Effekte im Laufe der Messungen verstärken müssten. Das größte Problem für die Verlässlichkeit der Aussagen in diesem Versuch ist die produktionsbedingt sehr große Schwankung der Widerstände der verwendeten Schweißleiter.

Nur mit Schweißleitern mit reproduzierbar niedrigem Widerstand lassen sich die Auswirkungen vernachlässigen und verlässliche Aussagen treffen.
Die starken Unterschiede der beiden Messreihen lassen sich also dadurch erklären, dass die Schweißleiter durch die hauptsächlich manuelle Herstellung in ihren Eigenschaften, vor allem im Kontaktierungswiderstand, stark schwanken. Die Verläufe der Messreihen ähneln sich zwar, sind allerdings bedingt durch den unterschiedlichen Widerstand in Y-Richtung verschoben. Für reproduzierbare Ergebnisse mit höherer Aussagekraft ist eine automatisierte Fertigung der Schweißleiter vonnöten, welche die Streuung der Kontaktierungswiderstände senkt. In den Versuchen von L. Ziche in [16] und in den hier beschriebenen Messreihen kann man erkennen, dass je höher der Widerstand des Schweißleiters ist, desto stärker fällt er mit steigender Spannung ab. Im Vergleich von Abbildung 3.5 und Abbildung 3.7 kann man erkennen, dass sich der Widerstand einem Niveau annähert, welches bei ca. $1,3\,\Omega$ liegt. Um dieses Niveau zu validieren, müsste dieser Versuch mit reproduzierbar gefertigten Schweißleitern mehrmals durchgeführt werden.
Eine alternative Möglichkeit zum Erreichen von reproduzierbaren Übergangswiderständen ohne automatisierte Herstellung der Schweißleiter, wird in Unterunterabschnitt 3.2.4 beschrieben. Dort soll durch einen dem Prozess vorgeschalteten Spannungsimpuls die Kontaktierung verbessert und somit der Schweißleiterwiderstand gesenkt und homogenisiert werden.

3.2.3. Untersuchungen zum Spannungsniveaus und der Haltedauer im Abkühlprozess für eine vollständige Kristallisation

Im folgenden Abschnitt soll anhand von Vorversuchen der Parameterbereich für die Höhe und Dauer der Kühlspannung für die statistische Versuchsplanung (DoE) definiert werden. Für die anderen Parameter des DoE, Schweißspannung und -dauer, welche in Abschnitt 4 beschrieben werden, lagen aus vorangegangenen Versuchen und Projekten schon genügend Daten vor, um ein Prozessfenster definieren zu können. Für Versuche mit einer kontrollierten bzw. verlangsamten Abkühlung existierte diese Datengrundlage noch nicht und soll durch die im Folgenden beschriebenen Vorversuche geschaffen werden.

Ziel der verlangsamten Abkühlung ist es, dem Matrixmaterial genügend Zeit für eine vollständige Nachkristallisation zu geben. Welchen Einfluss das auf die Verbundfestigkeit hat wird im DoE untersucht. Aus der DSC-Analyse des Matrixwerkstoffes TC1225 LM-PAEK, die in Unterunterabschnitt 2.4.4 beschrieben ist, ergibt sich als Temperatur für eine maximale Nachkristallisation 220 °C. Diese Temperatur ist allerdings von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Zusätzlich ist die Zeit, welche für eine optimale Nachkristallisation nötig ist, ebenfalls abhängig von der Abkühlgeschwindigkeit. Je höher die Abkühlgeschwindigkeit, desto geringer fällt die Kristallinität aus. Deshalb ist es häufig nötig, dass der Zeitraum über 220 °C verlängert, die Abkühlgeschwindigkeit also reduziert wird.

Bei den bisher in dieser Arbeit beschriebenen Schweißungen wurde nach Ablauf der Schweißzeit die Spannung direkt abgeschaltet oder auf eine 1 V Messspannung reduziert. Wird die Spannung so stark verringert, fällt die Temperatur sehr schnell ab. Bei der aktuellen Schweißstandkonfiguration und Schweißungen mit 25 V, liegt die Abkühlrate im Bereich von 360 °C bis 220 °C linear approximiert bei 36 °C/s, bevor sie sich immer weiter verringert. Wie man in Abbildung 3.9 sehen kann, sinkt die Abkühlrate stark mit der Zeit, trotzdem ist bei einer Schweißtemperatur von ca. 360 °C die Kristallisationstemperatur von 220 °C schon nach etwa 4 s erreicht. Das ist nach den Werten welche die DSC-Messung für eine vollständige Nachkristallisation angibt, nicht ausreichend. Nötig sind (für wesentlich kleinere Abkühlraten) mindestens 5 s über der Kristallisationstemperatur von 220 °C. Um diese Zeit zu erreichen, muss die Abkühlgeschwindigkeit reduziert werden. Dazu wird nach der Schweißung die Spannung nicht komplett abgeschaltet, sondern nur reduziert.

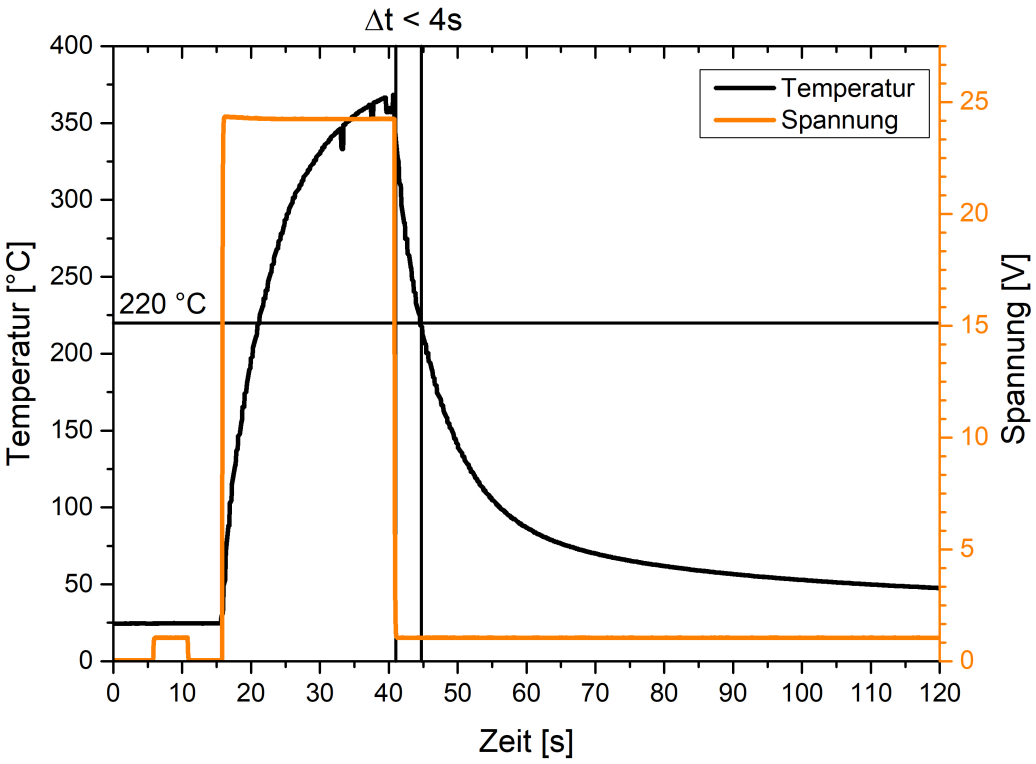


Abbildung 3.9: *Typischer Temperaturverlauf einer Schweißung bei 25 V für 25 s ohne Kühlspannung. Eingezeichnet ist die Zeit vom Abschalten der Spannung bis zum erreichen von 220 °C.*

Dadurch wird die Abkühlung soweit verlangsamt, dass sich eine optimale Kristallisation einstellen kann. Eine Validierung des Kristallitgehaltes in Abhängigkeit der Schweißprozessführung findet über eine in Abschnitt 3.2.3 beschriebene Analyse von Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen statt.

In den im Folgenden beschriebenen Vorversuchen sollte die passende Spannung gefunden werden, bei welcher sich die gewünschte Temperatur und die gewünschte Geschwindigkeit im Abkühlvorgang einstellen lässt. Dafür werden die Daten aus dem in Unterunterabschnitt 3.2.1 beschriebenen Vorversuch verwendet. In diesem Versuch wurden die Aufheizkurven des Schweißleiters für Spannungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten für 60 s aufgezeichnet. Aus den Aufheizkurven kann man die maximal erreichte Temperatur auslesen und so die Spannung ermitteln, welche den Schweißleiter über 220 °C hält.

In Abbildung 3.10 sieht man die jeweils erreichten maximalen Temperaturen für Spannungen von 1 V bis 25 V in 1 V Schritten. Bei 17 V Spannung wurden 197,85 °C erreicht, bei 18 V 227,2 °C. Somit liegt die Spannung welche den Schweißleiter auf 220 °C Temperatur erhitzt, dazwischen. Anhand dieser Daten kann man die untere Grenze der benötigte

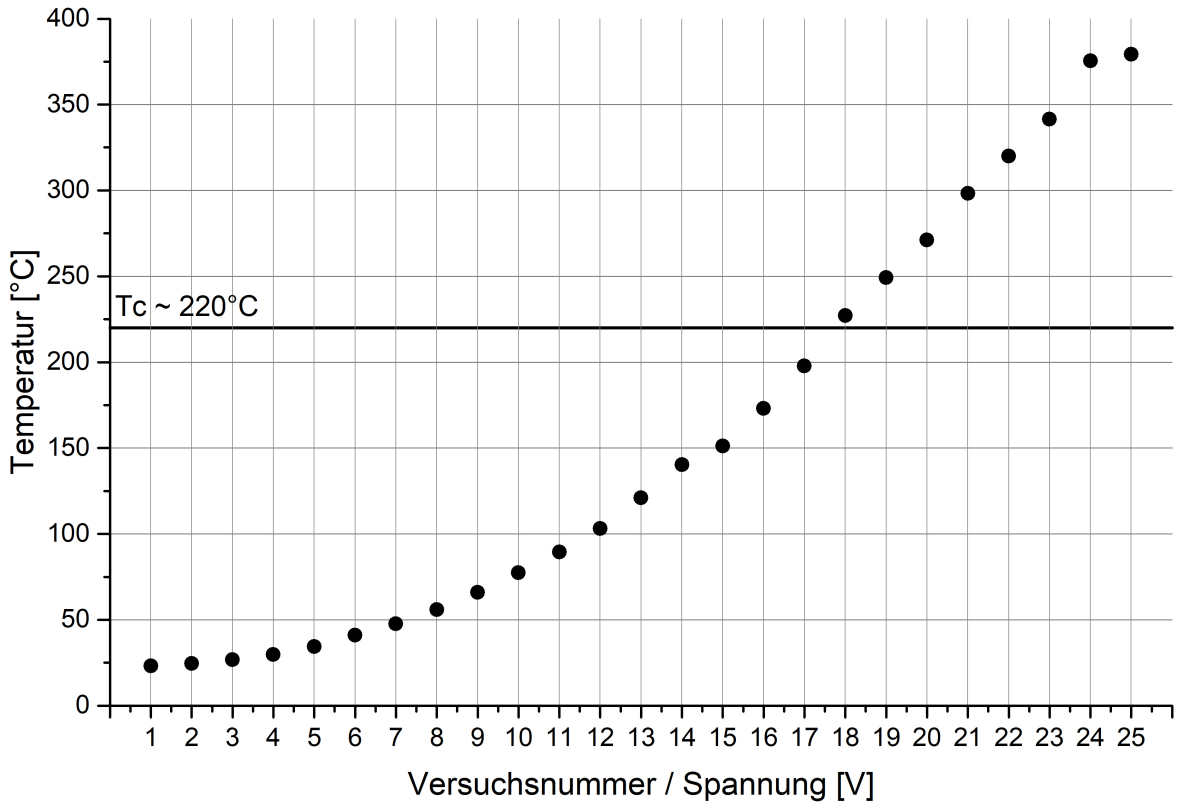


Abbildung 3.10: *Maximal erreichte Temperatur in der Mitte der Fügezone für Schweißspannungen von 1 V bis 25 V. Die Spannung wurde für 60 s gehalten, bis sich ein thermisch eingeschwungener Zustand einstellte bei dem eine weitere Erwärmung nur noch auf die Heißleitereigenschaften der Kohlenstofffaser zurückzuführen war.*

Spannung auf etwa 18 V festlegen. Der Parameterbereich für das DoE wurde deshalb auf 18 V bis 20 V festgelegt.

Die Dauer der Kristallisation wurde aus der DSC-Analyse entnommen, welche für hohe Abkühlraten Zeiten zwischen 5 s und 15 s angibt. Diese Werte wurden ebenfalls als Parameterbereich für das DoE übernommen.

Validierung des gewählten Parameterbereichs Nachdem die Versuche des DoE abgeschlossen waren, konnte überprüft werden, ob die gewählten Parameter für Spannung und Dauer der Kühlspannung den gewünschten Einfluss auf Temperatur und Abkühlrate hatten. Für die Validierung wird die während den Versuchen gemessene Temperatur in der Mitte der Fügezone ausgewertet. Die Auswertung erfolgt für zwei Versuche, welche sich an den gesetzten Parametergrenzen (20 V bzw. 18 V Kühlspannung und 10 s bzw. 5 s

Kühldauer) befinden. Zum Vergleich wird außerdem ein Versuch mit mittleren Parametern (19 V für 10 s) ausgewertet. Verglichen werden maximal erreichte Temperatur (T_{max}) und Zeit über 220 °C (Δt).

In Abbildung 3.11 kann man den Temperaturverlauf einer solchen Schweißung mit aktiver Abkühlverzögerung sehen. Für die Schweißung wurden die gleichen Parameter verwendet

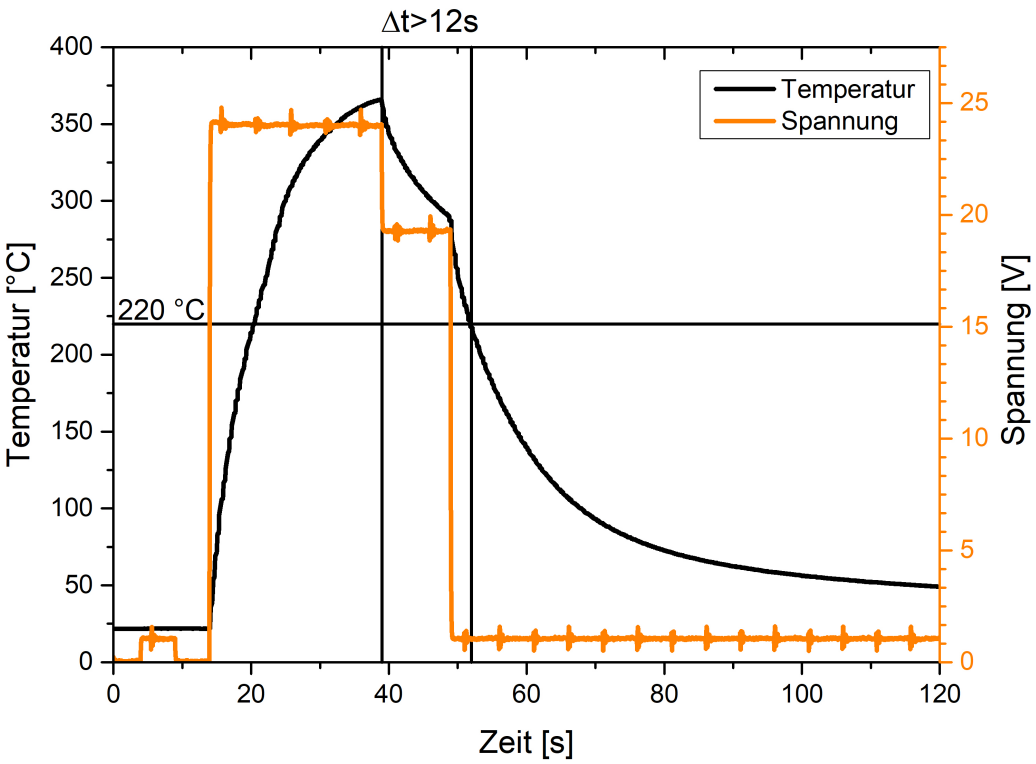


Abbildung 3.11: *Temperaturverlauf einer Schweißung bei Prozessierung mit 25 V für 25 s mit verlangsamter Abkühlung bei einer Spannung von 20 V für 10 s*

wie bei dem in Abbildung 3.9 dargestellten Versuch. Bei der Schweißung welche für 25 s bei 25 V durchgeführt wurde, wurden maximal 365,7 °C erreicht. Gut zu erkennen ist die anschließend verlangsamte Abkühlung, welche zu einem Δt von 12,88 s führt.

Bei der Schweißung am unteren Ende des Parameterbereich wird mit 23 V für 20 s geschweißt. Dabei sind 324,4 °C erreicht worden. Die anschließende Abkühlung wurde durch eine Spannung in Höhe von 18 V für 5 s verlangsamt. Damit wurde ein Δt von 7,87 s erreicht. Bei der Schweißung in der Mitte des Parameterbereichs wurde mit 25 V für 25 s geschweißt und anschließend bei 19 V für 10 s abgekühlt. Die maximale Temperatur betrug 345,2 °C und Δt lag bei 11,84 s. Die gemessenen Werte sind zur besseren Übersicht nochmal in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: *Vergleich verschiedener Kühlspannungen und Kühldauern hinsichtlich der maximal erreichten Temperatur ($T_{\max}$) und der Zeit über 220 °C (Δt).*

Kühlspannung	Kühldauer	$T_{\max}$	Δt
20 V	10 s	365,75 °C	12,88 s
19 V	10 s	345,20 °C	11,84 s
18 V	5 s	324,40 °C	7,87 s

Somit konnte validiert werden, dass das Parameterfenster richtig gewählt ist, um die gewünschte Temperatur über den gewünschten Zeitraum halten zu können. Die Abkühlraten sind zwar trotzdem noch hoch, allerdings wird sich im DoE in Abschnitt 4 und in der Auswertung der REM-Aufnahmen, welche in Abschnitt 3.2.3 beschrieben ist, zeigen, welchen Einfluss die verlangsamte Abkühlung auf die Zugfestigkeit und das Kristallisationsverhalten hat. Die Temperaturverläufe der Schweißungen bestätigen ersteinmal nur, dass das gewählte Parameterfenster die Temperatur für eine beliebige Zeitspanne über 220 °C halten kann. Wenn durch die weiteren Untersuchungen die optimale Zeitdauer für die Kristallisation ermittelt wird, kann mit dieser Prozessführung eine vollständige Nachkristallisation gewährleistet werden.

Analyse von Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen zur Bestimmung des Kristallitgehaltes für verschiedene Abkühlgeschwindigkeiten

Um die Auswirkungen der in Unterunterabschnitt 3.2.3 untersuchten, verzögerten Abkühlung auswerten zu können, werden in diesem Abschnitt Auflicht- sowie Rasterelektronenmikroskopieaufnahmen der Fügezone untersucht. Durch diese Bilder können mögliche Veränderungen in der Kristallstruktur festgestellt werden, welche die Auswertung der Zugfestigkeit in Abschnitt 4 erweitern.

Die Kristallite in einem Polymer sind maßgeblich für die chemische Beständigkeit und die hohe Temperaturformbeständigkeit verantwortlich. Deswegen ist es für eine homogene Festigkeit und Medienbeständigkeit wichtig, dass im Bauteil ein gleichmäßiger Kristallitgehalt herrscht. Ein Kristallit ist der kleinste Bauteil der kristallinen Überstruktur. In der Abkühlphase bilden sich von Keimen aus gleichmäßig geordnete Kristallite, welche sich durch die Aneinanderkettung zu Lamellen formen. Keime sind bei faserverstärkten Thermoplasten häufig die Fasern selbst oder Verunreinigungen in der Matrix. Die Lamellen wachsen in alle Raumrichtungen und bilden den kugeligen Sphärolith. Je nach Kristallisationsrate können die Sphärolite zwischen 1µm bis zu einigen mm anwachsen. Wie in Unterunterabschnitt 3.2.3 schon beschrieben, findet die Kristallisation zwischen der Schmelz- und der Glasübergangstemperatur statt. Während die Keimbildungsrate mit sinkender Temperatur wächst, sinkt der Transport, also die Beweglichkeit der Monomere. Das hat zur Folge, dass die optimale Temperatur für eine schnelle Kristallisation genau in der Mitte von der Schmelz- und der Glasübergangstemperatur liegt. Für LM-PAEK ist das, wie auch in der DSC-Messung bestätigt, etwa 220 °C. Eine schnelle Kristallisation ist nicht nur aus kostengründen wichtig, auch kommt es bei zu langsamer Abkühlung zu Anreicherungen von spröden Anteilen an den Spärolitgrenzen, was zu einer Versprödung des Werkstoffes führen kann. ([5], S. 37 ff.)

Für die anstehenden Untersuchungen wurden in einem ersten Schritt Proben ausgewählt, welche mit unterschiedlichen Prozessparametern und Prozessführungen geschweißt werden. In Tabelle 4 sind die untersuchten Proben aufgeführt. Die ersten Aufnahmen wurden mit dem in Unterunterabschnitt 2.4.2 beschriebenen Auflichtmikroskop gemacht. In Abbildung 3.12 sind Bilder der Schweißungen in einer 150-fachen Vergrößerung dargestellt. Gut zu erkennen sind die einzelnen Lagen in den Organoblechen, sowie in der Fügezone.

Tabelle 4: *Prozessparameter der am Mikroskop untersuchten Schweißproben.*

Versuch	Schweißspannung	Schweißdauer	Kühlspannung	Kühldauer
20210329-V03	25 V	25 s	-	-
20210527-V15	27 V	30 s	20 V	15 s

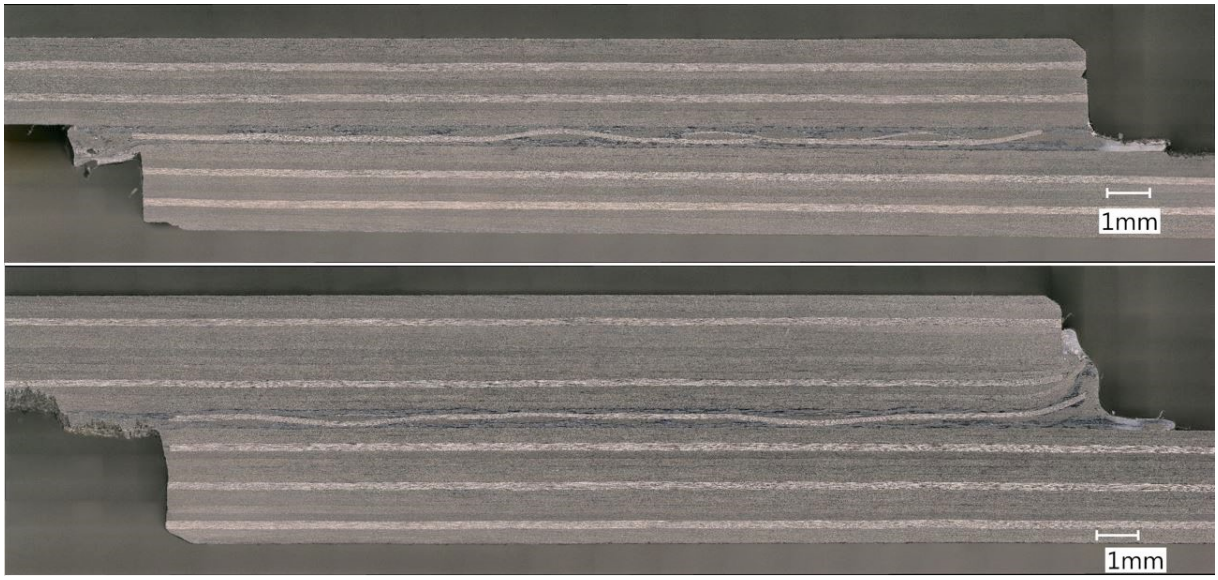


Abbildung 3.12: *Auflichtmikroskopaufnahmen der Fügezone im Querschnitt mit 150-facher Vergrößerung. Im oberen Bild die Schweißung ohne verzögerte Abkühlung, im unteren wurde mit verzögerter Abkühlung geschweißt.*

Der Schweißleiter, welcher mittig in der Fügezone als helle Linie zu sehen ist, ist ebenfalls deutlich zu erkennen. Mögliche Lufteinschlüsse oder Ondulationen könnten mit Hilfe dieser Bilder ebenfalls identifiziert werden. Bei entsprechender Vergrößerung am Mikroskop sind in den Bruchflächen noch einzelne Fasern zu erkennen, allerdings reicht die Vergrößerung nicht aus, um Aussagen über Größe und Qualität der Kristallite treffen zu können. Dafür sind Rasterelektronenmikroskopaufnahmen nötig, welche eine wesentlich höhere Vergrößerung von bis zu 10.000 x haben. In Unterunterabschnitt 2.4.5 ist das Verfahren, welches für die Probenvorbereitung nötig ist, beschrieben.

