



Diplomarbeit

Friction Stir Welding von faserverstärkten Polymeren

Prozess- und Werkzeugentwicklung anhand der glasfaserverstärkten
Thermoplaste Ultradur, Ultramid und Ultrason

Vorgelegt von:

Christine Wachtler

Erstellt am:

Institut für Werkstoffkunde
und Schweißtechnik

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Priv.-Doz. Christof Sommitsch

Betreuer:

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger

Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Kukutschki

Dipl.-Ing. Thomas Weinberger

Dipl.-Ing. Gunter Figner

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, 16.02.2010

Christine Wachtler

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit entstand im Rahmen einer Forschungszusammenarbeit des Instituts für Werkstoffkunde und Schweißtechnik der TU Graz mit BASF Verbindungstechnik, Ludwigshafen.

Ein großer Dank gebührt den Kollegen am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, insbesondere dem Institutsvorstand *Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Priv.-Doz. Christof Sommitsch* und Herrn *Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. Horst H. Cerjak*, welche die Durchführung dieser Forschungsarbeit ermöglicht haben. Ein besonderer Dank gilt Herrn *Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Norbert Enzinger* für die exzellente Supervision des Projekts. Herrn *Dipl.-Ing. Kuriykov* von der Firma BASF Verbindungstechnik sei für die Bereitstellung des Plattenmaterials und das unterstützende Feedback gedankt.

An dieser Stelle möchte ich allen danken, die mich bei der Erstellung dieser Diplomarbeit begleitet und unterstützt haben, besonders Herrn *Dipl.-Ing. Gunter Figner*. Ein Dank gilt *Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Kukutschki* und *Dipl.-Ing. Thomas Weinberger* für die hilfreiche Unterstützung während meiner Zeit als Diplomandin am Institut.

Dank gebührt dem Labormitarbeitern *Leander Herbitschek*, *Herbert Penker*, *Gernot Stöfan*, *Kurt Kerschbaumer* und *Christian Schlieber* für den herausragenden fachlichen Beistand.

Besonderer Dank gebührt meinen lieben Bürokollegen für die schöne Zeit und für die technische und moralische Unterstützung.

Graz, im Februar 2010

Christine Wachtler

Kurzfassung

In der vorliegenden Diplomarbeit wird das Rührreibschweißen von kurzfaserverstärkten Polymeren anhand der Werkstoffe Polyamid 6, Polybutylenterephthalat und Polyethersulfon beschrieben.

Ziel der Arbeit war es, im Rahmen einer Machbarkeitsstudie die Möglichkeiten und die Grenzen des Rührreibschweißens faserverstärkter Thermoplaste aufzuzeigen. Die Untersuchungen erfolgten anhand von Stumpfschweißungen mit drei Werkstoffen, welche von BASF zur Verfügung gestellt wurden. Zurzeit sind keine Berichte über das erfolgreiche Rührreibschweißen von faserverstärkten Polymeren veröffentlicht.

Beim Friction Stir Welding mit konventionellen Rührreibschweißwerkzeugen kommt es aufgrund des Materialverhaltens von Polymeren (geringere Wärmeleitfähigkeit, Selbstschmierung bei erhöhten Temperaturen) zu einer geringen Spitztemperatur zwischen Werkstück und Werkzeug. Somit ist es nötig, während des FSW-Prozesses zusätzlich Wärme einzubringen.

Es wurden mehrere Werkzeugkonzepte und –geometrien entwickelt und verschiedene Wärmequellen miteinander verglichen. Der Unterschied zwischen einem konventionellen FSW-Werkzeug mit Schulter und einem Werkzeug mit stehender Schulter wurde untersucht. Verschiedene Methoden zur Wärmeerbringung und der Einfluss der Schweißparameter (insbesondere Drehzahl und Eindringtiefe) auf die erreichbare Schweißnahtfestigkeit wurden evaluiert.