In den ersten Untersuchungen kam es bei den REM-Aufnahmen zu Problemen im Ätzprozess. Dadurch wurde die Matrix gleichmäßig abgetragen, ohne die gewünschte Offenlegung der Sphärolitstruktur. In Abbildung 3.13 sind zwei Bilder aus der Mitte der Fügezone abgebildet. Das Größere mit einer 400-fachen Vergrößerung, zeigt gut die verschiedenen Schichten der Schweißung. Sehr positiv zu erkennen ist, dass es keine Grenzflächen zwischen den verschiedenen Lagen gibt. Das zeugt von einer sehr guten und homogen Ver-

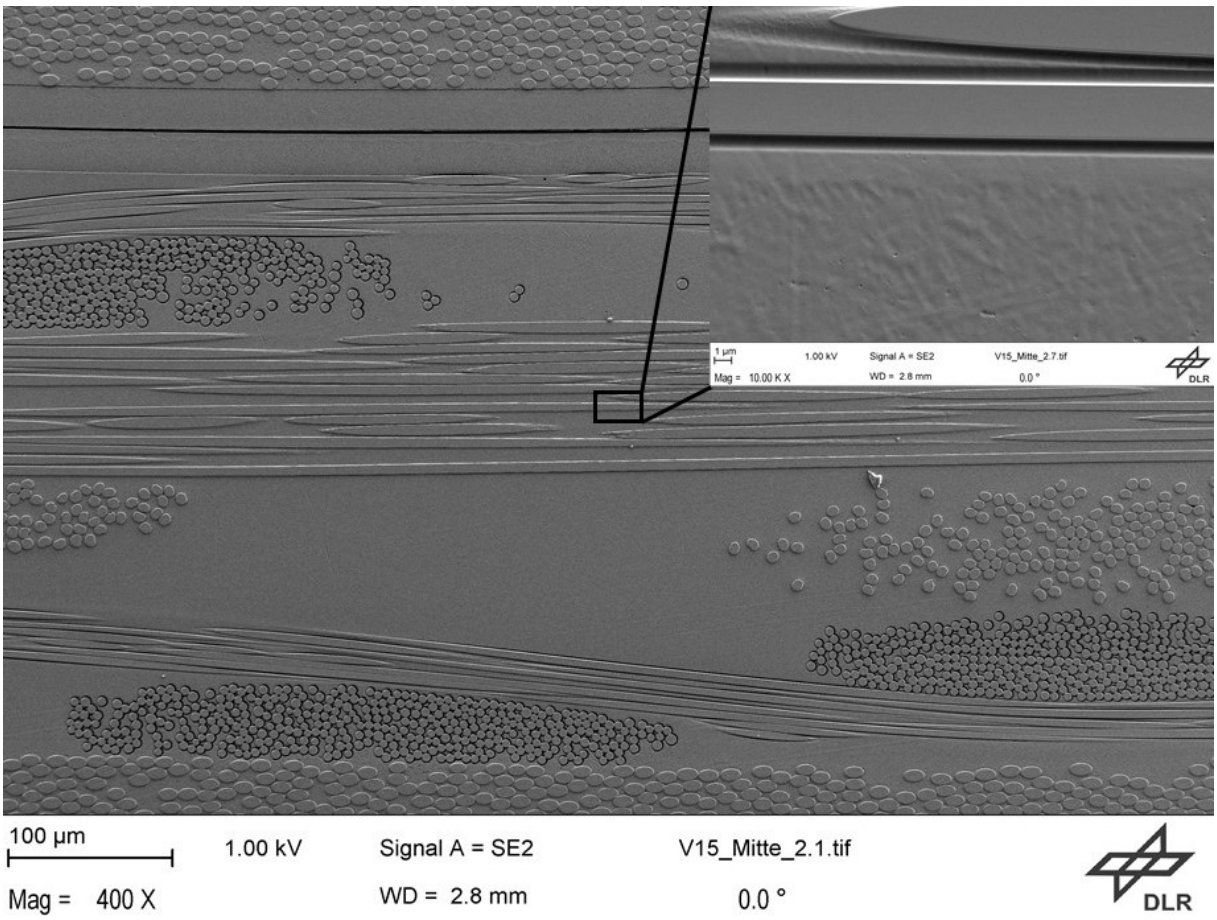


Abbildung 3.13: *REM-Aufnahmen aus der Mitte der Fügezone im Querschnitt mit 400, bzw. 10.000-facher Vergrößerung. Im großen Bild ist die gesamte Fügezone abgebildet, im kleineren in der rechten oberen Ecke ein Ausschnitt aus dem Schweißleiter.*

schweißung. Das Detailbild in der rechten oberen Ecke zeigt einen Ausschnitt aus dem Schweißleiter mit 10.000-facher Vergrößerung. Bei dieser hohen Vergrößerung sollten im Normalfall die Sphärolite sichtbar sein. Im Folgenden wurde der Ionenätzprozess angepasst, indem die Ätzspannung verringert wurde um weniger Material abzutragen.

An den nächsten zwei Versuchstagen verbesserte sich zwar die Sichtbarkeit der Sphärolite, allerdings wurden sie nur im Grundlaminat sichtbar. In Abbildung 3.14 ist ein Ausschnitt aus dem Grundlaminat mit 10.000-facher Vergrößerung zu sehen. Dort sind Sphärolite als lamellenartige Bereiche zu sehen. Leider wird die Analyse durch viele in der Präparation entstehende Schäden, Artefakte genannt, erschwert. Die als Krater oder Löcher sichtbaren Schäden sind Auswirkungen der Ionenätzung. Interessant und aktuell noch nicht zu erklären ist der Umstand, dass die Artefakte nur im Grundlaminat so deutlich zu sehen sind und in der Fügezone weder Sphärolite noch Artefakte sichtbar werden. Es wirkt so, als hätte der Ionenätzprozess auf das Matrixmaterial im Schweißleiter keine Auswirkung

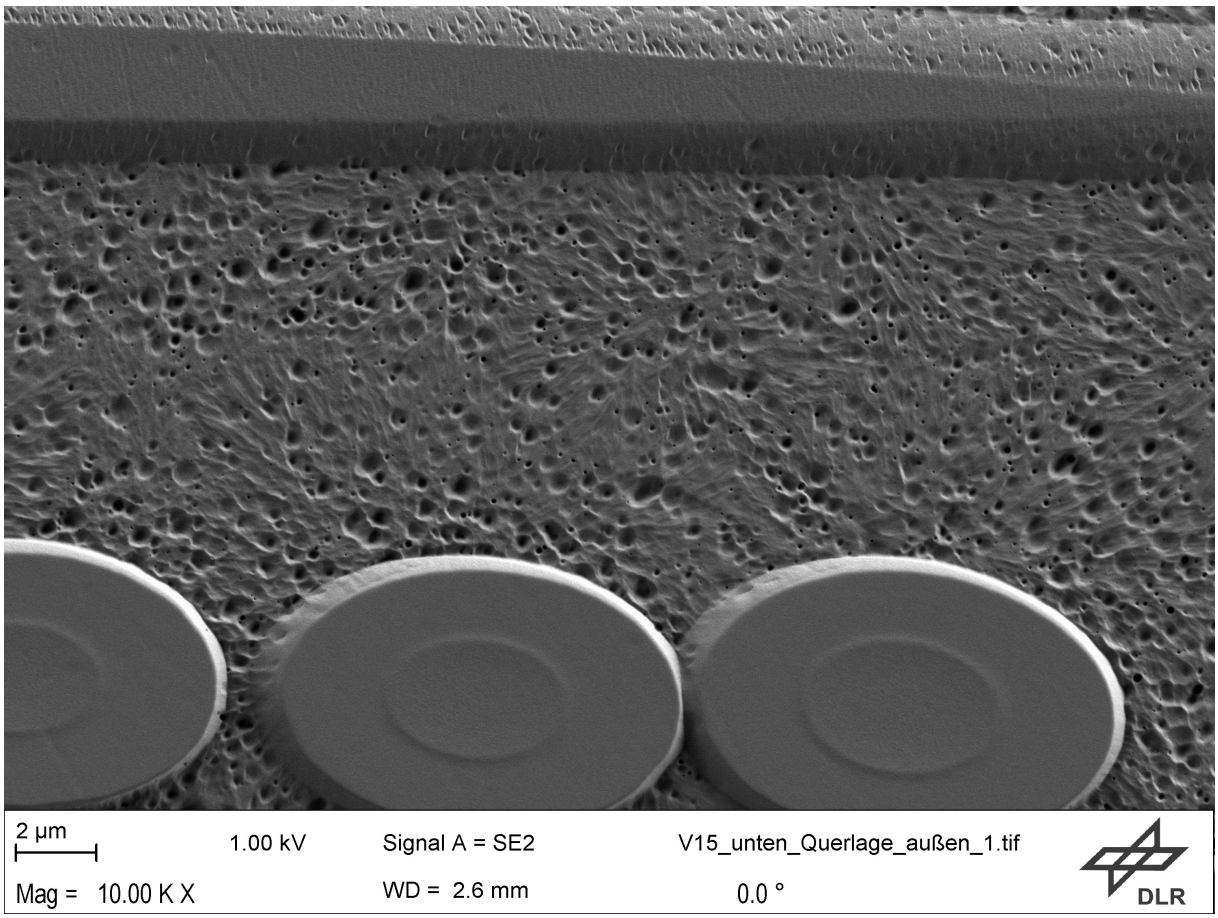


Abbildung 3.14: *REM-Aufnahmen aus dem Organoblech mit 10.000-facher Vergrößerung. Neben vielen Artefakten aus der Präparation in Form von Kratern, sind deutlich sphärolitische Strukuren zu sehen.*

gehabt. Dafür konnte aber noch keine Erklärung gefunden werden, da es sich um den gleichen Werkstoff handelt. Um eindeutige Aussagen zu der Sphärolitanzahl und -größe machen zu können, muss der Ionenätzprozess erst verbessert werden. Außerdem muss verstanden werden, wieso das identische Material unterschiedlich auf die Ätzung reagiert.

3.2.4. Untersuchungen zum Einfluss eines initialen Spannungsimpulses auf den Schweißleiterwiderstand

Neben den richtigen Werkstoffen und den gewählten Prozessparametern stellt eine optimierte Prozessführung den dritten Teil eines beherrschten Prozess dar. In den folgenden Abschnitten sollen deswegen verschiedene Möglichkeiten in der Prozessführung untersucht und hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf den Prozess bewertet werden. Die Idee hinter der ersten Versuchsreihe war es, durch einen hohen Spannungsimpuls vor dem Prozess den Übergangswiderstand zu senken. Diese Technik ist aus der Elektrotechnik als Fritting bekannt.

Versuche mit konventioneller Kontaktierungsvariante In diesem Abschnitt soll eine Art der Prozessführung untersucht werden, welche die Homogenität des Schweißleiterwiderstandes erhöhen soll. Im Verlauf dieser Arbeit wurde mehrfach der Übergangswiderstand des Schweißleiters als problematischer Prozessparameter beschrieben. Die sehr hohe, durch die manuelle Fertigung bedingte, Schwankung des Übergangswiderstandes führt häufig zu starker Streuung in den Versuchen und kann so die zu untersuchenden Ergebnisse überdecken und verfälschen. Ziel dieser Versuche war es, durch einen hohen Spannungsimpuls den Übergangswiderstand vor dem eigentlichen Prozess auf ein homogenes Niveau zu bringen und im besten Fall sogar noch zu senken.

In den Versuchen kam der in Abschnitt 2 beschriebene Schweißmodulaufbau mit den genannten Materialien zum Einsatz. Insgesamt wurden sechs Versuche durchgeführt. Die Isolationslage bestand bei den ersten drei Versuchen aus einem Matrixfilm, bei den restlichen drei wurde eine Glasisolation verwendet. Da es sich bei dieser Versuchsreihe um Vorversuche ohne bereits gefestigte Datengrundlage handelt, musste die Spannungshöhe für den Impuls sowie die Impulsdauer frei bzw. nach Gefühl gewählt werden. Durch die Versuche sollten auch keine allgemeingültigen Werte erhoben, sondern eine Grundlage geschaffen werden, auf der weitere Versuche aufbauen können.

Für den Impuls wurde ein Spannungsniveau von 50 V für 1 s gewählt. Als erstes sollte untersucht werden, welche maximale Erwärmung dieser Impuls in der Fügezone bewirkt und wie hoch die Temperatur im anschließenden Prozessbeginn ist. Dafür wurde ein Thermo-

element vom Typ K mittig in die Fügezone eingelegt. Vor und nach dem Impuls wird der Widerstand des Schweißleiters für 5 s bei 1 V gemessen, danach schließt sich der Schweißprozess an. In Abbildung 3.15 ist der Spannungs- sowie Temperaturverlauf eines Prozesses zu sehen. Deutlich zu erkennen ist, dass eine so hohe Spannung einen sehr deutlichen

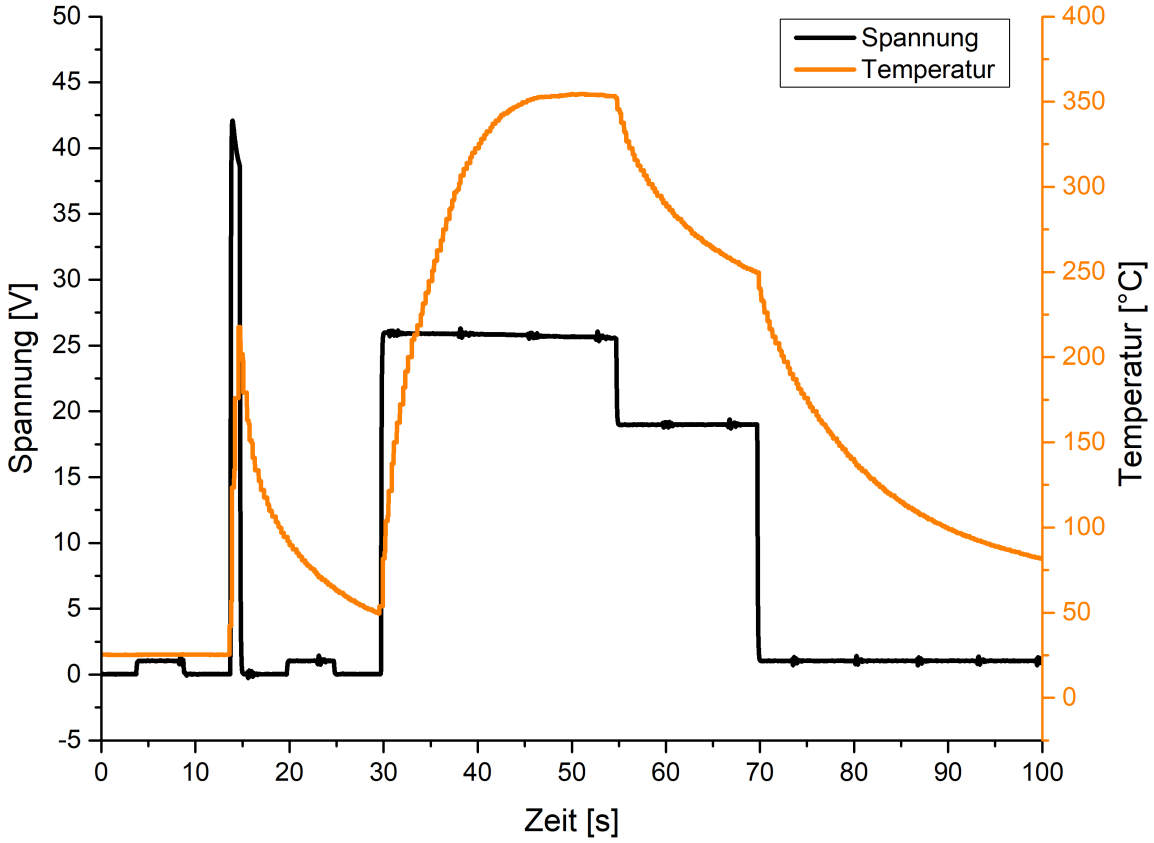


Abbildung 3.15: *Temperatur- und Spannungsverlauf einer Schweißung mit 25 V für 25 s, mit einer Kühlspannung von 20 V für 15 s und einem vorgeschalteten Spannungsimpuls mit 50 V für 1 s zur Verbesserung des Übergangswiderstandes.*

Temperaturanstieg zur Folge hat. Deshalb war es wichtig zu untersuchen, ob der Impuls Auswirkungen auf die Temperatur zu Prozessbeginn und somit auf den Prozess bzw. die Prozesssicherheit hat. In Abbildung 3.16 ist die maximale Temperatur, welche durch den Impuls erreicht wird, sowie die bei Prozessbeginn herrschende Restwärme des Impulses für alle Versuche dargestellt. Im Mittelwert wird durch den Impuls die Fügezone auf 222,73 °C mit einer Standardabweichung von 3,65 °C erwärmt. Zu Beginn der Schweißung ist der Schweißleiter im Mittelwert wieder auf 54,41 °C mit einer Standardabweichung von 11,71 °C abgekühlt.

Ziel des Versuches war es, den Übergangswiderstand vor und nach dem Impuls zu untersuchen und im Hinblick seiner Größe und Standardabweichung zu bewerten. In Abbildung 3.17 sind die Widerstände vor und nach dem Impuls abgebildet. Zu beachten gilt

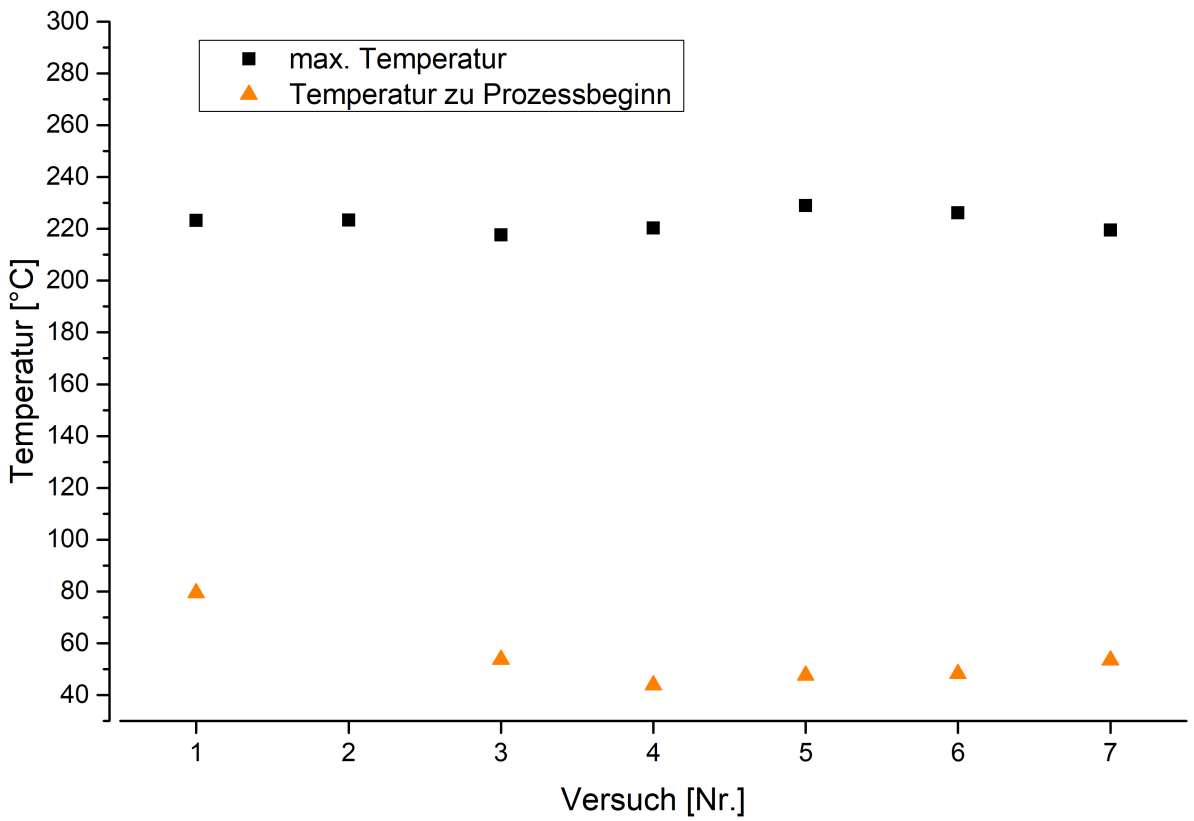


Abbildung 3.16: *Zwei Temperaturen im Impuls. In schwarz ist die maximal durch den Impuls erreichte Temperatur in der Mitte der Fügezone. In orange die noch in der Fügezone vorhandene Temperatur bedingt durch die Restwärme zu Prozessbeginn. In Versuch zwei wurde anschließend an den Impuls keine Schweißung durchgeführt, deshalb fehlt der Wert.*

es, dass die Temperatur nach dem Impuls höher ist als davor. Da Kohlenstofffaser ein Heißleiter ist, sinkt der Widerstand bei höherer Temperatur und verfälscht somit das Ergebnis. Man sieht, dass der Widerstand durch den Impuls reduziert wird. Vor dem Impuls liegt der gemessene Widerstand im Mittel bei $2,05\,\Omega$ mit einer Standardabweichung von $0,46\,\Omega$. Nach dem Impuls sinkt der Widerstand auf $1,52\,\Omega$ mit einer Standardabweichung von $0,09\,\Omega$.

Für den Prozess lassen sich also folgende Schlüsse ziehen: Durch einen vorgeschalteten Spannungsimpuls von 50 V für 1 s lässt sich der Schweißleiterwiderstand reduzieren. Besonders zu beachten ist dabei, dass die Standardabweichung der gemessenen Widerstände nach dem Impuls nur noch ein fünftel der Standardabweichung davor beträgt. Das lässt auf eine stark verbesserte Homogenität der Widerstände schließen. Besonders ist außerdem, dass auch Widerstände wie bei Versuch Nr. 5, welche vor dem Impuls Ausreißer darstellten, nach dem Impuls keinen Unterschied mehr zu den anderen Versuchen zeigen.

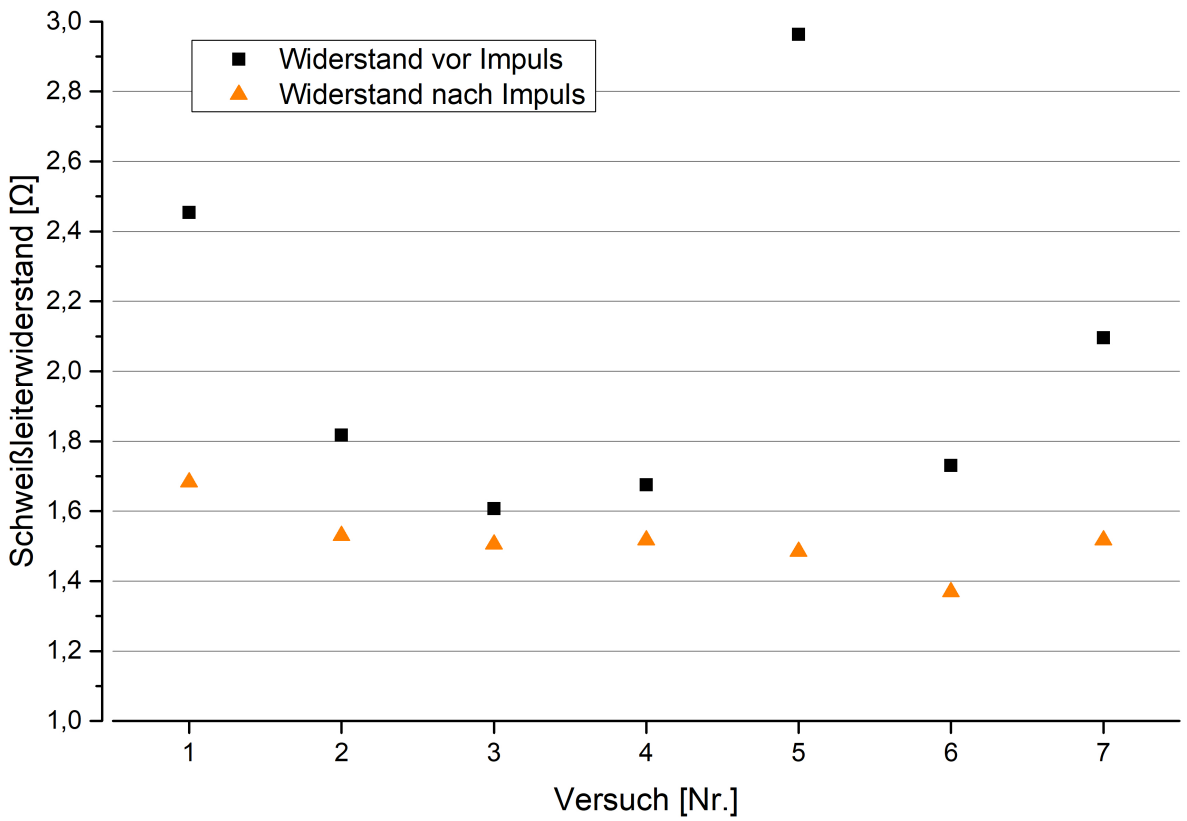


Abbildung 3.17: *Widerstände vor und nach einem dem Prozess vorgeschalteten Spannungsimpuls von 50 V für 1 s. In schwarz ist der Widerstand vor dem Impuls abgebildet, in orange der Widerstand danach.*

Interessant und mit der aktuellen Versuchsreihe nicht erklärbar ist die hohe Homogenität der durch den Impuls erreichten maximalen Impulstemperatur. Trotz der teilweise sehr starken Schwankung in den Schweißleiterwiderständen von über 1 Ω, liegt der Mittelwert der maximal erreichte Temperatur bei 222,73 °C mit einer Standardabweichung von nur 3,65 °C. Während bei anderen Vorversuchen ohne Impuls der Schweißleiterwiderstand den größten Einfluss auf die Prozesstemperatur hatte, scheint die maximale Impulstemperatur davon unbeeinflusst zu sein. Hier müssten weitere Versuche diese Beobachtung validieren. Die Restwärme welche noch 15 s nach dem Impuls noch in der Fügezone messbar ist, sollte mit 54,41 °C und einer Standardabweichung von 11,71 °C keinen Einfluss mehr auf den Prozess haben. In weiteren Versuchsreihen, sollte die Abkühldauer aber erhöht werden um jeden Einfluss ausschließen zu können.

Damit konnte gezeigt werden, dass ein dem Prozess vorangestellter Spannungsimpuls, den Schweißleiterwiderstand senken und die Homogenität deutlich verbessern kann. Damit lassen sich die durch die manuelle Fertigung entstehenden Schwankungen beseitigen. Die Erhöhung der Prozesszeit mit den hier verwendeten Parametern von 16 s, stellt hin-

sichtlich der positiven Auswirkungen eine gerechtfertigte Verlängerung dar.

Versuche mit an den Kontakten degradierter Matrix Zusätzlich zu den in Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Versuchen, wurden noch drei weitere Versuche durchgeführt, in welchen Schweißleiter mit modifizierter Kontaktierung verwendet wurden. Während dem Versuch einer automatisierten Integration des VA-Gewebes auf die Schweißleiterkontaktflächen wurde entdeckt, dass durch einen rückseitigen Ultraschallimpuls, die Matrix auf den Fasern in der Kontaktzone soweit degradiert werden konnte, dass die Fasern frei lagen. Da sonst zur Faserfreilegung Säure oder Feuer benutzt wurde, stellte dieses Verfahren eine sehr einfach und sichere Alternative dar. Im Zuge der in Abschnitt 3.2.4 beschriebenen Versuchsreihe, sollte zusätzlich der Schweißleiterwiderstand dieser neu behandelten Schweißleiter sowie den Einfluss des Spannungsimpulses untersucht werden.

Die Versuche wurden nach dem gleichen Prinzip mit einem 50 V Impuls für 1 s durchgeführt. Vorher und danach wurde wie bei den anderen Versuchen der Widerstand gemessen. In Abbildung 3.18 sieht man die gemessenen Widerstände. In schwarz sind die Widerstände vor, in orange nach dem Impuls abgebildet. Im Mittelwert lag der Widerstand vor dem Impuls bei $7,74\,\Omega$ mit einer Standardabweichung von $1,89\,\Omega$, danach bei $1,85\,\Omega$ mit einer Standardabweichung von $0,07\,\Omega$.

Damit wird deutlich, dass die Kontaktierung mit VA-Gewebe erstmal einen deutlich geringeren Übergangswiderstand hat als die mit entfernter Matrix. Schweißungen mit einem so hohen und inhomogenen Schweißleiterwiderstand wären sehr schwer zu kontrollieren. Anders sieht es aus, wenn die Schweißleiter mit degradierter Matrix mit einem Spannungsimpuls beaufschlagt wurden. Der Widerstand sinkt in Mittelwert um $5,89\,\Omega$, und die Standardabweichung beträgt nur noch $\frac{1}{26}$, verglichen mit der vor dem Impuls. Klar ist, dass drei Versuche nicht ausreichen um eindeutige Aussagen treffen zu können. Allerdings zeigt der Trend, dass die Widerstandssenkung und Homogenisierung auch bei so hohen und stark streuenden Widerständen und bei verschiedenen Kontaktierungen funktioniert. Insgesamt scheint nach diesen ersten Versuchen, ein vorgeschalteter Spannungsimpuls nur stark positive Auswirkungen auf den Prozess zu haben. Gerade bei Ausreißern wie Versuch Nr. 5 in der ersten Messreihe, welche im Prozess zu Problemen führen können, scheint der Spannungsimpuls ein gutes Mittel zur Prävention zu sein. Als nächstes müssten un-

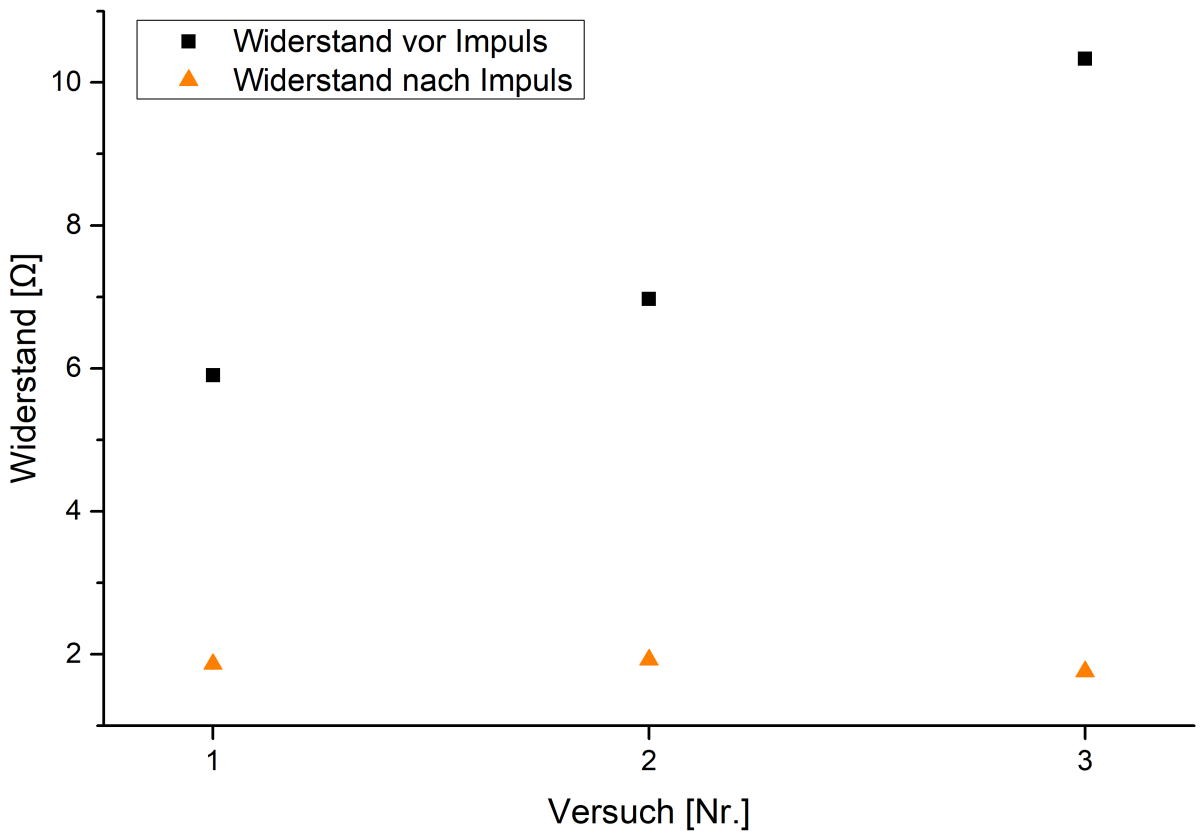


Abbildung 3.18: *Widerstände vor und nach einem dem Prozess vorgeschalteten Spannungsimpuls von 50 V für 1 s. In schwarz ist der Widerstand vor dem Impuls abgebildet, in orange der Widerstand danach. Es wurden Schweißleiter mit in der Kontaktfläche per Ultraschallsonotrode degradierter Matrix verwendet.*

bedingt mehr Versuche gemacht werden, um die beschriebenen Phänomene validieren zu können. Es sollten verschiedene Kontaktierungen und Impulsstärken sowie -längen untersucht werden, um das Optimum aus Prozesszeit, Erwärmung und Widerstandssenkung zu ermitteln.

3.3. Variation der Prozessführung und deren Auswirkung auf den Schweißprozess

3.3.1. Untersuchungen zum Einfluss einer gepulsten Prozessführung auf die Homogenität der Wärmeverteilung in der Fügezone

Im folgenden Abschnitt soll untersucht werden, ob sich eine gepulste Prozessführung auf die Homogenität der Wärmeverteilung über die Fügezone auswirkt. Außerdem sollte der durchgeführte Versuch dazu dienen, eine Finite-Elemente-Simulation des Prozesses zu validieren. Die Idee hinter einer gepulsten Prozessführung ist, die Spannung im Schweißprozess nicht kontinuierlich, sondern nur in kurzen Intervallen anzulegen. In den Pausen dazwischen kann durch den Wärmefluss im Material eine gleichmäßigere Verteilung der Wärme in der Fügezone erreicht werden.

Um die Temperaturverteilung über die Fügezone in der Messung möglichst hoch aufzulösen, wurden für den Versuch sechs Thermoelemente zwischen Schweißleiter und Isolationslage platziert und ein weiteres am Kupferkontaktblock angebracht. In Abbildung 3.19 sieht man die Lage der verschiedenen Thermoelemente in der Fügezone. Besonders wichtig bei dieser Versuchsreihe war es, die Thermoelemente bei jedem Versuch an der gleichen Stelle zu positionieren, da schon kleine Abweichungen zu hohen Temperaturunterschieden führen können. Nur durch eine exakte Platzierung ist die Vergleichbarkeit der Versuche gewährleistet. Das erste Thermoelement (TC 1) wurde seitlich ganz unten am Kupferkontaktblock angebracht, um die Erwärmung der Kontaktierung zu messen. Zusätzlich wurden drei Thermoelemente (TC 2, 3 und 7) in der Mitte der Fügezone angebracht, zwei an den Rändern und eins in der Mitte. TC 4 und 5 wurden an der rechten Seite in der Mitte und am oberen Rand angebracht. Das TC 6 maß die Temperatur in der Mitte der Fügezone zwischen TC 3 und 4. Die verwendeten Materialien und der Versuchsaufbau sind in Unterunterabschnitt 2.3.1 beschrieben.

Es wurden mit dieser Thermoelementkonfiguration drei Schweißungen mit einem kontinuierlichen Spannungsprofil und drei mit einem gepulsten Profil durchgeführt. Die beiden Spannungsprofile sind in Abbildung 3.20 zu sehen. Die kontinuierliche Schweißung wurde mit 25 V für 25 s durchgeführt. Für die Spannung der gepulste Prozessführung wurden Parameter gewählt, für welche schon eine Simulation durchgeführt wurde, um die Simu-

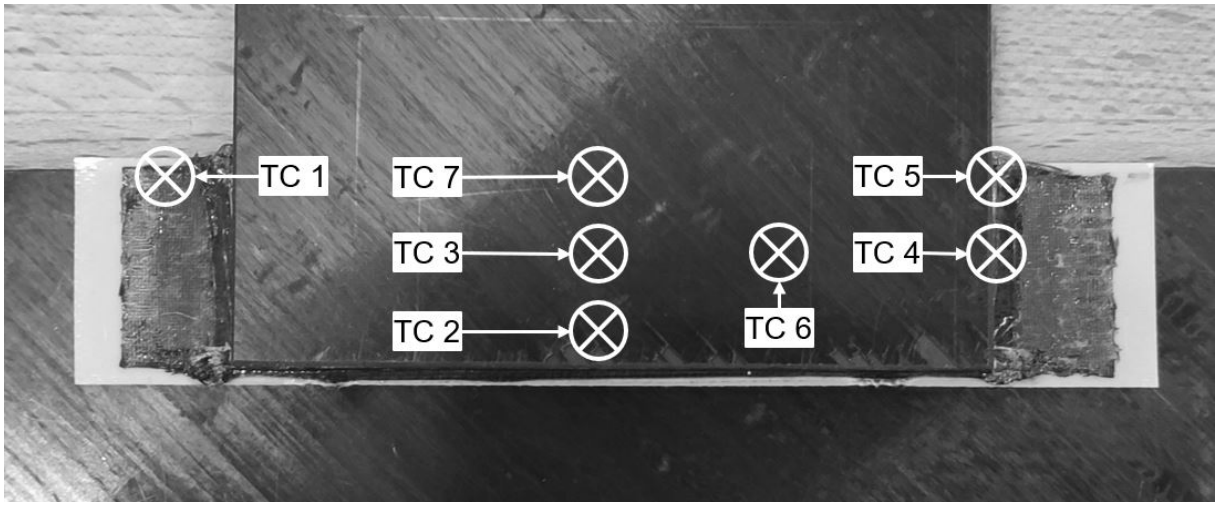


Abbildung 3.19: *Schematische Anordnung der 7 Thermoelemente in der Fügezone zur hochauflösenden Messung der Temperaturverteilung. Gemessen wurde die Temperatur direkt zwischen Schweißleiter und Glasisolationslage (TC 2-7) bzw. direkt am Kupferkontaktklotz (TC 1).*

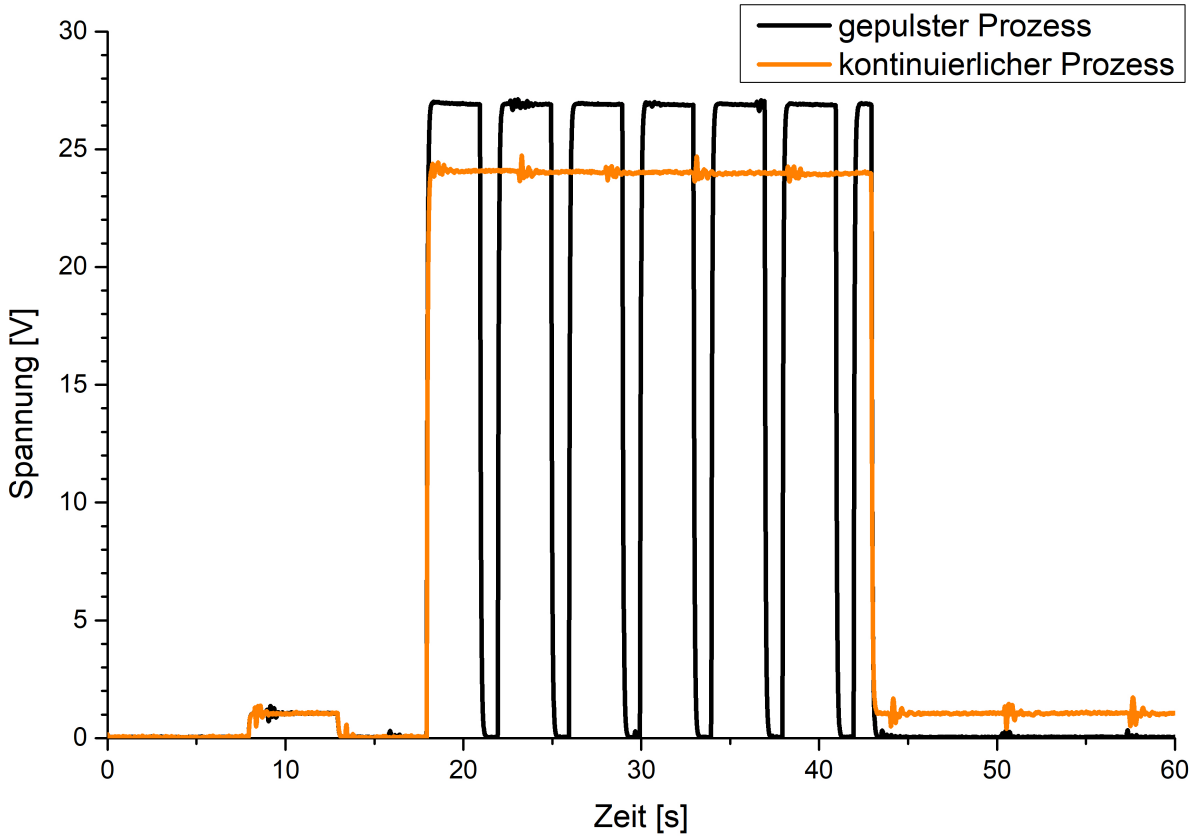


Abbildung 3.20: *Spannungsverlauf im kontinuierlichen (orange) und gepulsten (schwarz) Prozess. Beim kontinuierlichen Prozess wurde für 25 s bei 25 V geschweißt. Der gepulste Prozess bestand aus 6 Intervallen mit 3 s Dauer und einem Intervall mit 1 s Dauer bei einer Spannung von 28 V und Pausen zwischen den Intervallen von 1 s.*

lation mit der Messung vergleichen zu können. Es wurden insgesamt 6 Spannungsimpulse mit 28 V und 3 s Länge und anschließend ein Impuls von 1 s, ebenfalls mit 28 V, in die Fügezone gegeben. Die Pause zwischen den Impulsen betrug 1 s. Somit betrug die Prozesszeit bei beiden Messreihen 25 s.

Um die Homogenität der Wärmeverteilung in der Fügezone bewerten zu können, wurde in der Auswertung zum einen die mittlere über den Prozess gemessene Temperatur, sowie die maximal im Prozess erreichte Temperatur ausgewertet. Dafür wurden die beiden Werte für jedes Thermoelement aus allen Versuchen gebildet. Anschließend wurde für jede Prozessführung der Mittelwert der drei Versuche für jedes Thermoelement errechnet. Um die Änderungen der Streuung und der Standardabweichung grafisch darzustellen, wird in der Auswertung für jede Prozessführung ein Histogramm und ein Boxplot gebildet. Eine Verringerung der beiden Größen würde für eine homogenere Wärmeverteilung sprechen. In Abbildung 3.21 ist das Histogramm mit eingezeichneter Normalverteilungskurve, sowie das Boxplot mit Mittelwert und Standardabweichung der mittleren über den Prozess gemessenen Temperaturen der gepulsten, sowie der kontinuierlichen Prozessführung dargestellt. Die gepulste Prozessführung ist mit schwarz gezeichnet, die kontinuierliche in orange. Im Histogramm ist deutlich zu sehen, dass die Varianz, also die Breite der Normalverteilungskurve, der gepulsten Prozessführung kleiner ist als die der kontinuierlichen. Im Boxplot darunter sieht man, dass die Standardabweichung der kontinuierlichen Prozessführung mit 31,11 °C mehr als doppelt so hoch ist, wie die der gepulsten Prozessführung, welche nur 13,18 °C beträgt.

In Abbildung 3.22 sind die beiden beschriebenen Diagramme für die maximale Temperatur aufgezeichnet. Auch hier kann man den Einfluss der gepulsten Prozessführung auf die Homogenität der Wärmeverteilung erkennen. Die Normalverteilungskurve ist durch die geringere Varianz ebenfalls höher und schmaler und im Boxplot ist die niedrigere Standardabweichung von 46,61 °C bei der kontinuierlichen Prozessführung zu 27,69 °C bei der gepulsten Prozessführung zu sehen.

Somit wird deutlich, dass eine gepulste Prozessführung bei der verwendeten Schweißkonfiguration zu einer homogeneren Erwärmung der Fügezone führt. Sowohl die maximale, als auch die mittlere Temperatur haben über die Fügezone eine wesentlich geringere Streuung, welche sich in der stark gesunkenen Standardabweichung zeigt. Durch die verwendeten Thermoelemente war eine Prüfung der Qualität und Homogenität der Fügung per

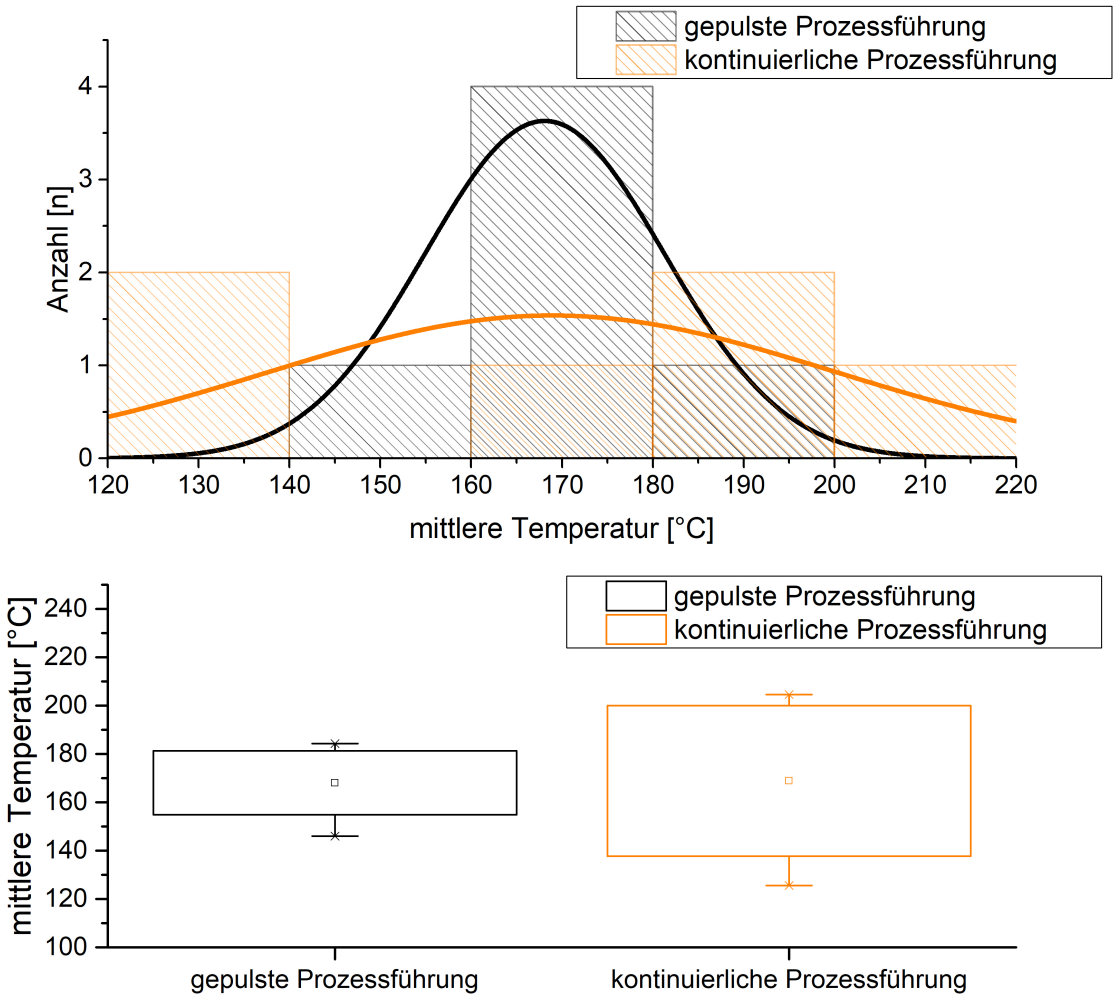


Abbildung 3.21: *Abbildung des Histogramm mit eingezeichneter Normalverteilungskurve, sowie das Boxplot mit Mittelwert und Standardabweichung der mittleren über den Prozess gemessenen Temperaturen der gepulsten in schwarz, sowie der kontinuierlichen Prozessführung in orange.*

Wasserultraschall leider nicht möglich. Als nächster Schritt müssten hier zur Validierung der Prozesssicherheit und Verbindungsfestigkeit, Versuche ohne Thermoelemente gemacht werden, welche im Wasserultraschall und per Zugprobe geprüft werden können, um so eine Aussage über die Verbindungsqualität und die Festigkeit der Verbindung treffen zu können.