Die verschweißten Proben wurden hinsichtlich ihrer Zugfestigkeit geprüft. Weiters wurde die Makro- und Mikrostruktur und die Verteilung der Fasern mittels Licht- und Elektronenmikroskopie untersucht. Es zeigte sich, dass mittels des im Rahmen der Diplomarbeit entwickelten Werkzeugs mit stehender, beheizter Schulter hohe Festigkeitswerte erreicht werden konnten. In homogenen Schweißverbindungen wurden Zugfestigkeitswerte zwischen 20-50% des Grundwerkstoffs erreicht.

Abstract

This thesis presents the Friction Stir Welding of short-fiber reinforced polymer materials, especially of polyamide 6, polybutylene terephthalate and polyethersulfone. Present no scientific reports in the literature on successful Friction Stir Welding of fiber reinforced polymers are available.

The aim of the work was to show the possibilities and the limits of Friction Stir Welding of reinforced thermoplastics in a feasibility study. The tests were conducted using butt welds with three materials provided by BASF.

In Friction Stir Welding with conventional tools the temperature due to frictional heat between tool and work piece is too low due to the material properties of polymers (low thermal conductivity coefficient, self-lubrication at elevated temperatures). Thus, it is necessary to provide additional heat during the FSW process.

Several tool concepts, tool shapes and different external heat sources were developed and compared. The difference between a conventional FSW tool with a shoulder and a tool with a standing shoulder was examined. Different methods of heat transfer were evaluated and the main welding parameters (e.g rotational speed and plunge rate) were adjusted, optimizing the tensile strength of the joint.

The welded samples were examined by tensile strength. Furthermore the macro-and microstructure of the weld and the distribution of the fibers were investigated by means of light optical microscopy and scanning electron microscopy. High tensile strength values of the welded joints were achieved by a FSW tool with a stable, heated shoulder and a rotating pin, developed within this work. The strength of the joint was between 20-50% of the base material depending on the used material.

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG	V
KURZFASSUNG	VII
INHALTSVERZEICHNIS	IX
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	XII
1 EINLEITUNG	1
2 AUFGABENSTELLUNG	2
3 LITERATURSTUDIE	3
3.1 Friction Stir Welding – Rührreibschweißen	3
3.1.1 Verfahrensprinzip.....	3
3.1.2 Vorgänge beim FSW	6
3.1.3 Vorteile des FSW-Verfahrens	7
3.1.4 Nachteile	8
3.1.5 Struktur einer Rührreibschweißverbindung.....	8
3.2 Friction Stir Welding von Thermoplasten	9
3.2.1 FSW von Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)	10
3.2.2 Patent “Friction Stir Welding of Polymeric Materials”	12
3.2.3 FSW von PP	15
3.2.4 FSW von Polyethylen.....	16
3.2.5 Verschweißen von PP mit einem Fräswerkzeug	17
3.2.6 Friction Stir Joining von Polypropylen.....	19
3.2.7 In-Line oder Vertical Reciprocating FSW von Polymeren.....	23
3.2.8 FSW von faserverstärkten Thermoplasten.....	26
3.2.9 Zusammenfassung	27
3.3 Eigenschaften der glasfaserverstärkten Thermoplaste	28
3.3.1 Polymere	29
3.3.2 Einteilung der Polymere.....	30
3.3.3 Struktur der Polymere.....	31
3.3.4 Verarbeitung von Kunststoffen, Zustandsbereiche.....	32
3.3.5 Verbundwerkstoffe/ Faserverbundwerkstoffe	33
3.3.6 Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe	37
3.3.7 Wasseraufnahme	40
3.4 Fügen von thermoplastischen Polymeren	43
3.4.1 Physikalisches Prinzip	44
3.4.2 Charakterisierung von Thermischen Schweißungen bei Polymeren.....	46
3.4.3 Strukturelle Veränderungen	47
3.4.4 Schweißen von Ultramid, Ultradur und Ultrason.....	48
4 EXPERIMENTELLER TEIL	57
4.1 Anlagen am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik	57
4.1.1 Rührreibschweißmaschine MTS ISTIR BR4.....	57
4.1.2 Temperaturregelung und -messung.....	57
4.1.3 Zugprüfmaschine.....	58
4.1.4 Mikroskope	59
4.1.5 Rasterelektronenmikroskop.....	59
4.1.6 Elektrodenofen ESAB	59

4.2	Ablauf der Diplomarbeit	60
4.2.1	Probenherstellung.....	61
4.2.2	Schweißversuche.....	62
4.2.3	Untersuchungsmatrix.....	63
4.3	Werkzeugentwicklung und Werkzeug-Design	63
4.3.1	Konventionelles Rührreißschweißwerkzeug.....	65
4.3.2	Werkzeug mit stehender Schulter	66
4.4	Versuchsaufbau	70
4.4.1	Konzepte der Wärmeeinbringung.....	70
4.4.2	Einspannung.....	71
4.5	Untersuchungsmethodik.....	73
4.5.1	Plastographie	73
4.5.2	Visuelle Bewertung der Schweißverbindung	75
4.5.3	Zugversuch	77
4.5.4	Biegeversuch	78
4.5.5	Rasterelektronenmikroskopie.....	80
4.5.6	BSC-Back Scattered Electrons	83
4.5.7	Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX).....	83
5	ERGEBNISSE.....	85
5.1	Zugversuche Grundmaterial.....	85
5.2	Durchgeführte FSW-Versuche	86
5.2.1	Ultramid-Konventionelles Rührreißschweißwerkzeug.....	86
5.2.2	Ultradur-Werkzeugentwicklung.....	98
5.2.3	Ultramid-Stehende, beheizte Schulter.....	106
5.2.4	Ultrason.....	115
5.2.5	Dissimilar Welding von Ultramid und Ultradur.....	117
5.2.6	Dissimilar Welding von Ultradur und Ultrason	119
5.3	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	122
5.4	Durchgeführte zusätzliche Untersuchungen	123
5.4.1	Vier-Punkt-Biegeversuch.....	123
5.4.2	Bruchflächenuntersuchung mittels REM.....	125
5.4.3	Materialkontrast mittels Back-Scattered Electrons BSC	129
5.4.4	Elementanalyse mittels EDX.....	129
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	133
7	AUSBLICK.....	135
8	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	137
9	TABELLENVERZEICHNIS.....	143
10	LITERATURVERZEICHNIS.....	145
11	ANHANG	151
11.1	Spannungs-Dehnungsdiagramme Zugversuche Grundmaterial	151
11.2	Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Faserorientierung und Zugeigenschaften.....	152
11.3	Datenblätter Kunststoff	155
11.3.1	Ultramid.....	155
11.3.2	Ultradur	156
11.3.3	Ultrason	157

11.4	Konstruktionszeichnungen	158
11.4.1	Konventionelles Rührreißschweißwerkzeug 1, 2 und 3.....	158
11.4.2	Adjustable Pin für Prototyp Heizplatte.....	159
11.4.3	Pinstift Ø5.2mm für Prototyp beheizte Schulter.....	159
11.4.4	Pin 1 für stehende, beheizte Schulter.....	160
11.4.5	Pin 2 für stehende, beheizte Schulter.....	160
11.4.6	Stehende, beheizte Schulter.....	161
11.5	Wärmeeinbringung und Temperaturmessung	161
11.5.1	Folienfühler.....	161
11.5.2	Heizpatrone.....	162
11.5.3	Heißluftfön.....	163
11.5.4	Berührungsloser Temperaturfühler.....	164
11.5.5	Mantelthermoelement Typ K.....	164
11.6	FSW- Maschinenprogramm	165
11.7	Plastographie	165
11.7.1	Dissimilar Welding PA6 & PBT;.....	166
11.7.2	Übersichtsbilder Prototyp beheizte Schulter.....	169
11.7.3	Stehende, beheizte Schulter Ultramid.....	172
11.8	Rasterelektronenmikroskopie	174
11.8.1	REM Grundmaterial.....	174
11.8.2	REM verschweißte Probe.....	178
11.8.3	Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX).....	183
11.8.4	Back-Scattered Electrons BSC.....	184