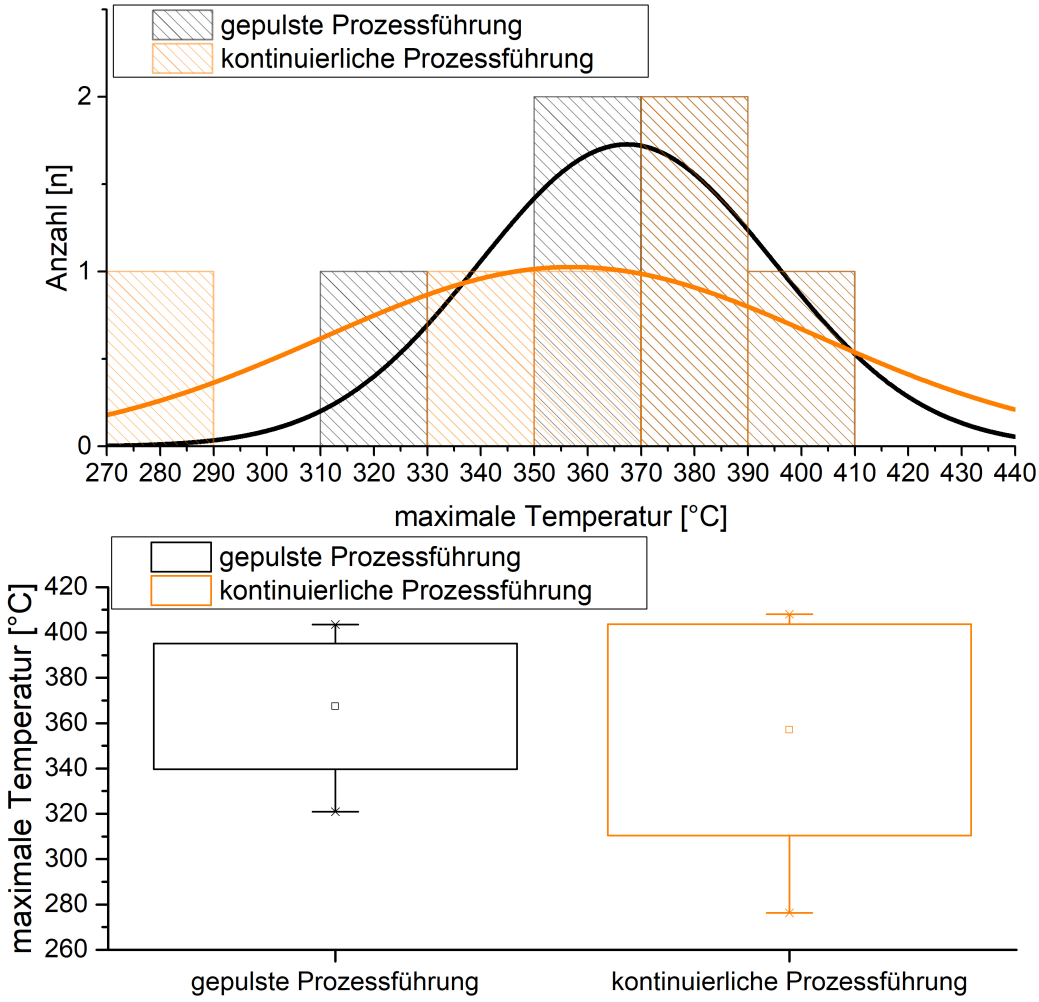


Abbildung 3.22: *Abbildung des Histogramm mit eingezeichneter Normalverteilungskurve, sowie das Boxplot mit Mittelwert und Standardabweichung der maximal im Prozess erreichten Temperaturen der gepulsten in schwarz, sowie der kontinuierlichen Prozessführung in orange.*

3.3.2. Untersuchungen zum Einfluss einer zweistufigen Druckaufbringung auf die Verbindungsfestigkeit und die Prozesssicherheit

In diesem Abschnitt wird der Einfluss einer zweistufigen Druckaufbringung auf die Verbindungsfestigkeit sowie die Prozesssicherheit untersucht. Dafür wird in einer Reihe von Vorversuchen die zweistufige Druckaufbringung erstmalig im Prozess erprobt und die anschließende Versuchsreihe im Zugversuch getestet. Geschweißt wurde mit dem in Unterunterabschnitt 2.3.1 beschriebenen Versuchsaufbau und einer Glasisolationslage.

Einfluss der zweistufigen Druckaufbringung auf die Prozessparameter und die Prozesssicherheit

Bis die zweistufige Druckaufbringung am Versuchsstand installiert wurde, konnte der Schweißprozess nur auf einem konstanten Druckniveau durchgeführt werden. Das hatte zur Folge, dass auf bestimmte, druckabhängige, Probleme nicht reagiert werden konnte. Das häufigste Problem war ein seitliches Austreten des Schweißleiters durch Quetschfluss in der Aufheizphase. Das hatte durch die schlechtere Wärmeableitung an der Luft zur Folge, dass der Schweißleiter an den freiliegenden Stellen stark überhitzte. Dadurch kam es durch den vermehrten Stromfluss in den wärmeren Bereichen zu einer inhomogenen Wärmeverteilung über die Fügezone und somit zu Stellen mit starker Überhitzung bzw. unzureichender Erwärmung. Die Idee hinter der zweistufigen Druckaufbringung ist deswegen, durch ein niedrigeres Druckniveau in der Aufheizphase den Quetschfluss in der ersten Phase des Prozesses zu minimieren und den Konsolidierungsdruck erst in der Fügephase aufzubringen. Dafür wurden zwei Druckregelventile installiert, welche über getrennte Kreisläufe zwei Druckniveaus realisieren können. Über ein 3-2-Wegeventil mit manuellem Schalter kann der Druck aktiviert bzw. deaktiviert und über ein 5-3-Wegeventil zwischen den Druckniveaus gewechselt werden. In Anhang C ist die von M. Endraß entwickelte pneumatische Verschaltung dargestellt [7].

Der niedrigste, reproduzierbar und konstant einstellbare Druck an den Druckregelventilen lag bei etwa 1 bar. Da es für Schweißungen mit einem Druck von 1 bar noch keine Datengrundlage für die Prozessparameter gab, mussten vor den Versuchen für die Festigkeitsbe-

stimmung noch Vorversuche durchgeführt werden, um die Auswirkungen des reduzierten Drucks auf die Prozessparameter zu untersuchen. Die Schweißspannung mit 27 V und die Kühlspannung von 20 V für 15 s wurden vorher als unveränderliche Parameter festgelegt. In den Vorversuchen mussten deshalb nur die Auswirkungen der Drucksenkung auf die Schweißdauer untersucht werden. Dabei stellte sich heraus, dass das geringere Druckniveau zu einer wesentlich schnelleren Aufheizung führte. In den vier gelaufenen Vorversuchen, wurde eine Aufheizdauer vom Anschalten der Spannung bis zum Erreichen der oberen Prozesstemperatur (380 °C), von 9.57 s mit einer Standardabweichung von 2,13 s gemessen. Da der Druck nach ca. $\frac{2}{3}$ der Schweißdauer erhöht werden sollte und das Prozessfenster bei 340 °C bis maximal 400 °C liegt, wurde eine Aufheizdauer von ca. 10 s bis 12 s definiert. Zusätzlich konnte beobachtet werden, dass die Temperatur in der Fügezone schlagartig sinkt, sobald der Druck erhöht wird. Mit Erhöhung des Druckes sank die Temperatur im Schnitt um 79,27 °C mit einer Standardabweichung von 8,98 °C. Diese starke Abkühlung wird bedingt durch die verbesserte Wärmeübertragung in die Organobleche und zeugt von einem großen Temperaturgradienten zwischen dem Schweißleiter und den Organoblechen. Wegen der starken Temperatursenkung ist eine kurzzeitige Erhitzung über die Prozessgrenzen hinaus, kurz vor der Druckerhöhung, kein Abbruchkriterium.

Für die Versuchsreihe mit 9 Versuchen können folgende Prozessparameter definiert werden: Die Schweißspannung liegt bei 27 V, für 10 s für die ersten zwei Versuchen bzw. 12 s für die restlichen sieben. In der anschließenden verzögerten Abkühlung liegt die Spannung bei 20 V für 15 s. Der Druck liegt in der Aufheizphase bei 1 bar und wurde manuell nach Erreichen von 380 °C auf 8 bar erhöht.

In Abbildung 3.23 ist der Spannungs-, Temperatur- und Druckverlauf einer Schweißung mit zweistufiger Druckaufbringung und den genannten Parametern mit einer Schweißdauer von 12 s zu sehen. Deutlich erkennbar ist die sehr schnelle Aufheizung der Fügezone, sowie der Temperaturabfall nach der Druckerhöhung. Der Zeitpunkt der Druckerhöhung ist durch eine vertikale Linie gekennzeichnet. Die maximalen Temperaturen der Versuche schwankten durch die manuelle Betätigung der Druckerhöhung stark. Im Schnitt lag sie bei 407,88 °C mit einer Standardabweichung von 39,76 °C.

Aus prozesstechnischer Sicht ist eine zweistufige Druckaufbringung ein sehr wirksames Mittel, um die Prozesszeit zu verkürzen und den Quetschfluss zu minimieren. Im Wasserultraschall zeigten bis auf wenige Ausnahmen alle Schweißungen ein gutes Prüfergebnis.

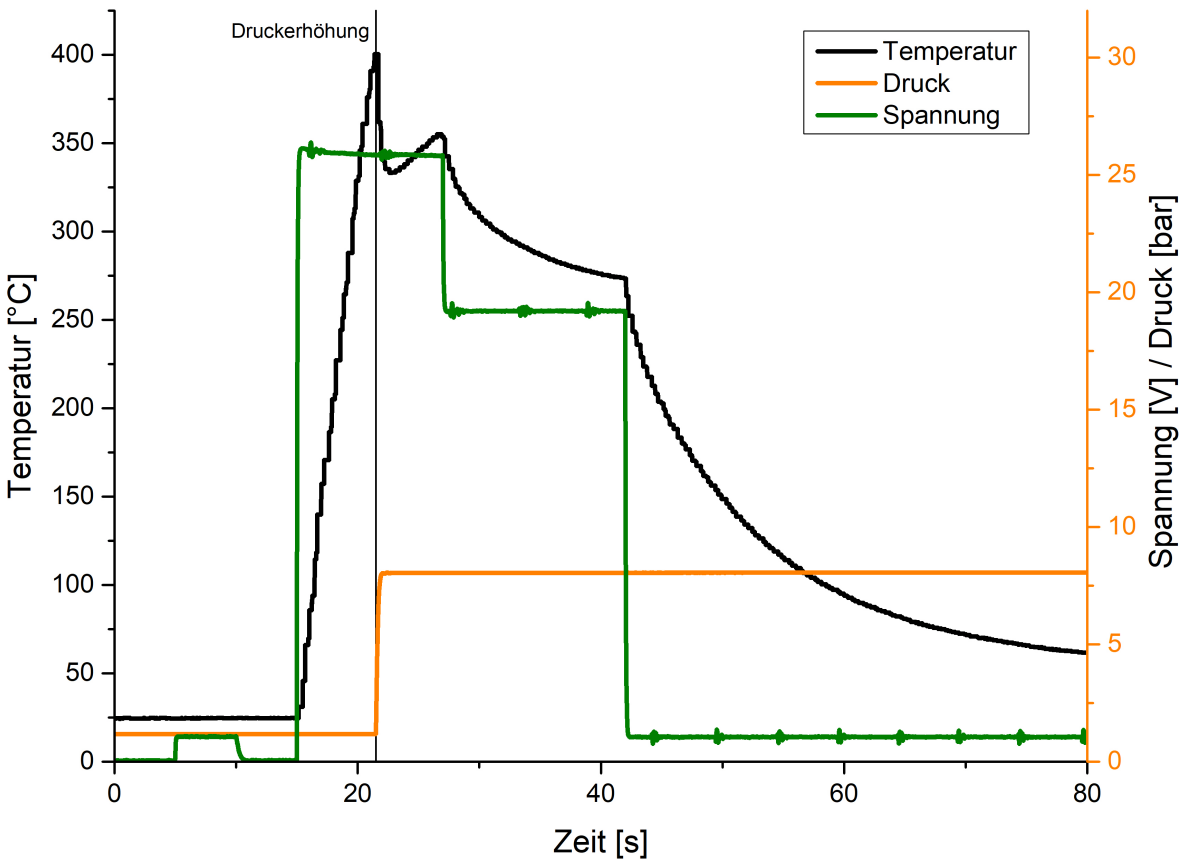


Abbildung 3.23: *Spannungs-, Temperatur- und Druckverlauf einer Schweißung mit zweistufiger Druckaufbringung. Schweißung mit 27 V für 12 s mit einer Kühlspannung von 20 V für 15 s. Der Druck wurde manuell nach erreichen von 380 °C von 1 bar auf 8 bar erhöht. Zeitpunkt der Druckerhöhung ist durch eine vertikale Linie gekennzeichnet.*

Insgesamt ist eine Prozesssicherheit gegeben. Als nächster Schritt müsste ein elektronisches 5/3-Wegeventil verbaut werden, um die Druckumschaltung zu automatisieren und so die maximale Temperatur genauer einstellen und den Prozess präzise steuern zu können. Dadurch kann die starke Streuung gesenkt und der Prozess reproduzierbar werden. Durch die in den Vorversuche definierten Prozessparameter kann nun im nächsten Schritt die Versuchsreihe mit anschließender Festigkeitsuntersuchung durchgeführt werden.

Einfluss der zweistufigen Druckaufbringung auf die Zugfestigkeit

In dieser Versuchsreihe sollen anhand von neun Schweißungen die Auswirkungen einer zweistufigen Druckaufbringung auf die Festigkeit der Verbindung untersucht werden. Die Prozessparameter wurden in Vorversuchen untersucht und festgelegt. Geschweißt wurde mit 27 V für 10 s bzw. 12 s mit anschließender verzögerter Abkühlung bei 20 V für 15 s. Der

Druck wurde manuell nach erreichen der Prozesstemperatur von ca. 380 °C von 1 bar auf 8 bar erhöht. Vier der Proben wurden mit einer Glasisolationslage geschweißt, die restlichen fünf mit Matrixisolation. Aus jeder Schweißung wurden zwei Zugproben geschnitten und mit einer ZwickRoell Zugprüfmaschine im Zugversuch in Anlehnung an ASTM1002 auf ihre Festigkeit untersucht. Prüfgeschwindigkeit war 1 $\frac{\text{mm}}{\text{min}}$, weggesteuert. Die erreichte maximale Zugkraft lag bei Glasisolation im Mittelwert bei 6916,14 N mit einer Standartabweichung von 656,50 N. Bei den Zugproben mit Matrixisolation wurden im Mittelwert 7976,31 N mit einer Standardabweichung von 1527,55 N erreicht. In Abbildung 3.24 sind die Boxplots der maximalen Festigkeiten abgebildet. Eingezeichnet sind der Mittelwert als Punkt, der Median als Linie sowie als Box die Standartabweichung.

In Abbildung 3.24 ist der gleiche Einfluss der Isolationslage auf die Festigkeit zu sehen

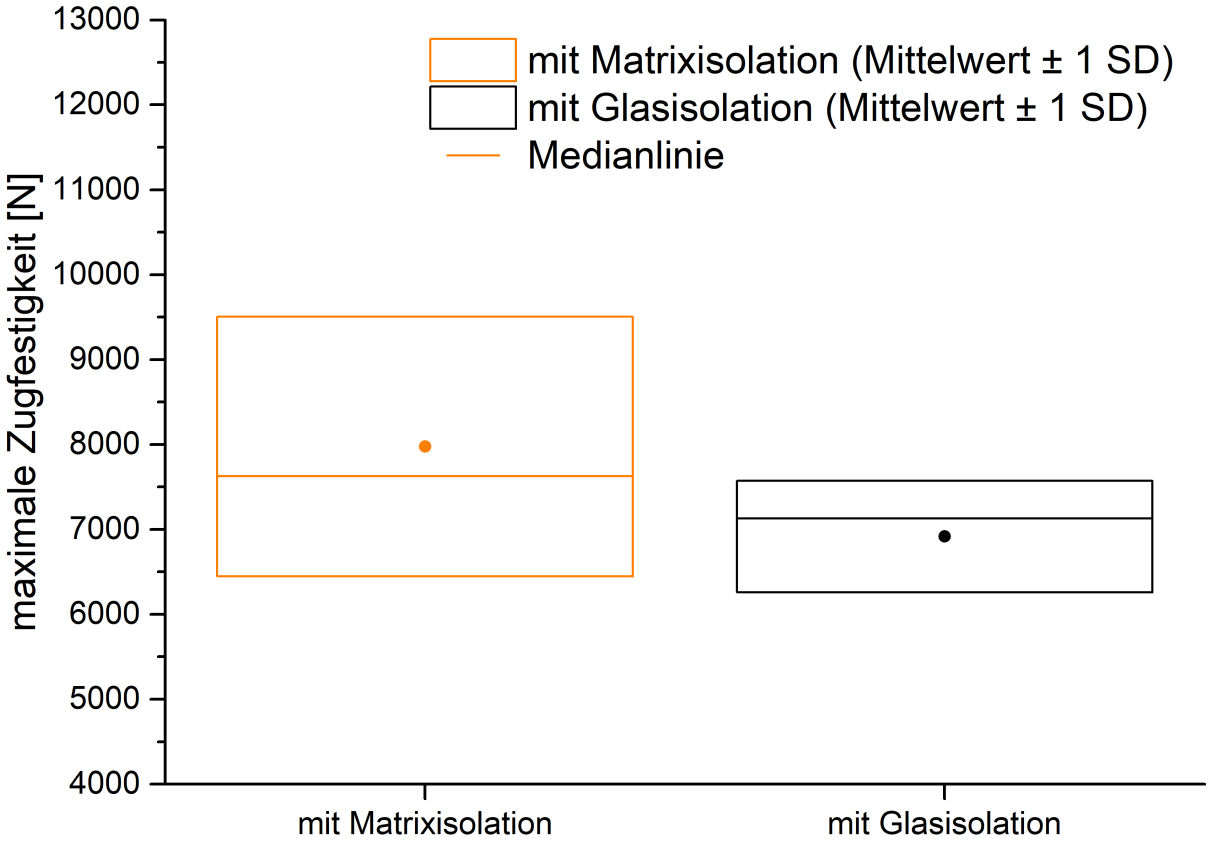


Abbildung 3.24: *Maximal erreichte Kraft im SLS-Zugversuch für Proben mit Schweißleiterisoloierung aus Matrixwerkstoff und GF/LM-PAEK bei Schweißungen mit variabler Druckaufbringung. Der Druck wurde kurz vor Ende der Aufheizphase von 1 bar Zylinderdruck auf 8 bar erhöht. Zu sehen ist der Mittelwert mit Standartabweichung als Punkt und Box sowie der Median als horizontale Linie.*

wie in Unterabschnitt 3.1 beschrieben ist. Eine Isolation mit Matrix erhöht die Festigkeit. Allerdings ist zu erkennen, dass die zweistufige Druckaufbringung die Verbundfestigkeit

reduziert. Verglichen mit den Versuchen aus Unterabschnitt 3.1, liegen die erreichten Werte bei einer Isolation mit Matrix im Mittel um 4029,38 N und bei der Isolation mit Glas um 1024,76 N niedriger. Bei Glasisolation werden also noch etwa 87 % der Festigkeit erreicht, bei Matrixisolation nur noch 66 %. Die Standartabweichung reduziert sich deutlich. Bei Matrixisolation von 2372,65 N auf 1527,55 N bei variabler Druckaufbringung und bei Glasisolation von 1420,24 N auf 656,50 N.

Zusammenfassend lassen sich für den Schweißprozess mit variabler Druckaufbringung folgende Schlüsse ziehen: Die schnelle Aufheizung reduziert die Prozesszeit, allerdings durch die verkürzte Aufheizphase auf Kosten der Verbindungsqualität. Dabei sinkt die Standardabweichung, da der Quetschfluss unterbunden wird. Bei einstufiger Druckaufbringung schwankt die Abweichung stärker, da bei jedem Versuch unterschiedlich viel Matrixmaterial ausgequetscht wird. Die Festigkeit reduziert sich insbesondere bei der Matrixisolation deutlich. Durch die konstruktiv bedingt Kopplung von Kontakt- und Schweißdruckaufbringung wird in der Aufheizphase der Kontaktdruck ebenfalls reduziert. Das führt zu einem höheren Übergangswiderstand und sollte in Zukunft durch getrennte Druckaufbringung vermieden werden. Hinzu kommt, dass das schnelle Aufheizen bei kleinen Schweißleitern schwer zu kontrollieren ist, was sich negativ auf die Prozesssicherheit auswirkt. Vor allem die manuelle Umschaltung zwischen den Druckniveaus stellt ein Sicherheitsrisiko dar, da durch zu spätes Auslösen der Druckerhöhung schnell zu hohe Temperaturen erreicht werden können. Bei anderen Projekten mit größeren Schweißungen, hat sich die variable Druckaufbringung bereits bewährt. Zeitgleich durchgeführte Versuche mit anderen Schweißlängen konnten die beobachteten, negativen Effekte nicht bestätigen. Die Aufheizgeschwindigkeit erhöhte sich bei Schweißungen mit 1500 mm Länge nicht nennenswert. Die Anzahl an Durchschlägen und Prozessabbrüchen durch ausgequetschten Schweißleiter, einem der akutesten Probleme bei großen Schweißungen, hat sich deutlich reduziert. Bei diesem Schweißmodul ist die beschriebene, getrennte Druckaufbringung von Kontakt- und Schweißdruck schon realisiert. Erste Festigkeitsuntersuchungen stehen dort noch aus, allerdings scheint die variable Druckaufbringung für große Schweißungen sehr vorteilhaft zu sein. Für Schweißungen im Coupon-Maßstab, wie die hier beschriebenen, müssten noch weitere Untersuchungen bei verschiedenen Druckniveaus durchgeführt werden, um das Optimum aus schneller Aufheizung und wenig Quetschfluss bei hoher Prozesssicherheit zu finden.

4. Bestimmung einer optimalen Prozessparameterkonfiguration für die Fertigung der Demonstratorhalbschale mittels statistischer Versuchsplanung

Eines der Ziele dieser Arbeit ist es, eine Prozessparameterkonfiguration zu finden, mit der ein sicherer Widerstandsschweißprozess mit hohen Festigkeitswerten gewährleistet werden kann. Im Projekt MFFD am Zentrum für Leichtbauproduktionstechnologie des DLR soll mit diesen Prozessparametern die Spantenintegration in die Rumpfdemonstratorhalbschale durchgeführt werden. Die Bestimmung der optimalen Prozessparameter erfolgt im folgenden Abschnitt durch eine statistische Versuchsplanung.

Die statistische Versuchsplanung (engl. Design of Experiment, kurz DoE) ist ein Werkzeug, welches den Ingenieur beim effizienten Planen und Auswerten seiner Versuchsreihen unterstützen soll. Durch den hohen Aufwand bei vollfaktorieller Durchführung der Versuche, sollten diese auf ein Minimum reduziert werden. Zusätzlich soll die Interpretation trotz Teststreuung vereinfacht und zwischen realen und scheinbaren Effekten unterschieden werden können. Dafür werden in der statistischen Versuchsplanung als erstes die Größen festgelegt, welche untersucht werden sollen. Als Faktor definiert werden Prozessgrößen, welche alleinstehend und unabhängig von anderen Größen sind. Faktoren müssen in den gewählten Systemgrenzen einstellbar und reproduzierbar sein. Alle nicht als Faktoren gewählten Einflussgrößen müssen möglichst konstant gehalten werden. Anschließend müssen noch die auszuwertenden Ergebnisse festgelegt werden. Am besten verdeutlichen kann man das als Schaubild wie in Abbildung 4.1.

Hat man die zu untersuchenden Faktoren festgelegt, muss man Stufen bilden. Die Anzahl an Stufen ist abhängig davon, wie viele Werte jedes Faktors untersucht werden sollen. Üblich sind hier drei bis fünf Stufen, in dieser Arbeit wird ein DoE mit drei Stufen durchgeführt. Der Bereich, den die Stufen umspannen, heißt Parameterbereich. Dieser sollte so gewählt werden, dass er einen funktionierenden Prozess, auch an den Parametergrenzen, darstellt. Der Bereich sollte außerdem nicht zu klein gewählt werden, da kleine Veränderungen meistens auch kleine Auswirkungen haben und so durch andere Effekte

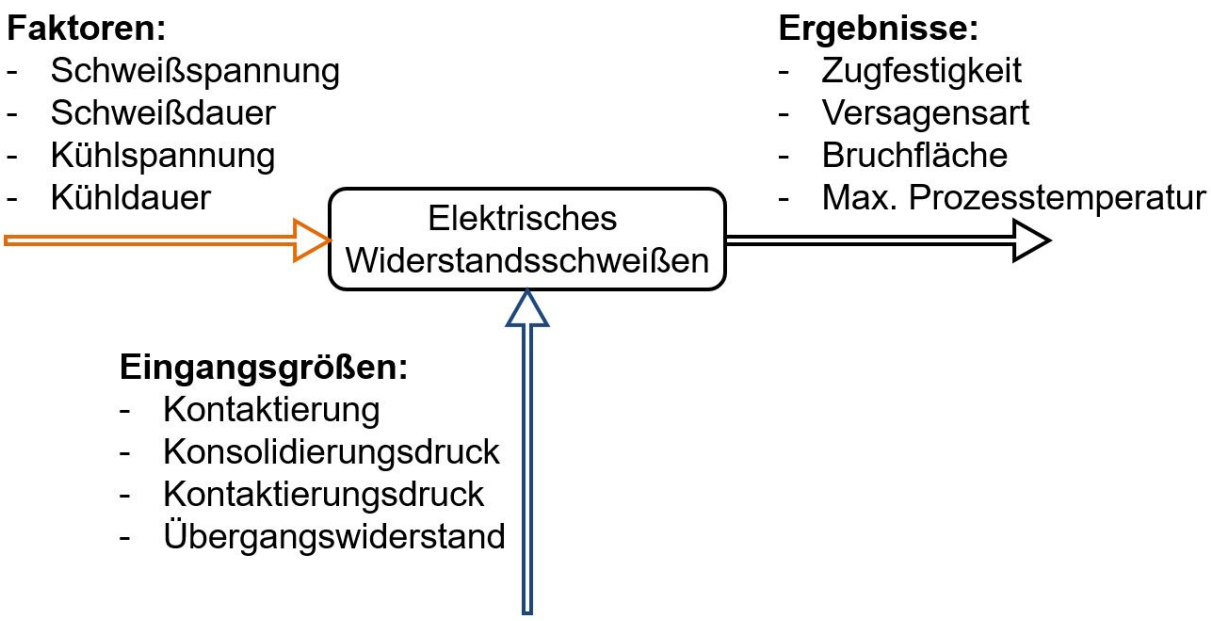


Abbildung 4.1: *Schematische Darstellung des elektrischen Widerstandsschweißens, mit Auswahl der zu untersuchenden Prozessgrößen als Faktoren, den konstant zu haltenden anderen Eingangsgrößen und den Ergebnissen.*

überdeckt werden können. Zum Finden der richtigen Parameterbereiche sind Vorversuche sehr hilfreich, wie sie beispielsweise in Unterunterabschnitt 3.2.3 für die Kühlspannung und die Kühldauer durchgeführt wurden. Sind alle diese Voraussetzungen erfüllt, kann ein DoE durchgeführt werden. Der Ingenieur wird dabei in der Praxis meistens durch ein Computerprogramm unterstützt, welches den Versuchsplan erstellt und die statistische Auswertung übernimmt. In dieser Arbeit wird das Programm Design Expert® der Firma State-Ease Inc. verwendet. Dort stehen verschiedene Versuchspläne zur Auswahl. In dieser Arbeit wurde das Central Composite Design verwendet, auf welches im Folgenden näher eingegangen wird. ([11] S. 2 ff.)

Central Composite Design Das Central Composite Design (CCD) ist ein Versuchsplan, welcher sich aus zwei Komponenten zusammensetzt. Durch die Kombination eines zweistufigen Versuchsplans, in Form eines „Würfels“, mit einem dreistufigen Versuchsplan, in Form eines „Sterns“, entsteht ein Plan mit 5 Stufen. Diese Pläne haben meistens eine Auflösungsstufe von 4 oder 5, welche in Tabelle 5 erklärt sind. Die Auflösung bewertet im Zusammenhang mit einem DoE die Vermengungsstruktur zwischen Haupteffekten und Wechselwirkungen, grob gesagt die Genauigkeit. In Abbildung 4.2 ist ein CCD für drei Faktoren graphisch dargestellt. Jeder Punkt steht für eine Parameterkonfiguration, welche

Tabelle 5: *Auflösungsstufen 4 und 5 der statistischen Versuchsplanung. ([11] S. 31)*

Stufe	Eigenschaften
4	Haupteffekte sind mit Dreifachwechselwirkungen vermengt und Zweifachwechselwirkungen untereinander. Das Feld ist geeignet, um Haupteffekte sicher zu bestimmen, Zweifachwechselwirkungen lassen sich jedoch nicht eindeutig zuordnen.
5	Haupteffekte sind mit Vierfachwechselwirkungen vermengt und Dreifachwechselwirkungen mit Zweifachwechselwirkungen. Ein derartiges Feld kann ohne Schwierigkeiten das lineare Beschreibungsmodell versorgen.

getestet werden soll. Um den in lila dargestellten sogenannten Center Point entstehen so

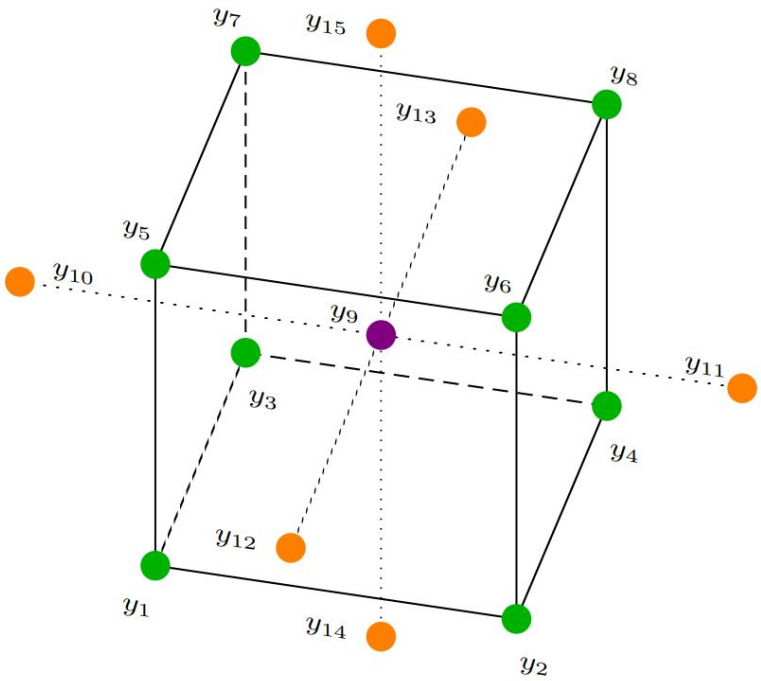


Abbildung 4.2: *Central Composite Design. Fünfstufiger Versuchsplan durch Kombination eines Würfels (zweistufiger Versuchsplan in grün) mit einem Stern (dreistufiger Versuchsplan in lila/orange). ([11] S. 41)*

für jeden Parameter zu jeder Seite zwei Stufen. Da sich die gewählten Parameter aber schon oft an den physikalischen Grenzen des Systems befinden, gibt es noch eine Sonderform des CCD, das „Face Centered Central Composite Design“. Die Besonderheit dabei ist, dass die Punkte des Sterns auf den Flächen des Würfels liegen und somit nicht über die Systemgrenzen hinaus ragen. Das reduziert die Anzahl der Stufen auf drei. Teilweise lassen sich allerdings dadurch quadratische Effekte schlechter trennen. Insgesamt wird das CCD häufig eingesetzt, da es bei einer vertretbaren Anzahl an Versuchen, insgesamt gute Ergebnisse liefert. In Abschnitt 4 kommt ein Face Centered Central Composite Design

zum Einsatz. Dabei wird, um die Ergebnisse abzusichern, der Center Point sechs mal wiederholt und die „Stern-“ und „Würfelpunkte“ zwei mal. Dadurch ergeben sich 54 einzelne Versuche. Der resultierende Versuchsplan ist in Anhang B angehängt. ([11] S. 40 ff.)

4.1. Faktoren

Für die statistische Versuchsplanung in dieser Arbeit wurden die vier Faktoren ausgewählt, welche den größten Einfluss auf das Ergebnis der Schweißung haben. Das Ziel der statistischen Versuchsplanung war es, die Festigkeit zu maximieren. Durch die Reduzierung der Faktoren auf die wichtigsten Parameter, kann die Versuchsanzahl klein gehalten, aber trotzdem die wichtigsten Informationen über den Prozess erhoben werden. Folgende Faktoren wurden untersucht:

Die Schweißspannung ist wie in Unterunterabschnitt 2.3.3 beschrieben der steuernde Schweißparameter und hat dadurch den größten Einfluss auf den Prozess. Für das zu untersuchende Parameterfenster konnte auf umfassende vorherige Versuche zurückgegriffen werden. In [16], [1] und [14] wurden Schweißungen mit verschiedenen Spannungsniveaus beschrieben und ausgewertet. Außerdem konnte durch die in Unterunterabschnitt 3.2.3 beschriebene und in Abbildung 3.10 dargestellte Versuchsreihe, verschiedenen Spannungswerten die entsprechenden maximalen Prozesstemperaturen zugeordnet werden. Dort ist zu erkennen, dass ab 23 V Schweißspannung Temperaturen über 340 °C und damit im Verarbeitungsbereich des verwendeten Matrixwerkstoffes LM-PAEK erreicht werden. Die obere Grenze wurde schon in vorherigen Versuchen auf 27 V festgelegt, da in Schweißungen mit höheren Spannungen leicht Temperaturen von über 400 °C erreicht werden. Solch hohe Temperaturen können über die Dauer eines Prozesses zu einer Degradation der Matrix und somit zu einem Festigkeitsverlust führen. Dadurch kann das Parameterfenster für die Schweißspannung bei Schweißungen der Größe 22 mm x 84 mm auf 23 V bis 27 V festgelegt werden.

Die Schweißdauer ist der zweite untersuchte Faktor. Sie ergibt sich indirekt aus Schweißspannung und gewünschter Prozesstemperatur. Für die Schweißdauer mussten Werte gewählt werden, bei denen an der oberen und unteren Grenze des Parameterfensters der Schweißspannung, noch Schweißungen möglich sind. Die entsprechenden Zeiten wurden anhand der vorher durchgeführten Versuche bestimmt. Für die untere Grenze, also einer Schweißung mit 23 V, werden 20 s definiert. Die obere Grenze muss so gewählt werden, dass bei einer Schweißung mit der maximalen Spannung von 27 V, nicht der Verarbeitungstemperaturbereich von LM-PAEK überschritten wird. Schweißungen mit 27 V waren in der Vergangenheit für bis zu 30 s möglich. Somit wurde das Prozessfenster für die Schweißdauer auf 20 s bis 30 s festgelegt.

Die Kühlspannung und das entsprechende Parameterfenster wurde in Unterunterabschnitt 3.2.3 beschrieben. In diesem Abschnitt wurde aus Vorversuchen ein entsprechendes Parameterfenster identifiziert und wird so im DoE untersucht. Das Parameterfenster für die Kühlspannung ist gemäß Unterunterabschnitt 3.2.3 auf 18 V bis 20 V festgelegt.

Die Kühldauer wird ebenfalls in Unterunterabschnitt 3.2.3 untersucht. Aus der DSC-Messung des verwendeten Matrixwerkstoffes LM-PAEK können entsprechende Zeiten für eine möglichst vollständige Nachkristallisation definiert werden. Entsprechend wird das Parameterfenster für die Kühldauer auf 5 s bis 15 s festgelegt.

4.2. Zielgößen

Die Zielgrößen, auch Responses (engl. für Antwort) genannt, sind die auszuwertenden Ergebnisse in der statistischen Versuchsplanung. Hier werden ebenfalls vier verschiedene Werte untersucht. Am Ende ist das Ziel der statistischen Versuchsplanung, die Auswirkungen aller Faktoren, ihrer Wechselwirkungen und ihrer quadratischen Auswirkungen auf die Zielgrößen zu kennen. Höhere Wechselwirkungen können mit einem Versuchsplan der Stufe 5 nicht untersucht werden, denn dafür sind wesentlich mehr Versuche nötig.

So kann man einen optimalen Prozess mit der dazugehörigen Parameterkonfiguration definieren, welcher die gewünschten Ergebnisse bringt. Außerdem können im Rahmen des Modells Vorhersagen für Parameterkonfigurationen getroffen werden, welche nicht explizit im Versuch untersucht wurden. In diesem DoE wurden folgende Zielgrößen untersucht:

Die Zugfestigkeit als Hauptcharakterisierungsgröße einer Fügeverbindung ist die wichtigste Zielgröße, denn die Festigkeit ist die wichtigste Eigenschaft einer Schweißung. Darin wird sie primär mit anderen Schweißverfahren bzw. Fügeverfahren verglichen und muss gerade in sensiblen und anspruchsvollen Einsatzgebieten wie der Luftfahrt beste Ergebnisse erzielen. Die geschweißten Proben werden in SLS-Zugproben geschnitten und nach dem in Unterunterabschnitt 2.4.1 beschriebenen Verfahren gezogen. Die Prüfungen fanden im luftfahrtzertifizierten Prüflabor der Firma Premium AEROTEC GmbH statt. Getestet wurde neben der Bindefestigkeit auch die maximale Zugfestigkeit der Schweißungen. Diese wird auch als Zielgröße in den Versuchsplan eingetragen.

Die Versagensart ist die zweite untersuchte Zielgröße. Um in der Auswertung verschiedene Zugfestigkeiten erklären zu können, bzw. die Schwachstelle des Prozesses zu finden, ist es von Vorteil, den Ort des Versagens zu lokalisieren. Dafür wurde die Bruchfläche nach dem Zugversuch in die in Unterunterabschnitt 3.1.2 definierten Brucharten am Auflichtmikroskop unterteilt. Durch den anschließenden Vergleich der entsprechenden Flächenanteile der einzelnen Brucharten, wurde die Hauptversagensart bestimmt. Dafür wurden mit Hilfe eines Python Algorithmus die Werte der Bruchflächen der beiden Zugproben einer Schweißung addiert und der größte Wert bzw. die Hauptbruchart ausgegeben und in den Versuchsplan eingetragen.

Die Bruchfläche kann aus den gleichen Daten wie die Versagensart gewonnen werden, mit dem Unterschied, dass die Bruchfläche den prozentualen Anteil der verschweißten Fläche beschreibt. Errechnet wird sie also, wieder mit Hilfe des Algorithmus, aus der Summe

der Brucharten 2a, 2b, 2c, dividiert durch die gemessene Gesamtfläche. Eine möglichst große verschweißte Fläche ist für eine sichere Fügenaht an einem Flugzeugrumpf essenziell. Außerdem kann man anhand der Bruchfläche erkennen, ob der Wärmeeintrag in die Tiefe der verschweißten Teile ausreichend und homogen ist.

Die maximale Prozesstemperatur dient zur Überwachung der Parameterfenster der Schweißspannung und -dauer. Außerdem soll der Einfluss der maximalen Prozesstemperatur auf die anderen Zielgrößen untersucht werden. Die Temperatur wird in den durchgeführten Versuchen mittels eines Typ-K Thermoelements in der Mitte der Fügezone gemessen und aufgezeichnet. Anschließend wird die maximale Prozesstemperatur im DoE ausgewertet. Das lässt Rückschlüsse auf eine ausreichend hohe Fügetemperatur zu und erlaubt außerdem eine Auswertung der Versuche außerhalb der statistischen Versuchsplanung. Die große Anzahl der Versuche mit verschiedenen Parametern kann als Informationsquelle für zukünftige Versuche dienen und dadurch Vorversuchsreihen verkürzen. Aus den aufgezeichneten Prozessdaten konnte durch den Datenauswertungsalgorithmus direkt die maximal im Prozess erreichte Temperatur ausgelesen werden.

4.3. Analyse

Nach der abgeschlossenen Vorbereitung und dem Festlegen der Faktoren und Zielgrößen, wurden die Versuche nach dem erstellten Versuchsplan durchgeführt. Durch die hohe Anzahl an Versuchen, konnten sie nicht alle an einem Tag durchgeführt werden, was die Streuung erhöhen kann. Die Versuche wurden an 10 Tagen durchgeführt und die Daten gesammelt. Genauso wie die Erstellung des Versuchsplans, wird die Auswertung im Programm Design Expert (Version 8) durchgeführt. Die statistischen Möglichkeiten und Optionen in der Auswertung und Optimierung des DoE sind dort nahezu unbegrenzt. Deswegen konzentriert sich dieser Abschnitt auf die wichtigsten statistischen Kennwerte und Diagramme, welche im Folgenden eingeführt und dann für jede Zielgröße analysiert werden.

Die grundlegende Analyse einer statistischen Versuchsplanung in Design Expert geht immer nach dem gleichen Prinzip vor. Dafür gibt es in dem „Analysis“ Bereich für jede Zielgröße fünf Reiter.

- Transform
- Fit Summary
- Model
- ANOVA
- Diagnostics
- Model Graphs

Diese Punkte werden Schritt für Schritt bzw. in Schleifen durchgegangen um die richtigen Modelle zu finden und statistische Sicherheit für die Auswertung sicherzustellen.
Im ersten Reiter, **Transform**, kann eine beliebige Transformation der Daten vorgenommen werden. Dies wird aber beim ersten Durchgang noch übersprungen und direkt mit **Fit Summary** begonnen.
Im zweiten Reiter, **Fit Summary**, befinden sich alle statistischen Kenngrößen, welche das Programm ausgibt. Anhand dieser Kennwerte soll das zu verwendende Modell bestimmt werden. Die wichtigsten werden nun kurz eingeführt. Der „Sequential p-value“ also der sequentielle p-Wert, ist ein Evidenzmaß im Test für statistische Signifikanz. Dieser ist ein Maß für die Glaubwürdigkeit der Nullhypothese[7]. Wenn er unter einem bestimmten Wert liegt, ist die Nullhypothese falsch, also eine statistische Signifikanz vorhanden. Als Richtwert wird hier 0,05 genommen. Ist der vom Programm berechnete „$Sequential\, p-value$“ $< 0,05$, kann von statistischer Signifikanz ausgegangen werden. Der zweite Wert ist der „Lack of Fit p-value“. Dieser p-Test besagt wie gut das Modell auf die Daten passt. In diesem Test wird aber der „Lack of Fit“, also die negativen Abweichungen des Modells getestet. Deshalb sollte er im besten Fall nicht signifikant sein. Als Richtwert gilt hier: „$Lack\, of\, Fit\ p-value$“ $> 0,1$. Als letztes wird noch R^2 in zwei Ausführungen verglichen. R^2 steht hier für die Abweichung welche die Daten vom Modell haben. Durch eine Quadratsummenzerlegung wird ein Wert gebildet, welcher bei einem optimalen Modell gegen 1 geht. Dabei werden zwei verschieden berechnete R^2 verglichen. Zum einen das „Adjusted R^2“ und das „Predicted R^2“. Das Adjusted R^2 ist der Anteil an

[7] Hypothese, dass ein bestimmter Zusammenhang nicht besteht oder kein Effekt vorliegt.

der Abweichung in den Daten welcher durch das Modell erklärt werden kann. Predicted R^2 beschreibt den Anteil der Abweichung, in den vorhergesagten Werten, welcher durch das Modell beschrieben wird. Allgemein ist bei diesen Werten also ein höherer Wert besser und die beiden Werte sollten nicht mehr als 0,2 auseinanderliegen.

Aus diesen statistischen Werten errechnet das Programm das beste Modell und markiert es. Die Modelle bauen dabei aufeinander auf. Als erstes werden die beschriebenen Tests nur mit den linearen Termen durchgeführt. Anschließend werden Zwei-Faktor-Interaktionen hinzugefügt und die Tests wiederholt. Als letztes werden noch die quadratischen Terme addiert und die Tests ein letztes Mal durchgeführt. Die Ergebnisse können anschließend verglichen und das Modell mit den besten Werten für die weiteren Untersuchungen bestimmt werden.

Das vorgeschlagene Modell wird im nächsten Reiter, **Model**, automatisch ausgewählt und die entsprechend dem Modell zu untersuchenden Wechselwirkungen markiert. Die ausgewählten Berechnungen werden nun im nächsten Schritt mit dem gewählten Modell durchgeführt und die Ergebnisse im nächsten Reiter angezeigt.

In **ANOVA** wird die gesamte auf dem gewählten Modell basierende Varianzanalyse angezeigt. Am wichtigsten ist hier die Spalte, in der zu jeder ausgewählten Wechselwirkung, das p-value angegeben wird. Hier lässt sich somit auf einen Blick sehen, welche Faktoren einen Einfluss auf das Ergebnis haben und welche nicht. Die Faktoren bei denen das p-value unter 0,05 liegt haben einen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße. Außerdem kann noch einmal am Lack-of-Fit-Test das Modell verifiziert werden.

Im nächsten Reiter, **Diagnostics**, muss nun die Varianzanalyse validiert werden. Das wird bei Design Expert im wesentlichen über vier Grafiken gemacht. Dabei wird der Datenrest betrachtet, welcher entsteht, wenn man von den gemessenen Werten die laut Modell vorhergesagten Werte subtrahiert. Diese als „Noise“ (engl. für Rauschen) bezeichneten Werte werden bei Design Expert „Residuals“ (engl. für Restwerte) genannt. In Abbildung 4.3 sind die vier wichtigsten Grafiken dargestellt. Als erstes wird die Normalverteilung der Residuals überprüft. Trägt man, wie in der linken oberen Grafik, die Residuals in ein Normal Plot (engl. für Wahrscheinlichkeitsnetz) ein, bildet sich bei normalverteilten Daten ein linearer Verlauf. So kann eine Normalverteilung sichergestellt werden. Im nächsten Plot, rechts oben, werden die Residuals gegen die vom Modell vorhergesagten Werte aufgezeichnet. Hier ist darauf zu achten, dass eine gleichmäßige Verteilung der Residuals sowohl bei

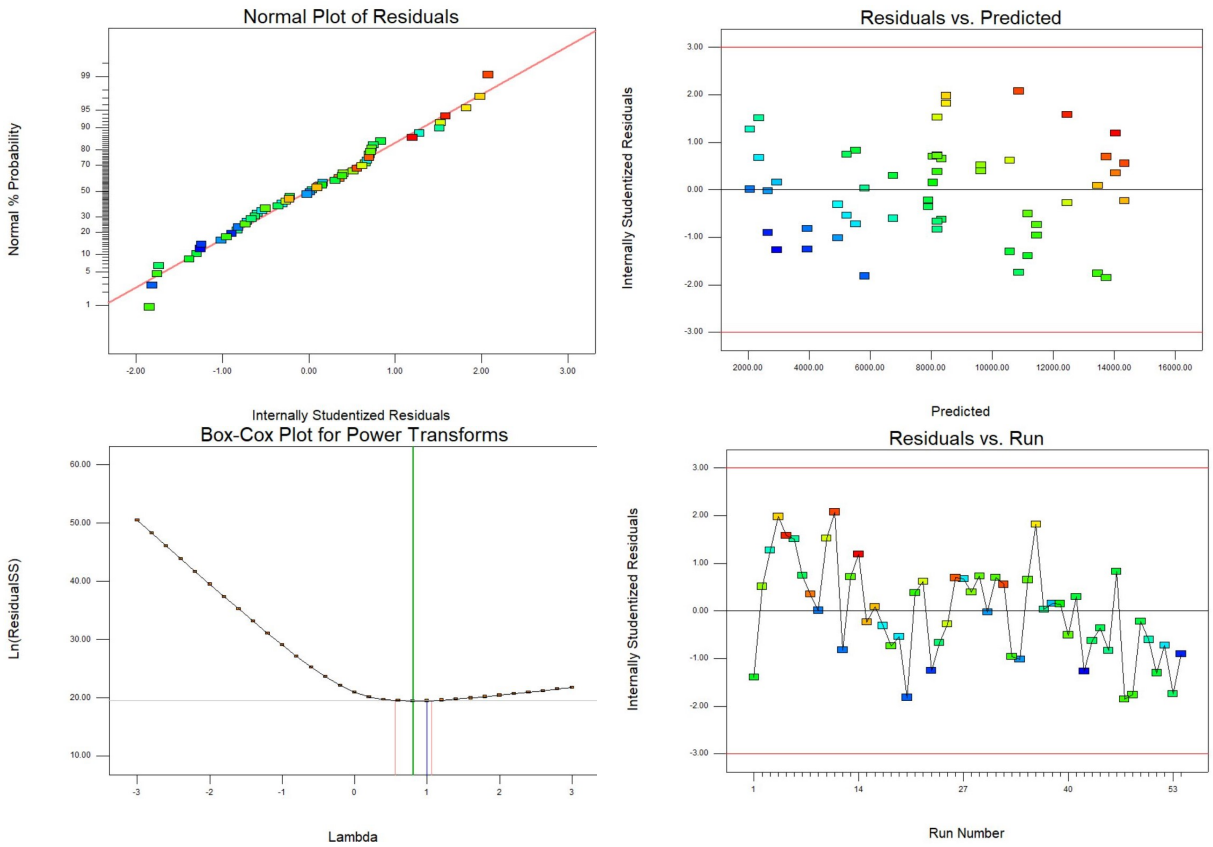


Abbildung 4.3: *Vier Diagramme zur Validierung der Varianzanalyse. Oben links Normal Plot of Residuals, oben rechts Residuals vs. Predicted, unten links Box-Cox Plot und unten rechts Residuals vs. Run.*

den kleinen, als auch bei den großen vorhergesagten Werten vorliegt. Bildet sich hier eine Art Trichter oder andere geometrische Formen oder liegt einer der Punkte außerhalb der roten Linien oben und unten, deutet das auf ein Fehler im Modell hin. Haben alle Residuals über die ganze Breite einen ungleichmäßigen Abstand von der Mittellinie, zeugt das von einer konstanten Varianz. Im Plot darunter, kann die gleiche Prüfung in Bezug auf die verschiedenen Versuche durchgeführt werden. Hier sind die Residuals über den verschiedenen Versuchen aufgetragen. Bildet sich hier eine Art Trichter oder andere geometrische Formen oder liegt einer der Punkte außerhalb der roten Linien oben und unten, spricht das für ein Problem bei der Versuchsdurchführung und deutet auf fehlerhafte Daten hin. Ein ungleichmäßiger Verlauf, zeugt von konstanter Varianz und somit einer guten Versuchsführung. Im letzten Plot, dem Box-Cox links unten, wird eine Regressionsanalyse dargestellt, welche eine möglicherweise notwendige Stabilisierung der Varianz anzeigt. Wenn notwendig schlägt hier das Programm die nötige Transformation vor, welche im ersten Reiter **Transform** anschließend ausgewählt werden und der Prozess von vorne gestartet werden müsste.