Abkürzungsverzeichnis

AS	Advancing Side
BSC	Back-Scattered Electrons, Rückstreuelektronen
DOE	Design of Experiments (statistische Versuchsplanung)
EDX	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy, Energiedispersive Röntgenspektroskopie
FSW	Friction Stir Welding (Rührreibschweißen)
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GW	Grundwerkstoff
HAZ	Heat Affected Zone; Wärmeeinflußzone
IWS	Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik
LIMI	Lichtmikroskop
PA	Polyamid
PBT	Polybutylenterephthalat
PES	Polyethersulfon
PP	Polypropylen
REM	Rasterelektronenmikroskop
RS	Retreating Side
RT	Raumtemperatur
SFT	Short Fibre Thermoplastic, kurzfaserverstärkte Thermoplaste
SG	Schweißgut
TMAZ	Thermomechanical Affected Zone; thermomechanisch beeinflusste Zone
TWI	The Welding Institute (Cambridge)

Formelzeichen

f_z	Schweißfaktor (Festigkeitsverhältnis Schweißnaht/ Unverschweißter GW)
n	Drehzahl [U/min]
R_m	Zugfestigkeit [N/mm ²]
v	Vorschubgeschwindigkeit [m/min]

1 Einleitung

Das Verfahren Reibrührschweißen (Friktion Stir Welding, FSW) gewinnt im Bereich der Sonderschweißverfahren eine immer größere Bedeutung. Diese relativ neue Fügetechnologie wurde Anfang der 90er des vorigen Jahrhunderts am TWI in Cambridge entwickelt und wurde ursprünglich hauptsächlich zum Fügen von Aluminiumlegierungen eingesetzt. Seitdem wurde die Palette der verschweißbaren Werkstoffe weiter vergrößert.

Thermoplastische Polymere wurden erstmals 1997 mittels Friction Stir Welding erfolgreich verschweißt. Mittlerweile können beim Fügen von unverstärkten Polymeren (z.B. Polyethylen [PE], Polypropylen [PP]) im geschweißten Material Zugfestigkeitswerte von bis zu 90% im Vergleich zum Ausgangsmaterial erreicht werden [1]. Dabei müssen spezielle kunststoffspezifische Parameter, wie beispielsweise die Vorwärmtemperatur des Werkstoffes, die Drehzahl des Pins und die Pin geometrie berücksichtigt werden.

Die im Rahmen dieser Diplomarbeit zu untersuchenden Werkstoffe Polyamid 6 (Ultramid), Polybutylenterephthalat (Ultradur) und Polyethersulfon (Ultrason) sind jeweils mit 30 Gewichtsprozent Kurzfasern verstärkt. Die Werkstoffe werden in der industriellen Praxis bereits mittels Heizelement- und Ultraschallschweißen sowie durch Rotations- und Vibrationsschweißen gefügt, jedoch meist in Güten ohne Faserverstärkung [2].

Friction Stir Welding besitzt laut Yousefpour [3] ein großes Potential zum Schweißen kurzfaserverstärkter Thermoplaste. Obwohl es in der Rührzone zum Faserbruch kommen kann, werden die Fasern mit verrührt. Somit kann dem größten Problem beim Fügen von kurzfaserverstärkten Thermoplasten, der Erhaltung der Integrität des Verstärkungstoffes über der Schweißfuge hinweg - begegnet werden[4].

Bisher wurden bei Schmelzschweißverfahren von kurzfaserverstärkten Thermoplasten Festigkeiten erreicht, welche unter den Festigkeiten der ungeschweißten, Grundwerkstoffe lagen. Yousefpour postuliert dem FSW von Kunststoffen eine große Zukunft, wenn mittels intelligenten Werkzeugdesigns der Faserbruch in der Schweißzone kontrolliert werden kann [3]. Falls ein FSW-Verfahren für thermoplastische Verbundwerkstoffe erfolgreich entwickelt werden kann, werden die Fügetechnologien für Verbundwerkstoffe revolutioniert.