Passen alle die statistischen Kenngrößen und wurde die Varianzanalyse durch die Diagramme validiert, ist die Analyse abgeschlossen und die Ergebnisse können im letzten Reiter **Model Graphs** ausgewertet werden. Dieses Vorgehen wird im folgenden Abschnitt für alle vier zu untersuchenden Zielgrößen durchgeführt.

Die **SLS-Festigkeit** ist die erste und in dieser DoE auch wichtigste Zielgröße. Die statistische Betrachtung der im Zugversuch gemessenen Werte ergaben zur Auswahl des Modells folgende in Tabelle 6 dargestellten Werte. Dadurch wird deutlich, dass durch den signifi-

Tabelle 6: *Zusammenfassung der statistischen Werte im DoE zur Modellbildung in der Auswertung der SLS-Festigkeit.*

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2	
Linear	<0,0001	0,2609	0,6829	0,6389	Suggested
2 Factor Interaction	0,1627	0,3848	0,7056	0,6041	
Quadratic	0,3130	0,4202	0,7118	0,5822	

kanten Sequential p-value, den nicht signifikanten Lack of Fit p-value sowie den höchsten R^2 Wert, das lineare Modell am besten den gemessenen Werten entspricht. Führt man die Varianzanalyse mit dem linearen Modell durch, kann man in der ANOVA die Zielgrößen ablesen, welche einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Bei der SLS-Festigkeit sind das:

- A-Spannung mit einem p-value von <0,0001
- B-Schweißdauer mit einem p-value von 0,0011

Kühlspannung und Kühldauer haben laut diesem Modell keinen signifikanten Einfluss auf die SLS-Festigkeit. Der Lack of Fit ist mit einem p-value von 0,2609 nicht signifikant und somit ist das Modell richtig gewählt. Die Diagramme zur Validierung der Varianzanalyse zeigen eine sehr gute Normalverteilung, keine Besonderheiten im Varianzverlauf sowie kein Bedarf einer Transformation.

Die zweite Zielgröße war **die Versagensart**. Durch die geringen Unterschiede in den Ergebnissen (es wurden nur 1 und 2b als Hauptbrucharten gemessen) sind die statistischen Werte zu hinterfragen. Es ergaben sich folgende Werte zur Auswahl des Modells in Tabelle 7. Als Konvention gilt, bei mehreren vorgeschlagenen Modellen, das höchste zu nehmen.

Tabelle 7: *Zusammenfassung der statistischen Werte im DoE zur Modellbildung in der Auswertung der Versagensart.*

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2	
Linear	0,0002	0,4061	0,3019	0,1826	Suggested
2 Factor Interaction	0,7670	0,2654	0,2612	-0,1270	
Quadratic	0,0335	0,6859	0,3728	-0,0130	Suggested

In diesem Fall wird also das quadratische Modell ausgewählt. In der anschließenden Varianzanalyse sind folgende Zielgrößen signifikant:

- A-Spannung mit einem p-value von <0,0001
- A^2 mit einem p-value von 0,0035

Schweißdauer, Kühlspannung und Kühldauer haben laut diesem Modell keinen signifikanten Einfluss auf die Versagensart. Der Lack of Fit ist mit einem p-value von 0,6859 nicht signifikant und somit ist das Modell richtig gewählt. Allerdings ist anzumerken, dass die sehr niedrigen bzw. negativen R^2-Werte für eine sehr schlechte Vorhersage sprechen. Hier sollte evaluiert werden ob diese Zielgröße in der anschließenden Optimierung zur Identifizierung der optimalen Prozessparameterkonfiguration nicht deaktiviert werden sollte. Die Diagramme zur Validierung der Varianzanalyse zeigen eine gute Normalverteilung, keine Besonderheiten im Varianzverlauf sowie kein Bedarf einer Transformation.
Die dritte Zielgröße war **die Bruchfläche**. Im Fit Summary ergaben sich folgende Werte zur Auswahl des Modells, dargestellt in Tabelle 8. Durch die guten statistischen Werte

Tabelle 8: *Zusammenfassung der statistischen Werte im DoE zur Modellbildung in der Auswertung der Bruchfläche.*

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2	
Linear	<0,0001	0,0045	0,6090	0,5629	
2 Factor Interaction	0,5801	0,0020	0,5989	0,4836	
Quadratic	0,0001	0,1892	0,7517	0,6202	Suggested

des quadratischen Modells, wurde dieses zu Varianzanalyse ausgewählt. Dabei stellten

sich folgende Faktoren als statistisch signifikant heraus:

- A-Spannung mit einem p-value von <0,0001
- CD (C-Kühlspannung, D-Dauer der Kühlspannung) mit einem p-value von 0,0468
- A^2 mit einem p-value von <0,0001

Schweißdauer sowie Kühlspannung und Kühldauer als nicht kombinierte Faktoren, haben laut diesem Modell keinen signifikanten Einfluss auf die Bruchfläche. Der Lack of Fit ist mit einem p-value von 0,1892 nicht signifikant und somit ist das Modell richtig gewählt. Die Diagramme zur Validierung der Varianzanalyse zeigen eine sehr gute Normalverteilung sowie keine Besonderheiten im Varianzverlauf. Das Programm schlägt im Box-Cox Diagramm eine Power-Transformation der Daten vor, welche im Reiter **Transform** ausgewählt wurde.

Die letzte Zielgröße war **die Zieltemperatur**. Für die im Prozess erreichte Temperatur, ergaben sich folgende in Tabelle 9 zusammengefasste statistischen Werte zur Modellauswahl. Dadurch wird deutlich, dass durch den signifikanten Sequential p-value, den nicht

Tabelle 9: *Zusammenfassung der statistischen Werte im DoE zur Modellbildung in der Auswertung der Zieltemperatur.*

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R^2	Predicted R^2	
Linear	<0,0001	0,1704	0,7301	0,6908	Suggested
2 Factor Interaction	0,4045	0,1520	0,7319	0,6249	
Quadratic	0,7623	0,0782	0,7178	0,5824	

signifikanten Lack of Fit p-value sowie den höchsten R^2, das lineare Modell am besten den gemessenen Werten entspricht. Führt man die Varianzanalyse mit dem linearen Modell durch, kann man in der ANOVA die Zielgrößen ablesen welche einen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis haben. Bei der Zieltemperatur sind das:

- A-Spannung mit einem p-value von <0,0001
- B-Schweißdauer mit einem p-value von 0,0367

Kühlspannung und Kühldauer haben laut diesem Modell keinen Einfluss auf die Maximale Temperatur. Der Lack of Fit ist mit einem p-value von 0,1704 nicht signifikant und

somit ist das Modell richtig gewählt. Die Diagramme zur Validierung der Varianzanalyse zeigen eine sehr gute Normalverteilung, keine Besonderheiten im Varianzverlauf sowie kein Bedarf einer Transformation.
Die statistische Analyse der Daten ist damit abgeschlossen und die Auswertung der gefundenen Einflussfaktoren kann durchgeführt werden.

Auswertung

Durch die statistische Analyse konnten die signifikanten Einflussfaktoren für jede Zielgröße bestimmt werden. In der Auswertung werden nun, anhand der vom Programm Design Expert erstellten Grafiken, die Einflüsse grafisch ausgewertet.
Für die **SLS-Festigkeit** wurden die Faktoren A-Spannung und B-Schweißdauer als statistisch signifikante Einflussfaktoren identifiziert. In Abbildung 4.4 ist der Einfluss der Spannung auf die SLS-Festigkeit bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s zu sehen. Deutlich zu erkennen ist dabei, dass die Fes-

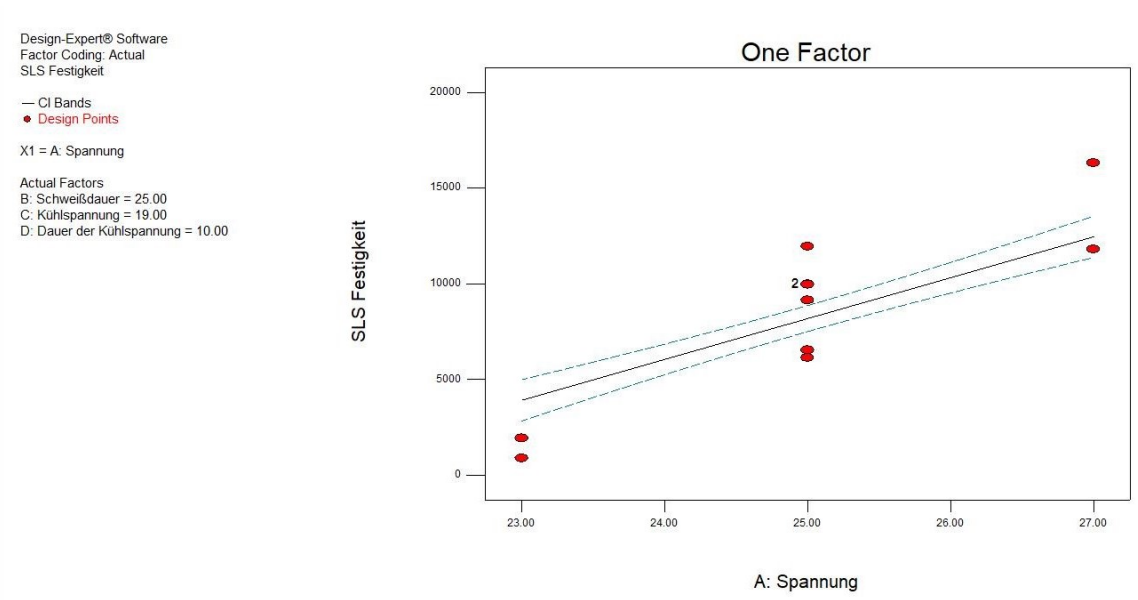


Abbildung 4.4: *Einfluss der Schweißspannung auf die SLS-Festigkeit bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Spannung in V wird von 23 V bis 27 V untersucht und durch ein lineares Modell beschrieben.*

tigkeit mit zunehmender Spannung steigt. In Abbildung 4.5 ist das gleiche Diagramm für den Einfluss der Schweißdauer auf die SLS-Festigkeit bei konstanter Spannung von 25 V, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s abgebildet. Auch bei der Schweißdauer

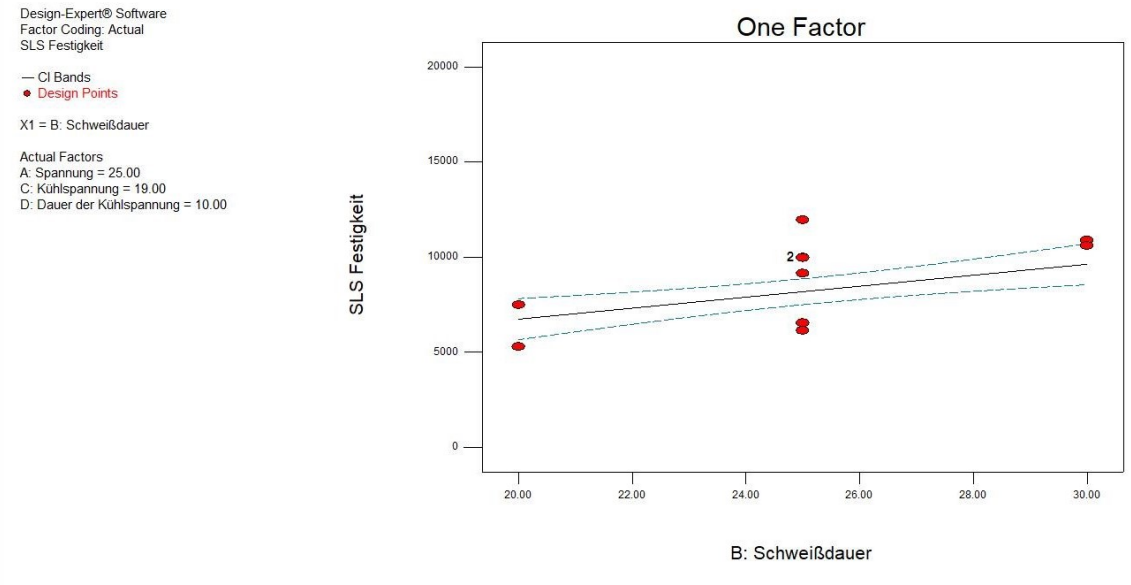


Abbildung 4.5: *Einfluss der Schweißdauer auf die SLS-Festigkeit bei konstanter Schweißspannung von 25 V, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Schweißdauer in s wird von 20 s bis 30 s untersucht und durch ein Lineares Modell beschrieben.*

ist eine Steigerung der SLS-Festigkeit mit zunehmender Schweißdauer zu erkennen. Der Anstieg ist nicht ganz so steil wie bei der Spannung, was schon an dem höheren p-value der Spannung gegenüber der Schweißdauer zu erkennen war.

Für **die Versagensart** wurde der Faktor A-Spannung bzw. sein quadrierter Wert als statistisch signifikant identifiziert. Betrachtet man den Verlauf der durch ein quadratisches Modell erzeugten Kurve in Abbildung 4.6, sieht man eine Problematik, welche sich durch diesen Faktor ergibt. Durch die begrenzte Anzahl der festgelegten Bruchflächen ist eine Annäherung durch ein Modell nicht gut möglich. Abgebildet ist der Verlauf der Versagensart bei konstanter Schweißdauer von 25 s Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Zu erkennen ist, dass ab ca. 25 V Schweißspannung die Bruchart 2a als Hauptbruchart überwiegt. Da es sich bei den Brucharten um ordinal skalierte Daten handelt, kann es danach zu keiner Steigerung mehr kommen und das Modell kann keine vorhersagen treffen. Aus diesem Grund wird die Zielgröße Versagensart im anschließenden Prozess zur Identifizierung der optimalen Parameterkonfiguration herausgenommen.

Für die dritte Zielgröße, **die Bruchfläche** wurden sowohl der Faktor A-Spannung, sein quadratischer Einfluss, sowie die Verbindung der Faktoren C-Kühlspannung und D-Dauer der Kühlspannung als statistisch signifikant identifiziert. In Abbildung 4.7 ist der Einfluss der Spannung auf die Bruchfläche bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung

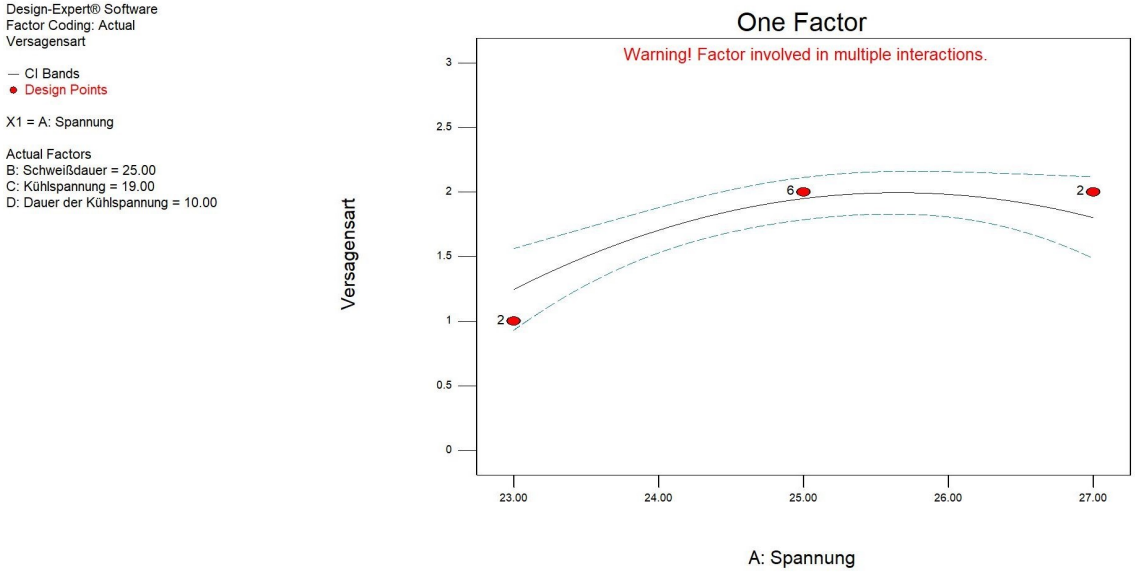


Abbildung 4.6: *Einfluss der Spannung auf die Versagensart bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Spannung in V wird von 23 V bis 27 V untersucht und durch ein quadratisches Modell beschrieben.*

von 19 V und Kühldauer von 10 s abgebildet. Zu erkennen ist ein sehr starker Anstieg

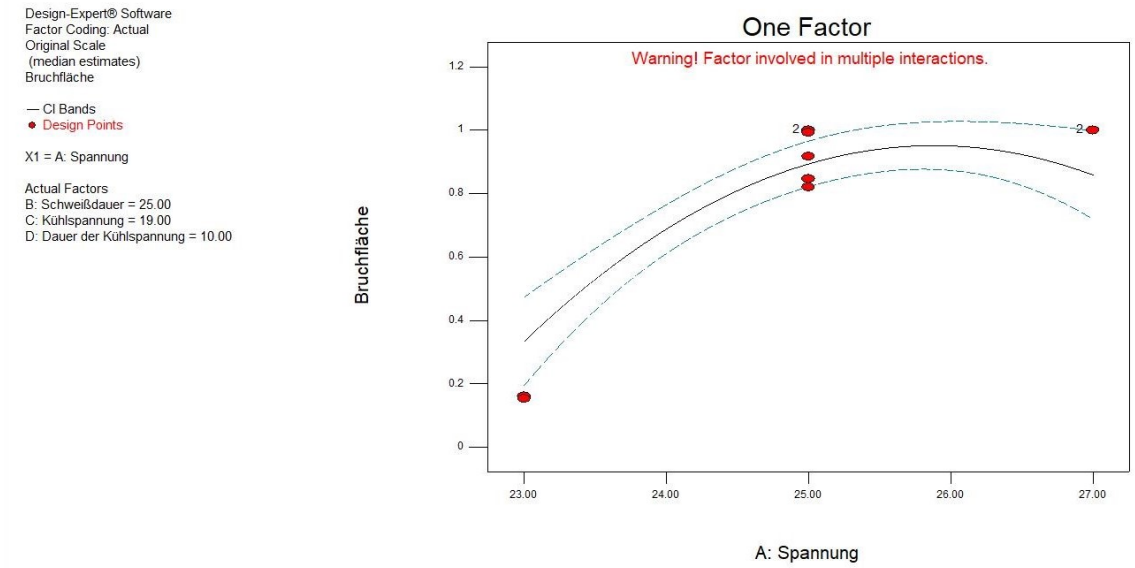


Abbildung 4.7: *Einfluss der Spannung auf die Bruchfläche bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Spannung in V wird von 23 V bis 27 V untersucht und durch ein quadratisches Modell beschrieben.*

der verschweißten Fläche zwischen 23 V und 25 V. Bei 27 V Spannung waren alle Proben 100 % verschweißt.

Der andere signifikante Einfluss auf die Bruchfläche, war die Kombination aus Kühlspannung und Dauer der Kühlspannung. In Abbildung 4.8 ist der Einfluss der Faktoren C-Kühlspannung und D-Kühldauer auf die Bruchfläche dargestellt. Die Spannung und

die Schweißdauer sind konstant bei 25 V bzw. 25 s. Hier sind allerdings die Daten wieder

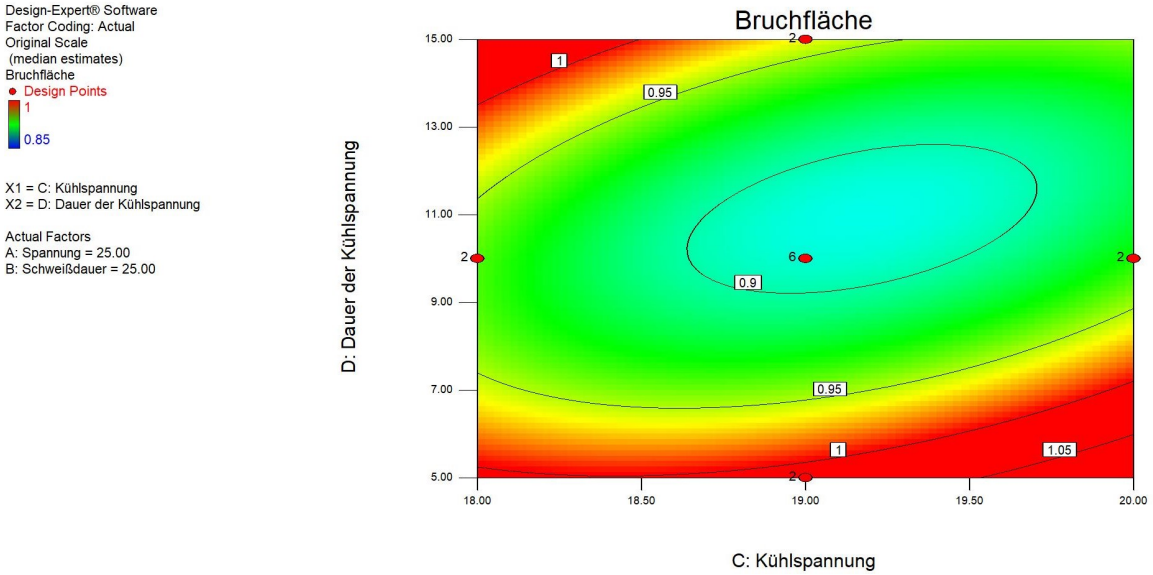


Abbildung 4.8: *Einfluss der Faktoren C-Kühlspannung und D-Kühldauer auf die Bruchfläche bei konstanter Schweißdauer von 25 s und Spannung von 25 V. Die Kühlspannung in V wird von 18 V bis 20 V, die Dauer der Kühlspannung in s von 5 s bis 15 s untersucht und durch ein quadratisches Modell beschrieben.*

zu hinterfragen, da sich ein ähnliches Problem wie bei der Bruchfläche ergibt. Die Werte können im realen Versuch nicht über 1, also eine vollständige Verschweißung hinausgehen. Ab diesem Wert wird das Modell also sehr ungenau. Eindeutige Aussagen können aus diesem Diagramm nicht getroffen werden, da sowohl eine hohe Kühlspannung mir niedriger Kühldauer, als auch eine niedrige Kühlspannung mit hoher Kühldauer aber nicht eine hohe Kühlspannung mit einer hohen Kühldauer, eine gute Verschweißung ergibt. Allgemein scheinen aber hohe Kühlspannungen und lange Kühlzeiten zu einer Steigerung der verschweißten Fläche beizutragen.

Bei der letzten Zielgröße, dem **Zieltemperaturniveau**, hat das verwendete lineare Modell zwei Faktoren als statistisch signifikant ausgegeben. Sowohl A-Spannung als auch B-Schweißdauer scheinen einen Einfluss auf die im Prozess erreichte Maximaltemperatur zu haben. Da es sich um ein lineares Modell handelt werden 2-Faktor-Interaktionen und quadratische Einflüsse nicht untersucht. Der Einfluss der Spannung auf die Zieltemperatur ist bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s in Abbildung 4.9 abgebildet. Deutlich zu erkennen ist der Anstieg der Temperatur mit steigender Spannung. Die Schweißdauer hat, wie auch schon am höheren Sequential p-value zu erkennen, einen kleineren aber trotzdem signifikanten Einfluss auf die

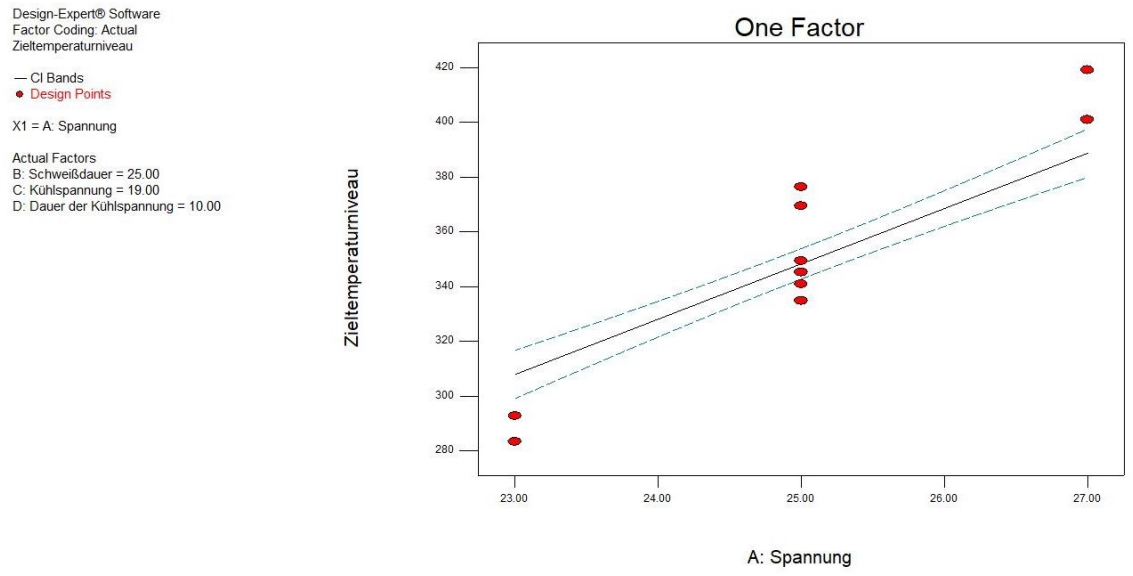


Abbildung 4.9: *Einfluss der Spannung auf die Zieltemperatur bei konstanter Schweißdauer von 25 s, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Spannung in V wird von 23 V bis 27 V untersucht und durch ein lineares Modell beschrieben.*

Zieltemperatur. Wie in Abbildung 4.10 zu sehen, steigt die Zieltemperatur bei längerer Schweißdauer an. Bedingt wird der geringere Anstieg bei längeren Schweißzeiten durch die in Unterabschnitt 3.2 beschriebene Plateaubildung der Temperatur im Prozess.

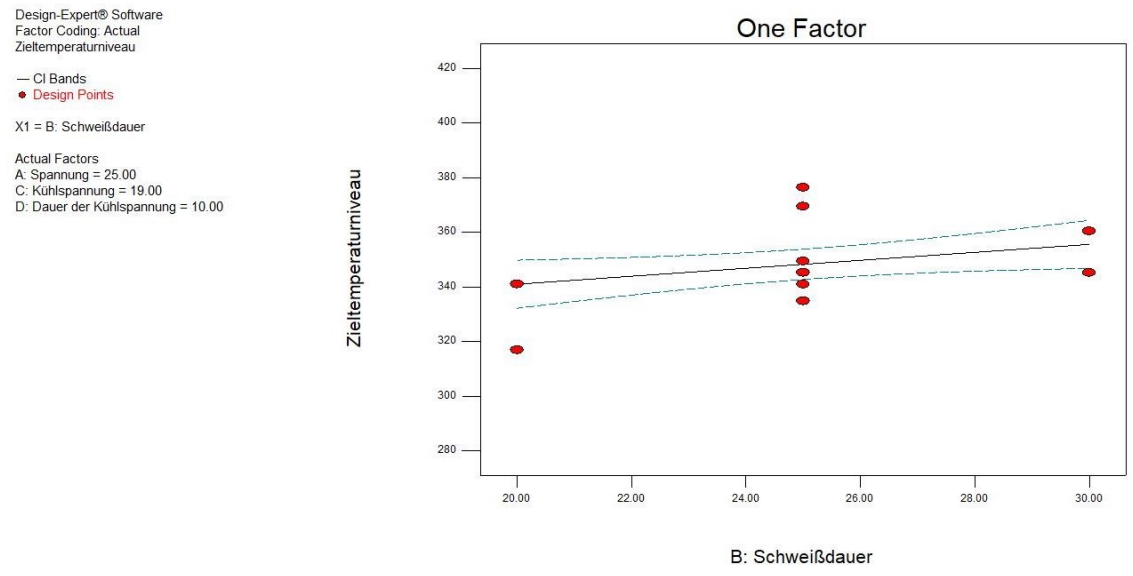


Abbildung 4.10: *Einfluss der Schweißdauer auf die Zieltemperatur bei konstanter Spannung von 25 V, Kühlspannung von 19 V und Kühldauer von 10 s. Die Schweißdauer in s wird von 20 s bis 30 s untersucht und durch ein lineares Modell beschrieben.*

Parameterkonfiguration

Zum Abschluss der statistischen Versuchsplanung kann man sich im „Optimization“ (engl. für Optimierung) genannten Bereich in Design Expert für beliebige Zielgrößen die entsprechenden Faktoren ausgeben lassen. Nach der statistischen Analyse kann durch das gewählte Modell für beliebige Kriterien die optimale Parameterkonfiguration vorhergesagt werden. In Design Expert stehen dafür neben der numerischen auch eine grafische Analyse zur Verfügung. Um die optimale Parameterkonfiguration zu finden, müssen im ersten Schritt die gewünschten Kriterien definiert werden. Für alle vier untersuchten Zielgrößen muss eine obere und eine untere Grenze gewählt werden.

Für die graphische Analyse wurde für die SLS-Festigkeit eine untere Grenze von 10 kN festgelegt. Die obere Grenze wurde auf den maximal gemessenen Wert von 16,83 kN gesetzt, da die Festigkeit nach oben nicht begrenzt werden soll. Die Versagensart sollte, um eine optimale Anbindung zu erhalten, auf 2 als untere Grenze gesetzt werden. Hierbei muss allerdings der bereits beschriebene Umstand berücksichtigt werden, dass durch das gewählte Modell bzw. die Skalierung, die Werte des R^2 nicht gut sind. Deswegen wird durch ein sehr großes Fenster von 1 als untere Grenze und 3 als obere, das Kriterium quasi aus der Bewertung genommen. Die dritte Zielgröße, die Bruchfläche, sollte aus den bereits genannten Gründen im Optimalfall 1 sein. Deswegen wurde die 1 als untere Grenze eingesetzt. Da aus statistischen Gründen im gewählten Modell auch Werte größer 1 errechnet werden können, wird die obere Grenze auf 2 gesetzt um nach oben keine Barriere zu schaffen. Die letzte Zielgröße, das Zieltemperaturniveau, wurde auf das Verarbeitungstemperaturfenster von LM-PAEK gesetzt, welches zwischen 340 °C und 380 °C liegt. Diese Werte wurden als obere und unter Grenze gewählt. Für die grafische Auswertung werden jetzt alle diese Kriterien in Bezug auf Spannung und Schweißdauer in einem Diagramm übereinandergelegt. Dadurch kann auf einen Blick erkannt werden, ob es eine Spannung/Schweißdauer-Parameterkombination gibt, die alle Kriterien erfüllt. In Abbildung 4.11 ist dieser sog. „Overlay Plot“ für die maximale Kühlspannung von 20 V und die maximale Kühldauer von 15 s abgebildet. Der gelbe Bereich markiert den „Gutbereich“, also den Bereich in dem alle Kriterien erfüllt werden. Der Gutbereich wird im wesentlichen nach unten von der gewählten Festigkeit von 10 kN und nach oben vom Zieltemperaturniveau von 380 °C begrenzt. Mit etwas Sicherheitsabstand zu den Rändern des

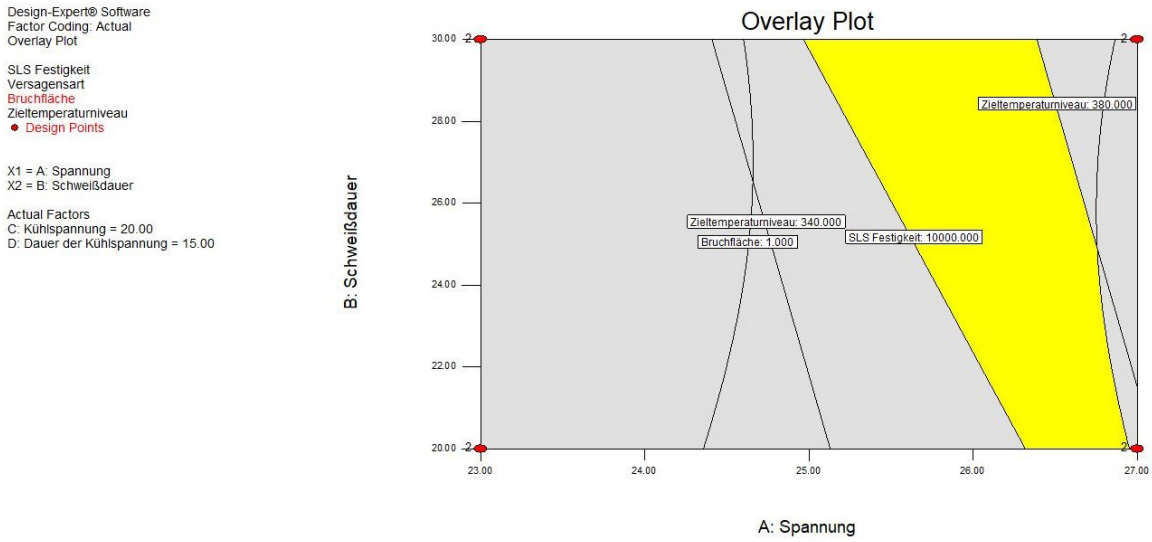


Abbildung 4.11: *„Overlay Plot“ für Spannung und Schweißdauer mit folgenden Kriterien: SLS-Festigkeit 10 kN bis 16,83 kN, Versagensart 1 bis 3, Bruchfläche 1 bis 2 und Zieltemperaturniveau von* 340 °C *bis* 380 °C.

Gutbereiches kann so eine optimale Parameterkonfiguration ermittelt werden. Bei einer Schweißung mit 26 V für 28 s, mit einer anschließenden Kühlspannung von 20 V für 15 s, können nach der grafischen Analyse alle Kriterien erfüllt werden.

In der ebenfalls möglichen numerischen Bestimmung der optimalen Parameterkonfiguration wird sehr ähnlich vorgegangen. Dort müssen ebenfalls die Grenzen der Zielgrößen eingegeben werden. Allerdings gibt es den Zusatz, dass sie gewichtet werden können und man das Ziel der Zielgröße auswählen kann. Zur Auswahl steht, ob sie nur in einem Bereich liegen muss, einen genauen Wert annehmen oder maximiert bzw. minimiert werden soll. Die Kriterien wurden aus der grafischen Analyse übernommen. Zusätzlich wurde als Ziel die SLS-Zugfestigkeit, sowie die Bruchfläche maximiert und die Temperatur auf den Verarbeitungsbereich beschränkt. Die Versagensart wurde ohne Ziel aus der Bewertung bzw. Analyse entfernt. Als Gewichtung wurde die SLS-Zugfestigkeit an erste Stelle gesetzt, gefolgt von maximaler Bruchfläche und Temperatur. Das Programm erzeugt automatisch ein „Overlay Plot“, in welchem es die optimale Parameterkonfiguration markiert. In Abbildung 4.12 ist der Overlayplot abgebildet. Das Programm errechnet als optimale Parameterkonfiguration eine Schweißung mit 26,39 V für 29,99 s mit anschließender Kühlspannung von 20 V für 14,99 s. Als Zielgrößen bei einer Schweißung mit diesen Werten sagt das Modell eine SLS-Festigkeit von 13030,44 N, eine Versagensart von 2,15, eine Bruchfläche von 1,08 sowie ein Zieltemperaturniveau von 380 °C voraus.

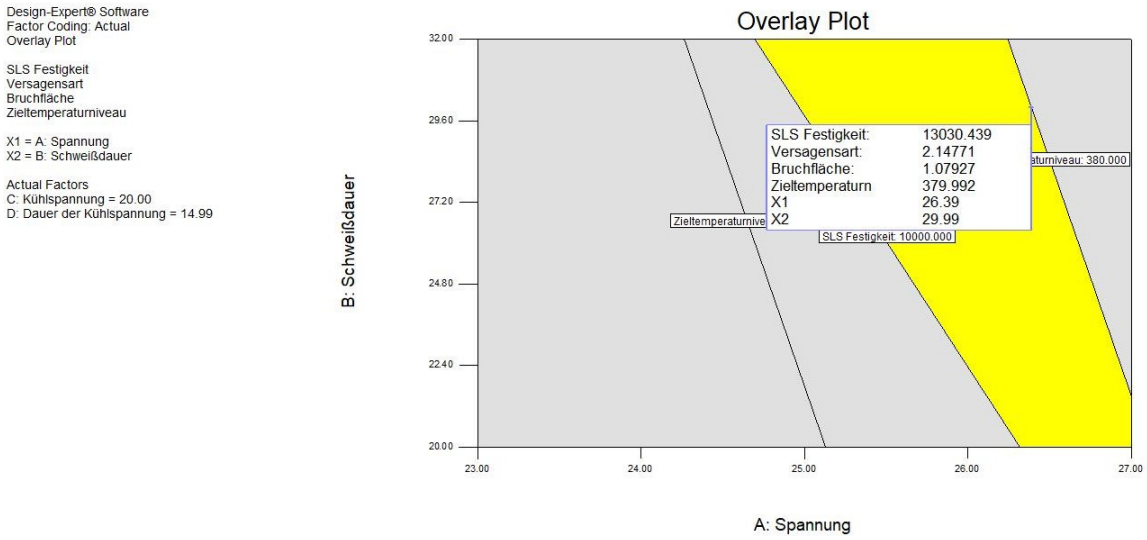


Abbildung 4.12: *„Overlay Plot“ für die numerische Berechnung der optimalen Parameterkonfiguration für Spannung und Schweißdauer mit folgenden Kriterien: SLS-Festigkeit 10 kN bis 16,83 kN, Bruchfläche 1 bis 2 und Zieltemperaturniveau von* 340 °C *bis* 380 °C.

Zusammenfassend kann man sagen, dass sich die numerische und grafische Lösung sehr ähneln, da sie auf dem gleichen Modell beruhen. In Tabelle 10 sind die Lösungen dargestellt. Insgesamt liegen die definierten optimalen Werte bei allen Faktoren am oberen

Tabelle 10: *Optimale Prozessparamterkonfiguration aus graphischer und numerischer DoE-Auswertung.*

Lösung	Spannung	Schweißdauer	Kühlspannung	Kühldauer
graphisch	26 V	28 s	20 V	15 s
numerisch	26,39 V	29,99 s	20 V	14,99 s

Rand des untersuchten Parameterbereichs. Für weitere Untersuchungen bzw. die nächste statistische Versuchsplanung würde man deswegen die obere Grenze der Faktoren, bei denen es möglich ist, höher ansetzen. Außerdem wäre ein größerer Parameterbereich für Kühlspannung und -dauer besser, um stärkere Effekte erkennen zu können. Die erreichten Festigkeitswerte waren zwar insgesamt höher als bei den anderen Vorversuchen, allerdings konnte kein Unterschied zwischen den verschiedenen Kühlspannungen und Kühldauern festgestellt werden. Deswegen sollten zusätzlich Schweißungen ohne veränderte Abkühlphase integriert werden und das Parameterfenster vergrößern, um den Einfluss besser zu verstehen. Außerdem sollte für Versagensart und Bruchfläche eine Beschreibung auf eine metrischen Skala entwickelt werden oder die Zielgrößen ersetzt werden, um die Model-

le aussagekräftiger werden zu lassen. Trotzdem war die durchgeführte Versuchsreihe ein großer Erkenntnisgewinn und zumindest für Spannung und Schweißdauer sowie allgemein für die Abkühlphase konnten gute Aussagen über ihren Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit und Maximaltemperatur getroffen werden.

Validierung der Parameterkonfiguration

Sehr wichtig für jede statistische Versuchsplanung ist die Validierung der Modelle. Dafür wird nach Abschluss der Auswertung entweder nur die optimale oder einige im Versuchsraum verteilte Parameterkonfiguration ein oder mehrmals getestet. Der Bereich sollte so ausgewählt werden, dass er den für das Projekt interessanten Bereich abdeckt. Die Ergebnisse werden erneut mit den durch das Modell Vorhergesagten verglichen und so die Aussagekraft noch einmal gesteigert. Erst wenn die Ergebnisse der Validierungsversuche auch mit den Vorhersagen übereinstimmen, kann man davon ausgehen, dass das entwickelte DoE genaue Werte für den untersuchten Prozess vorhersagen kann. Die Ergebnisse der durchgeführten Validierungsversuche sollten dabei zu mindestens 95 % den Vorhergesagten entsprechen.
Leider konnten aus zeitlichen Gründen die Validierungsversuche für dieses DoE nicht mehr durchgeführt werden. Die Versuche werden aber noch im Rahmen des Projektes MFFD durchgeführt, um für die endgültige Fertigung der Demonstratorhalbschale validierte Prozessparameter zu Verfügung zu haben.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Das elektrische Widerstandsschweißen ist eine Schlüsseltechnologie zur Steigerung der Anwendung thermoplastischer Bauteile in der Luftfahrt. Die staubfreie Fügung zweier Bauteile mit reduzierter Einzelteilkomplexität zu einem quasi-integralen Gesamtverbund ohne durchtrennen der Verstärkungsfasern ist ein starkes Argument für den Einsatz von Hochleistungsthermoplasten. Der Prozess sowie seine Ergebnisse sind maßgeblich durch die Prozessparameter wie Schweißspannung und -dauer sowie die Prozessführung bestimmt. Die vorliegende Arbeit liefert einen Beitrag zur Weiterentwicklung der elektrischen Widerstandsschweißtechnologie für carbonfaserverstärktes LM-PAEK mit dem Fokus auf der Anwendung an einem Rumpfhalbschalendemonstrator im Projekt MFFD.
Im ersten Teil der Arbeit wurden grundlegende Untersuchungen zur Verbesserung des Widerstandsschweißprozesses durchgeführt:
In einer ersten Versuchsreihe wurde der Einfluss des Werkstoffes der Isolationslage auf die Zugfestigkeit und das Bruchverhalten untersucht. Dafür wurden Schweißungen mit zwei verschiedenen Isolationslagen durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass eine Schweißung mit einer Isolationslage aus reinem Matrixmaterial höhere Festigkeitswerte erreicht als die bisher verwendete Isolation aus Glasfaser. In der anschließend am Mikroskop durchgeführten Bruchflächenanalyse konnte eine leichte Steigerung des Substratversagens bei den Schweißungen mit Matrixisolation beobachtet werden. Hauptbruchart war bei beiden Isolationen der Bruch durch die Isolationslage, allerdings stieg der Anteil der kaltverschweißten Fläche bei den Schweißungen mit Matrixisolation und das kohäsive Versagen im Schweißleiter sank entsprechend. Das deutet auf eine zu kurze Prozesszeit hin. Aufgrund der hohen Durchlaufzeiten der Zugprüfung wurde in den folgenden Versuchen hauptsächlich mit der standardmäßigen Schweißelementkonfiguration auf Basis einer Glasisolationslage geschweißt. In Zukunft sollte diese aber aufgrund der höheren Festigkeitswerte durch eine Matrixisolation ersetzt werden.

In weiteren Versuchsreihen wurde der Einfluss der Schweißspannung im Prozess untersucht. Begonnen wurde mit Versuchen zum Einfluss der Schweißspannung auf den Übergangswiderstand des Schweißleiters. In den Versuchen konnte der zuvor schon in anderen Arbeiten beschriebene Einfluss validiert werden: Mit steigendem Spannungsniveau sinkt

der Übergangswiderstand. An welchem Teil des Schweißleiters die Widerstandssenkung stattfindet, konnte nicht abschließend geklärt werden.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde der Einfluss einer thermischen Historie des Schweißleiters auf seinen Widerstand untersucht. Dafür wurden die Widerstände und die im Prozess erreichten Temperaturen von mehrfach aufgeheizten Schweißleitern mit denen von einmalig verwendeten verglichen. In zwei durchgeführten Versuchen konnte keine klare Abhängigkeit festgestellt werden. Hier sind wesentlich mehr Versuche mit Schweißleitern nötig, welche einen homogenen Übergangswiderstand besitzen.

Ein weiterer Teil der Untersuchungen war eine Variation im Abkühlprozess und sein Einfluss auf die Schweißung. Durch die im konventionellen Prozess übliche, sehr schnelle Abkühlung nach Abschalten der Schweißspannung, ist eine Nachkristallisation nur bedingt möglich. Beim elektrischen Widerstandsschweißen ist es möglich, durch eine nachgeschaltete, reduzierte Schweißspannung die Abkühlung zu verlangsamen, was die Kristallbildung begünstigt. Ziel war es, die Festigkeit und den Kristallisationsgrad durch die langsamere Abkühlung zu steigern. Dafür wurde in ersten Versuchen ein geeignetes Spannungsniveau identifiziert, womit die Temperatur über der Kristallisationstemperatur gehalten werden konnte. Zusammen mit einer aus der DSC-Messung entnommenen Kühldauer, wurde so das Parameterfenster für die Kühlphase bestimmt. Anschließend wurde ausgewertet, wie sich die verzögerte Abkühlung auf die Zeit über der Kristallisationstemperatur und anhand von REM-Aufnahmen, auf die Sphärolitbildung auswirkt. Die Abkühlphase verlängerte sich merklich und auch die Festigkeit stieg an. Aus den REM-Aufnahmen konnten, wegen Problemen in der Präparation, noch keine eindeutigen Schlüsse gezogen werden.

Abschließend wurden die Auswirkungen eines initialen Spannungsimpulses auf den Schweißleiterwiderstand untersucht. Der initiale Spannungsimpuls soll dazu dienen, Fremdschichten in der Kontaktzone zu durchschlagen und die Matrix lokal zu carbonisieren und somit elektrisch leitfähig zu machen, um die Kontaktierung zu verbessern. Die Versuche wurden zum einen mit der konventionellen Edelstahlgewebe-Kontaktierung und zum anderen mit einer neuen Kontaktierung durchgeführt. Bei der neuen Kontaktierung wurde durch eine Ultraschallsonotrode die Matrix an den Kontaktflächen entfernt, um die Fasern freizulegen und direkt kontaktieren zu können. Bei beiden Versuchsreihen konnte eine deutliche

Senkung des Schweißleiterwiderstandes beobachtet werden. Außerdem sank die Standardabweichung, also die Streubreite zwischen den Versuchen erheblich. Vor allem bei der neuartigen Kontaktierungsvariante konnte eine bemerkenswerte Senkung beobachtet werden. Wegen seiner ausschließlich positiven Auswirkungen wird der vorgeschaltete Spannungsimpuls zukünftig dauerhaft in den Prozess integriert.

Im nächsten Abschnitt wurden zwei Variationen in der Prozessführung untersucht. Zum einen eine gepulste Prozessführung zur besseren Wärmeverteilung in der Fügezone und zum anderen eine zweistufige Druckaufbringung und ihre Auswirkungen auf Verbindungsfestigkeit und Prozesssicherheit. Bei der gepulsten Prozessführung wurde der kontinuierliche Schweißspannungsverlauf durch Intervalle mit kurzen Pausen dazwischen ersetzt. Durch die in den Pausen stattfindende Wärmeverteilung, konnte über der Fügezone eine homogenere Durchschnitts- und Maximaltemperatur realisiert werden. Die zweistufige Druckaufbringung sollte ein Ausquetschen des Schweißleiters verhindern und somit die Prozesssicherheit erhöhen. In den durchgeführten Versuchsreihen konnte der Quetschfluss fast komplett unterbunden werden. Die dadurch mögliche höhere Prozesssicherheit geht allerdings auf Kosten der Zugfestigkeit. Durch die konstruktiv bedingte Kopplung von Schweiß- und Kontaktierungsdruck steigt hier der Übergangswiderstand stark an. Das führt zu einer sehr stark verkürzten Aufheizphase sowie zu hohen Temperaturen im Prozess.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit wurde auf Grundlage der beschriebenen Vorversuche eine statistische Versuchsplanung durchgeführt, um die optimale Prozessparamterkonfiguration für die Rumpfdemonstratorhalbschalenfertigung zu finden. Dafür wurden für die vier Prozessparameter Schweißspannung, Schweißdauer, Kühlspannung und Kühldauer Prozessfenster definiert, welche im DoE untersucht wurden. Die Auswertung wurde hinsichtlich von vier Zielgrößen durchgeführt; die SLS-Zugfestigeit, die Versagensart, die Bruchfläche und die maximale Prozesstemperatur. In der folgenden statistischen Analyse, konnten die statistisch signifikanten Einflussfaktoren auf jede Zielgröße bestimmt und ihre Auswirkungen untersucht werden. Am Ende konnten so auf dieser Datengrundlage für die gewünschten Zielgrößen optimierte Prozessparameter für das elektrische Widerstandsschweißen der Rumpfdemonstratorhalbschale definiert werden.