2 Aufgabenstellung

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wird untersucht, ob und in welchen Maßen die faserverstärkten Polymere Ultramid, Ultradur und Ultrason (Abbildung 1) mittels Friction Stir Welding verschweißbar sind.

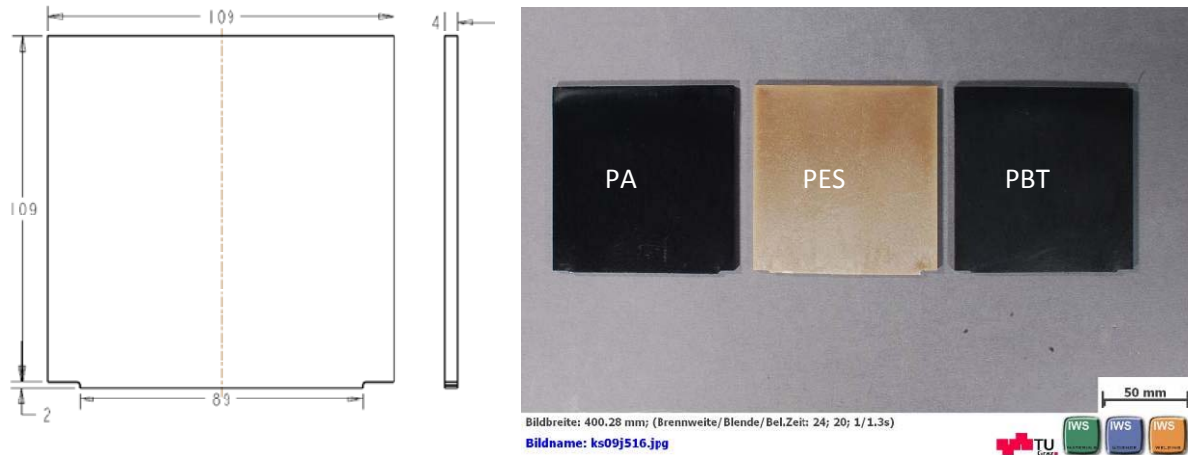


Abbildung 1: Plattenmaterial BASF: Abmessungen (links) und Draufsicht (rechts): Ultramid, Ultrason, Ultradur

Ziel der Arbeit war es, ein Werkzeug zum FSW von faserverstärkten Polymeren zu entwickeln. Zunächst wird ein Überblick über die vorhandene Literatur zum Stand der Technik beim FSW von Kunststoffen gegeben, sowie über die das Fügen von faserverstärkten Kunststoffen und deren Werkstoffeigenschaften. Dabei werden die Vor- und Nachteile der bisher durchgeführten Experimente herausgearbeitet. Daraus wurde die Vorgehensweise für die Durchführung der Versuche am IWS abgeleitet.

Es wurde ein Versuchsaufbau konzipiert und mehrere Werkzeugkonzepte entwickelt. Mit einer Parameterstudie wird der Einfluss der Schweiß- und Werkzeugparameter aufgezeigt, die optimalerweise in der Entwicklung eines stabilen Schweißprozesses mündet. Dazu gehören die Durchführung von Schweißversuchen und die Auswertung der mechanischen Eigenschaften der geschweißten Proben. Die mechanischen Eigenschaften wurden anhand von Zugversuch und Biegeversuch bestimmt. Weiters wurde die FSW-Verbindung mittels Lichtmikroskopie (LIMI) und Elektronenmikroskopie (REM) untersucht.

3 Literaturstudie

Die im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit durchgeführte Literaturstudie umfasst vier Themenkomplexe. Zunächst wird ein Überblick über das Verfahren Rührreibschweißen im Allgemeinen gegeben, dann im Speziellen über den aktuellen Stand der Technik beim FSW von polymeren Werkstoffen. Das dritte Kapitel gibt einen Überblick über die drei verwendeten Werkstoffe. Ein letzter Exkurs beschäftigt sich mit allgemeinen Kunststoffschweißverfahren für faserverstärkte Polymere, da sich aus den dort gewonnenen Erkenntnissen Denkansätze für das FSW von Polymeren ableiten lassen.

3.1 Friction Stir Welding – Rührreibschweißen

Friction Stir Welding (FSW) ist ein relativ neues Fügeverfahren, welches erstmals 1991 erfolgreich vom The Welding Institute (TWI) in Cambridge für die Verbindung von Aluminiumwerkstoffen eingesetzt wurde [5 p. 233 ff]. Mittlerweile wurde das Einsatzspektrum dieses Verfahrens auf die Werkstoffe Kupfer, Stahl, Magnesium, Titan und ihre Legierungen ausgedehnt. Eine besondere Eignung besitzt das Verfahren für die Verschweißung unterschiedlicher Materialien, wie etwa von Aluminium-Stahl-Mischverbindungen [6 S. 24]. Thermoplastische Polymere wurden erstmals 1999 an der Brigham Young University (Utah) mittels FSW verschweißt [7 S. 15].

Am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik (IWS) der TU Graz ist seit 2005 eine Rührreibschweißmaschine der amerikanischen Firma MTS System Corporation in Betrieb. Seitdem wurden zahlreiche erfolgreiche Forschungsprojekte zum FSW verschiedenster Stahlgüten (Edelstahl, TRIP¹-Stähle, beschichtete Stähle,...), unterschiedlicher Aluminiumlegierungen sowie den Werkstoffen Magnesium, Kupfer und Titan durchgeführt. Hinzu kamen Forschungsvorhaben mit dem Ziel Mischverbindungen von Stahl-Aluminium und Stahl-Magnesium herzustellen.

Die vorliegende Diplomarbeit ist die erste bekannte Studie weltweit (Stand Dezember 2009), die sich mit dem Rührreibschweißen von faserverstärkten Polymeren beschäftigt.

3.1.1 Verfahrensprinzip

Rührreibschweißen wird in die Gruppe der Reibschweißverfahren eingeordnet. Diese Verfahren beruhen auf dem Prinzip der Umwandlung mechanischer Energie an der an der Fügestelle in Wärme [4 S. 334]. FSW gehört zu den Verfahren des Festkörperschweißens; dabei wird mit Hilfe von Reibwärme und Druck das Material in der Fügezone plastisch verformt, ohne dass eine Flüssigphase entsteht.

Bei diesem Prozess wird eine rotierende Werkzeugspitze (Pin) zwischen den zu fügenden Teileverfahren. Wichtig ist, dass beide zu verschweißenden Teile fest eingespannt sind. Die Reibung zwischen dem Werkzeug und den Werkstücken verrührt die Grundmaterialien im festen Zustand miteinander, und erzeugt so eine Schweißverbindung [4 S. 336]. Beim FSW von Polymeren wird laut Strand [8 S. 1078] ein kleiner Teil des Materials in der Fügezone aufgeschmolzen, der Großteil wird hingegen nur weich. Abbildung 2 zeigt das typische FSW-Werkzeug, bestehend aus einer Werkzeugschulter und einem profilierten Stift, dem Pin.

¹ TRIP: Transformation-Induced Plasticity; Bezeichnung für Stahlgüten, die hohe Festigkeit mit hoher Dehnfähigkeit kombinieren [115]