Nächste mögliche Schritte zu einem noch besseren Verständnis des elektrischen Widerstandsschweißens und mit Hinblick auf den industriellen Einsatz sind:

- Entwicklung einer automatisierten Schweißleiterherstellung für verschiedene Schweißleitergeometrien, zur Homogenisierung der Schweißleiterwiderstände.
- Untersuchungen zur Spannungsabhängigkeit des Schweißleiters. Versuche mit verschiedenen Kontaktierungen und Schweißleitergeometrien zur Verortung der Spannungsabhängigkeit.
- Untersuchungen zur Abkühlphase, insbesondere ihre Auswirkungen auf die Festigkeit sowie der Kristallinität durch Entwicklung eines günstigen Ätzverfahrens für LM-PAEK.
- Untersuchungen zum Spannungsimpuls mit Variierung der Impulshöhe und -dauer und deren Auswirkung auf Prozesssicherheit und Homogenisierung des Schweißleiterwiderstandes.
- Untersuchungen zur gepulsten Prozessführung mit Variierung der Impulshöhe, Impulsdauer sowie der Pausenlänge und deren Auswirkung auf Prozesssicherheit und Temperaturverteilung.
- Untersuchungen zur zweistufigen Druckaufbringung mit Variierung der Druckniveaus und des Umschaltzeitpunktes und deren Auswirkung auf Prozesssicherheit und Verbundfestigkeit. Installation von getrennten Pneumatikkreisläufen für Schweiß- und Kontaktierungsdruck.
- Eine statistische Versuchsplanung zum Widerstandsschweißprozess mit verbesserten Zielgrößen oder
- Erstellen einer Datenbank mit allen durchgeführten Versuchen, ihren Parametern, Fügegeometrien und Ergebnissen. Programmierung eines Algorithmus zur automatisierten Datenerhebung aus den Prozessdaten und Nutzung der Datenbank als Grundlage bzw. Ersatz für statistische Versuchsplanungen.

Literatur

[1] Manuel Endraß et al. „UPSCALING RESISTANCE WELDING-JOINING OF-CARBON FIBER COMPOSITES FOR FULL-SCALE AEROSPACE COMPONENTS. SAMPE Europe Conference 2019 Nantes“. Englisch. In: (2019).

[2] Marcos Arias. „Experimentelle Untersuchung des kontinuierlichen und gepulsten Widerstandsschweissen als Fügeverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen mit thermoplastischer Matrix“. Diss. Eidgenössische technische Hochschule Zürich, 1998.

[3] Jérémie Audoit u. a. „Thermal, mechanical and dielectric behaviour of poly(aryl ether ketone) with low melting temperature“. In: *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 135.4 (Apr. 2018), S. 2147–2157. DOI: 10.1007/s10973-018-7292-x.

[4] Hans-Jürgen Bargel und Günter Schulze. „Werkstoffprüfung“. In: *Werkstoffkunde*. Springer Berlin Heidelberg, 2008, S. 97–142. DOI: 10.1007/978-3-540-79297-0_3.

[5] Martin Bonnet. *Kunststoffe in der Ingenieuranwendung: Verstehen und zuverlässig Auswählen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2009. ISBN: 9783834803498.

[6] Hans Domininghaus. *Kunststoffe*. Hrsg. von Thomas Hirth Peter Elsner Peter Eyerer. Springer-Verlag GmbH, 24. Jan. 2012. ISBN: 3642161723. URL: https://www.ebook.de/de/product/13240029/domininghaus_kunststoffe.html.

[7] Manuel Endrass. „Pneumatikschaltpläne Versuchsstand Widerstandsschweißtechnologie“. In: *interne Dokumente, nicht öffentlich* (2021).

[8] Stuart Green. „VICTREX AE™ 250 – A NOVEL POLYARYLETHERKETONE POLYMER SUITED TO AUTOMATED TAPE PLACEMENT AND OUT OF AUTOCLAVE PROCESSING“. In: (2019).

[9] Sabine Grellmann Wolfgang; Seidler. *Kunststoffprüfung*. Hanser Fachbuchverlag, Mai 2015. 760 S. ISBN: 3446443509. URL: https://www.ebook.de/de/product/23285109/wolfgang_grellmann_sabine_seidler_kunststoffpruefung.html.

[10] Frank Henning und Elvira Moeller. *Handbuch Leichtbau*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, Apr. 2020. DOI: 10.3139/9783446459847.

[11] Karl Siebertz, David van Bebber und Thomas Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung*. Springer Berlin Heidelberg, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-55743-3.

[12] Manuel Endraß Stefan Jarka. „Towards increased reliability of resistance welded joints for aircraft assembly“. In: *International Conference and Exhibition on Thermoplastic Composites (ITHEC), Messe Bremen* (2020).

[13] Simon Thissen. „Entwicklung, Aufbau und Validierungeines Endeffektors zum kontinuierlichen Widerstandsschweißen faserverstärkter Hochleistungsthermoplaste“. Magisterarb.

[14] Anton Thomé. „Schweißtechnologien für faserverstärkte Hochleistungsthermoplaste in der Luftfahrt und deren Anwendung“. In: *Praktikumsarbeit am ZLP* (2021).

[15] *Victrex AE 250 Technical Paper CAMX 2018*. 2018. URL: https://www.victrex.com/~/media/whitepapers/victrex-ae-250---technical-paper-camx-2018.pdf.

[16] Lorenz Ziche. „Untersuchung und Validierung von Methoden zur ortsaufgelösten Temperaturbestimmung innerhalb einer Schweißnaht beim elektrischen Widerstandsschweißen“. HTWK Leipzig, 2020.

Anhang

Datenblatt Toray Cetex® TC1225 i ... vi

Versuchsplan des Design of Experiments vii ... viii

Druckschaltplan ix

A. Datenblatt Toray Cetex® TC1225

Toray Cetex® TC1225
LMPAEK

TORAY
Toray Advanced Composites

PRODUCT DATA SHEET

DESCRIPTION

Toray Cetex® TC1225 is a high-end thermoplastic composite material, utilizing a semi-crystalline low-melt PAEK resin for excellent mechanical performance. The distinctive value of Toray Cetex® TC1225 over other composites with a PAEK family matrix is its superior processability due to a low-melt viscosity and reduction in processing temperature of up to 60°C (140°F)*. Toray Cetex® TC1225 doesn't only yield a high-quality product used in ATL/AFP processes, it also speeds up cycle times enabling cost-efficient production in all available formats.

Additionally, Toray Cetex® TC1225 is an ideal composite to be overmolded with neat or short fiber reinforced PEEK resin, creating a very strong bond. Overmolding, integrating continuous fiber reinforced composites in an injection molding process, combines the strength of high-end composites with the design freedom and complexity of injection molding parts.

Toray Cetex® TC1225 is available as a UD tape, a fabric prepreg, and as reinforced thermoplastic laminates (RTLs) of varying thicknesses. RTLs can be equipped with lightning strike protection, and carbon reinforced RTLs can be supplied with a thin glass top layer to protect a partly metallic assembly against galvanic corrosion. Glass scrim is also applicable in structures made from UD tape.

*Standard PEEK processes at temperatures up to 400°C (752°F)

FEATURES

- **Superior processability as a result of low-melt viscosity and relatively low processing temperature**
- **Form freedom—suited for overmolding with neat or short fiber reinforced PEEK**
- **Relatively low processing temperature enables shorter cycle times and less energy consumption**
- **Excellent mechanical performance, also at elevated temperatures**
- **Excellent toughness—demonstrated by high compression after impact strengths and fracture toughness values**
- **Very low moisture absorption (high hot/wet property retention)**
- **Outstanding chemical and solvent resistance**
- **Indefinite shelf life at ambient temperature storage**
- **Excellent FST performance**

PRODUCT TYPE

LMPAEK (Low-Melt PolyArylEtherKetone) Thermoplastic Resin System

TYPICAL APPLICATIONS

- Primary and secondary aircraft structures
- High-load aircraft interiors applications
- Access panels, rib stiffeners, brackets
- Radome
- Medical
- Oil and gas

TYPICAL NEAT RESIN PROPERTIES

Density (specific gravity)	1.30 g/cm³ (81.2 lb/ft³)
T_g (glass transition)	147°C (297°F)
T_m (melt)	305°C (581°F)
T_c (crystallinity)	263°C (505°F)
T_p (processing)	340–385°C (644–725°F)

SHELF LIFE

Out Life:	Indefinite at ambient temperature storage
Frozen Storage Life:	Not applicable—product does not require freezing

Contact us for more information:
North America/Asia/Pacific
e explore@toraytac-usa.com
t +1 408 465 8500

Europe/Middle East/Africa
e explore@toraytac-europe.com
t +31 (0) 548 633 933

Cetex®

Toray Cetex® TC1225
LMPAEK

TORAY
Toray Advanced Composites

PRODUCT DATA SHEET

PHYSICAL PROPERTIES—CARBON

Property	Standard Modulus Carbon UD Tape	5 Harness Satin (T300JB Carbon Woven Prepreg)
Fiber areal weight (FAW)	145 g/m² (4.28 oz/yd²)	281 g/m² (8.29 oz/yd²)
Weight per ply (PAW)	221 g/m² (6.52 oz/yd²)	489 g/m² (14.42 oz/yd²)
Resin content by weight (RC)	34%	43%
Consolidated ply thickness (CPT)	0.14 mm (0.0054 in.)	0.31 mm (0.0122 in.)
Density	1.59 g/cm³ (99.3 lb/ft³)	1.53 g/cm³ (95.51 lb/ft³)

These reinforcements are available as rolls of semi-preg or as RTLs. Lightning-strike protection layers can be incorporated into RTLs. A glass scrim can also be added to the surface of carbon fiber based laminates. This glass scrim is often used to protect against galvanic corrosion in assemblies where carbon fiber composites are in contact with metal components.

PHYSICAL PROPERTIES—GLASS (STRUCTURAL USE)

Property	US Style 7781 8 Harness Satin (EC6 Glass Woven Prepreg)	US Style 6781 8 Harness Satin (S2 C9 Glass Woven Prepreg)
Fiber areal weight (FAW)	296 g/m² (8.73 oz/yd²)	298 g/m² (8.79 oz/yd²)
Weight per ply (PAW)	448 g/m² (13.21 oz/yd²)	452 g/m² (13.33 oz/yd²)
Resin content by weight (RC)	34%	34%
Consolidated ply thickness (CPT)	0.24 mm (0.009 in.)	0.24 mm (0.009 in.)
Density	1.92 g/cm³ (119.8 lbs/ft³)	1.87 g/cm³ (116.7 lbs/ft³)

The reinforcements above are available as rolls of semi-preg or as RTLs. RTLs can consist of glass plies only or can incorporate UD carbon tapes or woven carbon tapes as required.

PHYSICAL PROPERTIES—GLASS SCRIM

Property	US Style 0120 4 Harness Satin (EC5 Glass Woven Prepreg)	US Style 1080 Plain Weave (EC5 Glass Woven Prepreg)
Fiber areal weight (FAW)	105 g/m² (3.10 oz/yd²)	48 g/m² (1.42 oz/yd²)
Weight per ply (PAW)	210 g/m² (6.19 oz/yd²)	120 g/m² (3.54 oz/yd²)
Resin content by weight (RC)	50%	60%
Consolidated ply thickness (CPT)	0.12 mm (0.005 in.)	0.08 mm (0.003 in.)
Density	1.71 g/cm³ (106.8 lbs/ft³)	1.61 g/cm³ (100.5 lbs/ft³)

The reinforcements above are available as rolls of semi-preg or can be added to the surface of RTLs of carbon UD tape or carbon woven fabric to act as a barrier to prevent galvanic corrosion.

Toray Cetex® TC1225
LMPAEK

TORAY
Toray Advanced Composites

PRODUCT DATA SHEET

MECHANICAL PROPERTIES

Standard Modulus Carbon 145gsm UD Tape 34% RC				
Property	Condition	Test Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	2410 MPa	350 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	135 GPa	19.5 Msi
Tensile Strength 90°	RTD	ASTM D 3039	86 MPa	12.5 ksi
Tensile Modulus 90°	RTD	ASTM D 3039	10 GPa	1.4 Msi
Compression Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	1300 MPa	189 ksi
Compression Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	124 GPa	18 Msi
In-Plane Shear Strength	RTD	ASTM D 3518	152 MPa	22 ksi
In-Plane Shear Strength 2% Offset	RTD	ASTM D 3518	42.0 MPa	6.1 ksi
In-Plane Shear Modulus	RTD	ASTM D 3518	4.3 GPa	0.62 Msi
Flexural Strength 90°	RTD	ASTM D 790	152 MPa	22 ksi
Interlaminar Shear Strength (SBS) 0°/90°	RTD	ASTM D 2344	96.5 MPa	14 ksi
Open-Hole Tensile Strength	RTD	ASTM D 5766	448 MPa	65 ksi
Open-Hole Tensile Strength	CTD	ASTM D 5766	448 MPa	65 ksi
Open-Hole Compression Strength	RTD	ASTM D 6484	310 MPa	45 ksi
Open-Hole Compression Strength	ETD	ASTM D 6484	262 MPa	38 ksi
Compression After Impact Strength 30.5 J (270 in/lb) Impact Energy	RTD	ASTM D 7137	310 MPa	45 ksi
Mode I Interlaminar Fracture Toughness (G_{Ic} Strain Energy Release Rate)	RTD	ASTM D 5528	2.1 kJ/m²	12.0 in-lb/in²
Mode II Interlaminar Fracture Toughness (G_{IIC} Strain Energy Release Rate)	RTD	ASTM D 7905	2.6 kJ/m²	15.0 in-lb/in²

Room Temperature Dry (RTD)
Cold Temperature Dry (CTD) is -54°C (-65°F)
Elevated Temperature Dry (ETD) is 121°C (250°F)

Toray Cetex® TC1225
LMPAEK

TORAY
Toray Advanced Composites

PRODUCT DATA SHEET

Intermediate Modulus Carbon 145gsm FAW UD Tape Laminate 34% RC				
Property	Condition	Test Method	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	ASTM D 3039	3100 MPa	450 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	ASTM D 3039	159 GPa	23 Msi
Tensile Strength 90°	RTD	ASTM D3039	86 MPa	12.5 ksi
Tensile Modulus 90°	RTD	ASTM D 3039	10 GPa	1.5 Msi
Compressive Strength 0°	RTD	ASTM D 6641	1300 MPa	189 ksi
Compressive Modulus 0°	RTD	ASTM D 6641	138 GPa	20 ksi
Flexural Strength 90°	RTD	ASTM D 7264	162 MPa	23.5 ksi
Interlaminar Shear Strength (SBS) 0°/ 90°	RTD	ASTM D 2344	96.5 MPa	14 ksi
Open-Hole Tensile Strength	RTD	ASTM D 5766	655 MPa	95 ksi
Open-Hole Compressive Strength	RTD	ASTM D 6484	303 MPa	44 ksi
Compression After Impact Strength 30.5 J (270 in/lb) Impact Energy	RTD	ASTM D 7137	338 MPa	49 ksi
Room Temperature Dry (RTD)				

Toray Cetex® TC1225
LMPAEK

TORAY
Toray Advanced Composites

PRODUCT DATA SHEET

High Strength T300JB 3K Carbon 280gsm 5HS Woven Fabric Reinforced Laminate 42% RC				
Property	Condition	Methods	Results	
Tensile Strength 0°	RTD	EN 2597B	805 MPa	117 ksi
Tensile Modulus 0°	RTD	EN 2597B	58.0 GPa	8.4 Msi
Tensile Strength 90°	RTD	EN 2597B	739 MPa	107 ksi
Tensile Modulus 90°	RTD	EN 2597B	59.0 GPa	8.6 Msi
In-Plane Shear Strength	RTD	AITM 1.0002	159 MPa	23 ksi
In-Plane Shear Modulus	RTD	AITM 1.0002	3.90 GPa	0.57 Msi
Compression Strength 0°	RTD	ASTM D6641	628 MPa	91 ksi
Compression Modulus 0°	RTD	ASTM D6641	52.0 GPa	7.5 Msi
Compression Strength 90°	RTD	ASTM D6641	676 MPa	98 ksi
Compression Modulus 90°	RTD	ASTM D6641	53 GPa	7.7 Msi
Flexural Strength 0°	RTD	EN 2562A	1100 MPa	160 ksi
Flexural Modulus 0°	RTD	EN 2562A	61 GPa	9 Msi
Flexural Strength 90°	RTD	EN 2562A	874 MPa	127 ksi
Flexural Modulus 90°	RTD	EN 2562A	48 GPa	7 Msi
Open-Hole Compressive Strength	RTD	AITM 1.0008	291 MPa	42 ksi
Compression After Impact Strength 30 J (266 in/lb) Impact Energy	RTD	ASTM D7137-12	314 MPa	45.6 ksi
Mode I Interlaminar Fracture Toughness (G_{IC} Strain Energy Release Rate)	RTD	ASTM D5528	2249 J/m²	12.8 in-lb/in²

Room Temperature Dry (RTD) is 21°C (69.8°F)
50% fiber by volume (Vf)
The mechanical data provided are average values from a limited dataset. For additional data please contact Toray Advanced Composites.

HEALTH & SAFETY

Health and safety information on handling and processing Toray composite materials is described in the Safety Data Sheet available from Toray Advanced Composites. To obtain this or any other information about Toray Cetex® PAEK thermoplastic composite materials, contact Toray Advanced Composites.

© 2019–2020 Toray Advanced Composites. All data given is based on representative samples of the materials in question. Since the method and circumstances under which these materials are processed and tested are key to their performance, and Toray Advanced Composites has no assurance of how its customers will use the material, the corporation cannot guarantee these properties. Toray®, (Toray) AmberTool®, (Toray) Cetex®, (Toray) MicroPly™, and all other related characters, logos, and trade names are claims and/or registered trademarks of Toray Industries Inc. and/or its subsidiary companies in one or more countries. Use of trademarks, trade names, and other IP rights of Toray Industries Inc. without prior written approval by such is strictly prohibited.

TORAY Toray Advanced Composites

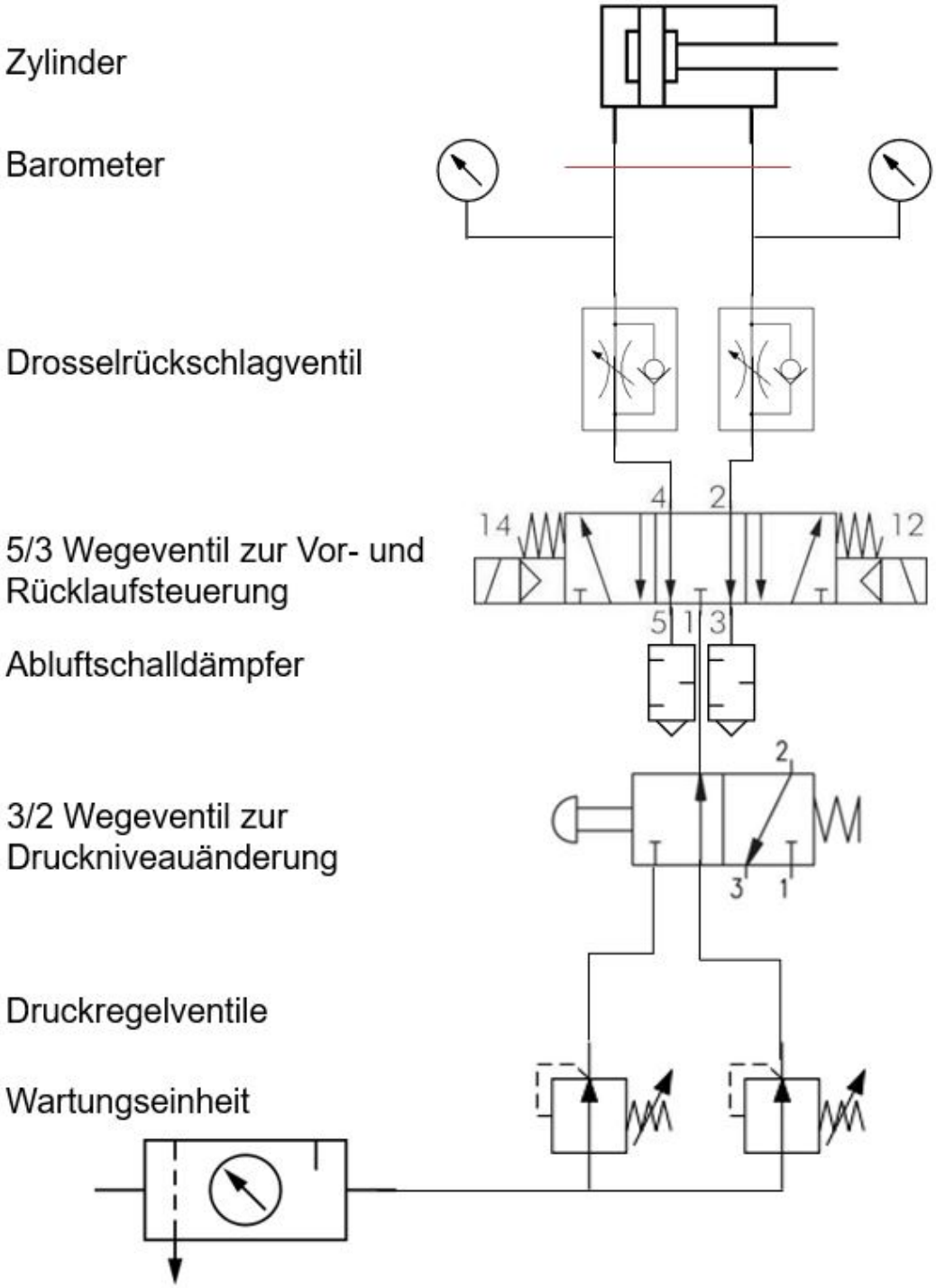
18255 Sutter Blvd.
Morgan Hill, CA 95037, USA
t +1 408 465 8500

G. van der Muelenweg 2
7443 RE Nijverdal, The Netherlands
t +31 (0) 548 633 933

Cetex®
www.toraytac.com
explore@toraytac-usa.com (North America/Asia/Pacific)
explore@toraytac-europe.com (Europe/Middle East/Africa)

B. Versuchsplan des Design of Experiments

	Std	Run	Factor 1 A:Spannung V	Factor 2 B:Schweißd... s	Factor 3 C:Kühlspan... V	Factor 4 D:Dauer der... s	Response 1 SLS Fetsigkeit MPa	Response 2 Versagensart Schicht	Response 3 Bruchfläche mm^2	Response 4 Zieltemperat... °C
	19	1	27.00	20.00	18.00	15.00				
	39	2	25.00	30.00	19.00	10.00				
	1	3	23.00	20.00	18.00	5.00				
	47	4	25.00	25.00	19.00	15.00				
	35	5	27.00	25.00	19.00	10.00				
	9	6	23.00	20.00	20.00	5.00				
	13	7	23.00	30.00	20.00	5.00				
	23	8	27.00	30.00	18.00	15.00				
	2	9	23.00	20.00	18.00	5.00				
	50	10	25.00	25.00	19.00	10.00				
	11	11	27.00	20.00	20.00	5.00				
	34	12	23.00	25.00	19.00	10.00				
	52	13	25.00	25.00	19.00	10.00				
	24	14	27.00	30.00	18.00	15.00				
	31	15	27.00	30.00	20.00	15.00				
	8	16	27.00	30.00	18.00	5.00				
	5	17	23.00	30.00	18.00	5.00				
	28	18	27.00	20.00	20.00	15.00				
	14	19	23.00	30.00	20.00	5.00				
	30	20	23.00	30.00	20.00	15.00				
	49	21	25.00	25.00	19.00	10.00				
	3	22	27.00	20.00	18.00	5.00				
	33	23	23.00	25.00	19.00	10.00				
	54	24	25.00	25.00	19.00	10.00				
	36	25	27.00	25.00	19.00	10.00				
	15	26	27.00	30.00	20.00	5.00				
	10	27	23.00	20.00	20.00	5.00				
	40	28	25.00	30.00	19.00	10.00				
	51	29	25.00	25.00	19.00	10.00				
	18	30	23.00	20.00	18.00	15.00				
	42	31	25.00	25.00	18.00	10.00				
	32	32	27.00	30.00	20.00	15.00				
	27	33	27.00	20.00	20.00	15.00				
	6	34	23.00	30.00	18.00	5.00				
	43	35	25.00	25.00	20.00	10.00				
	48	36	25.00	25.00	19.00	15.00				
	29	37	23.00	30.00	20.00	15.00				
	26	38	23.00	20.00	20.00	15.00				
	41	39	25.00	25.00	18.00	10.00				
	20	40	27.00	20.00	18.00	15.00				
	38	41	25.00	20.00	19.00	10.00				
	25	42	23.00	20.00	20.00	15.00				
	44	43	25.00	25.00	20.00	10.00				
	46	44	25.00	25.00	19.00	5.00				

	Std	Run	Factor 1 A:Spannung V	Factor 2 B:Schweißd... s	Factor 3 C:Kühlspan... V	Factor 4 D:Dauer der... s	Response 1 SLS Fetsigkeit MPa	Response 2 Versagensart Schicht	Response 3 Bruchfläche mm^2	Response 4 Zieltemperat... °C
	53	45	25.00	25.00	19.00	10.00				
	22	46	23.00	30.00	18.00	15.00				
	16	47	27.00	30.00	20.00	5.00				
	7	48	27.00	30.00	18.00	5.00				
	45	49	25.00	25.00	19.00	5.00				
	37	50	25.00	20.00	19.00	10.00				
	4	51	27.00	20.00	18.00	5.00				
	21	52	23.00	30.00	18.00	15.00				
	12	53	27.00	20.00	20.00	5.00				
	17	54	23.00	20.00	18.00	15.00				

C. Druckschaltplan