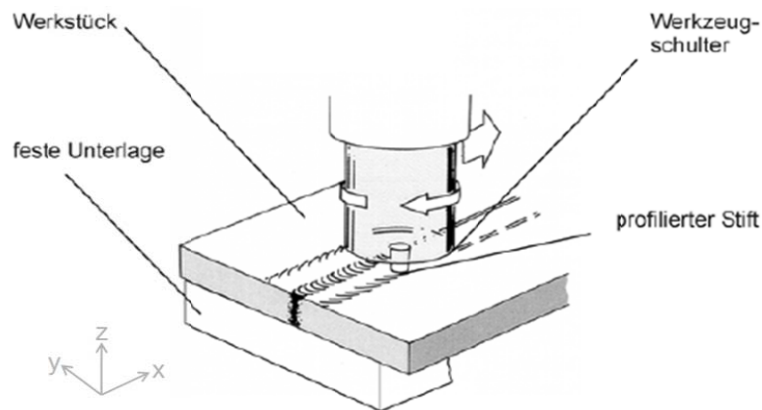


Abbildung 2: Verfahrensprinzip Friction Stir Welding [9 S. 131]

Üblicherweise tastet zuerst der Pin das Werkstück an. Das Werkzeug beginnt sich zu drehen, und der Pin wird bis zu einer definierten Eindringtiefe in das Material in negativer z-Richtung eingetaucht. Die Schulter sitzt auf, und der eigentliche Schweißprozess beginnt.

Das FSW-Plotting (Abbildung 3) zeigt den Verlauf der wichtigsten Schweißparameter über der Zeit für einen typischen Versuch. Der Zusammenhang von Drehzahl, Eindringtiefe (Forge Weg) und Kraft auf das Werkzeug (Forge Kraft) ist deutlich zu erkennen.

Erst nach Berührung der Oberfläche des zu fügenden Bauteils durch den Pin wird das Werkzeug auf die gewünschte Drehzahl gebracht („Spindel ein“). Die Zustellbewegung wird in z-Richtung fortgesetzt, bis die endgültige Eindringtiefe erreicht wird (weggesteuert). Dabei steigt die Kraft, die auf das Werkzeug wirkt, stark an. Ist die eingestellte Eindringtiefe erreicht, setzt die Vorschubbewegung in x-Richtung ein (Vorschub ein). Die Kraft, die auf das Werkzeug wirkt, vermindert sich auf einen geringeren, annähernd konstanten Wert.

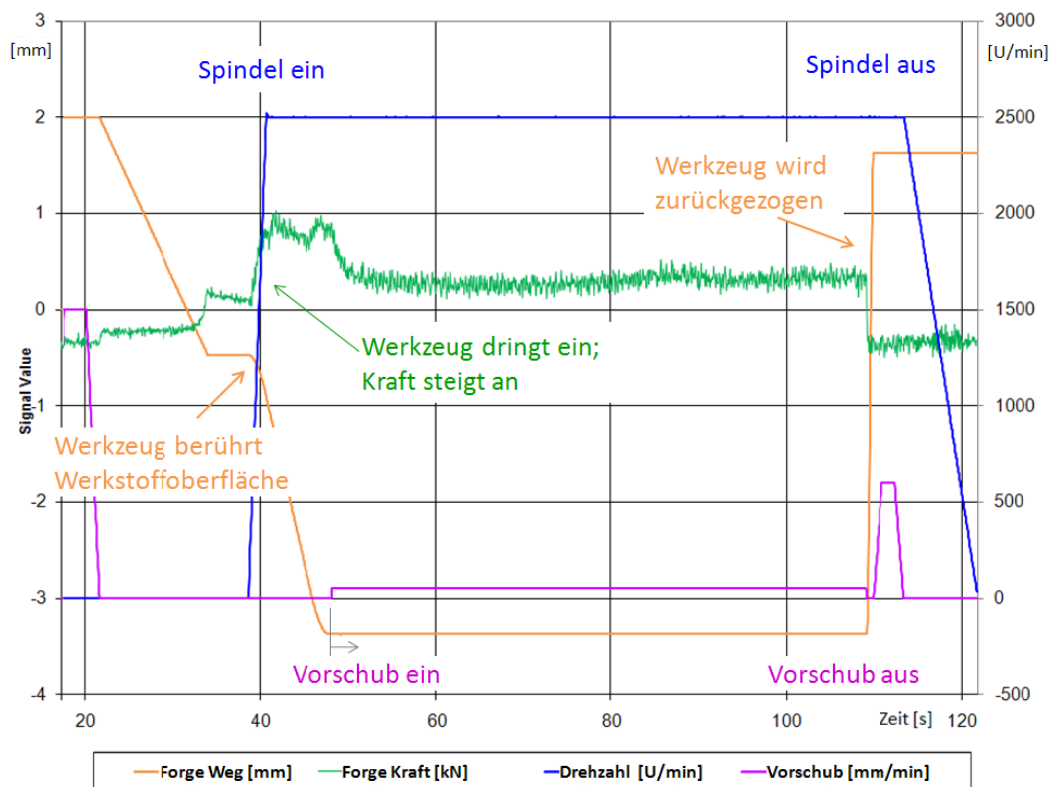


Abbildung 3: Verlauf der Schweißparameter beim FSW von Polymeren

Das Werkzeug wird entlang des Fügespaltes weiterbewegt. Hinter dem Werkzeug kühlt das Material aus, und schafft so die Verbindung der beiden Fügepartner. Nachdem die eingestellte Schweißnahtlänge erreicht ist, wird der Vorschub ausgeschaltet, das Werkzeug wird wieder zurückgezogen und die Spindeldrehzahl reduziert.

Am Nahtende bleibt ein Loch in Form und Größe des Pins bestehen, wie in Abbildung 4 ersichtlich ist. In der Abbildung sind die an der Schweißnaht-Oberfläche charakteristischen halbkreisförmigen Abdrücke und der Endkrater, welcher durch das Herausheben des Pins aus der Fügenaht entsteht, zu sehen.

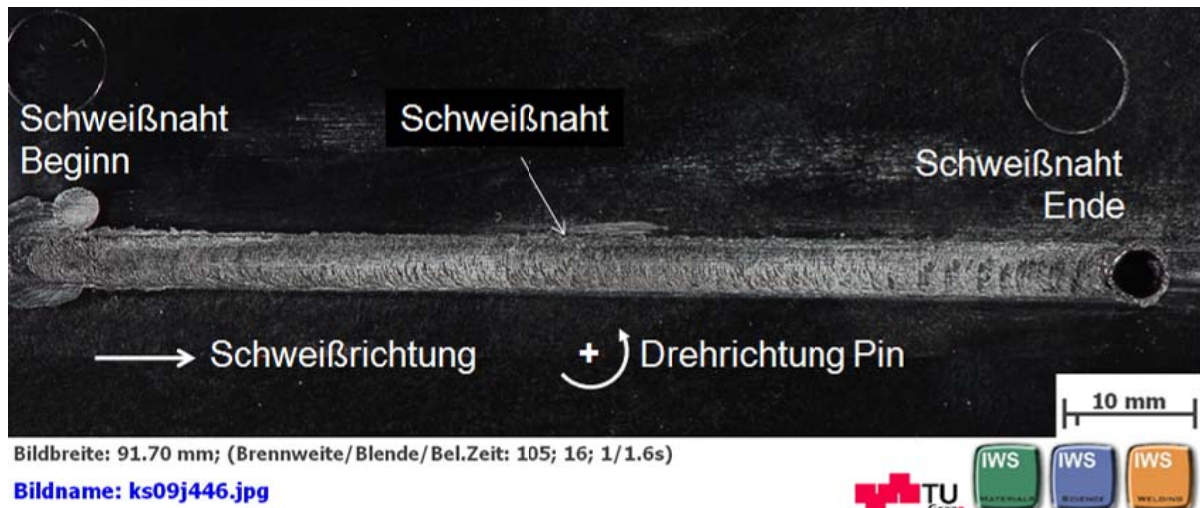


Abbildung 4: Typische FSW-Naht von Polymeren

Beim erfolgreichen FSW-Prozess spielen die Werkzeuggeometrie und optimierte Maschinenparameter zusammen. Einen hohen Einfluss auf die Nahtqualität hat die Werkzeuggeometrie, insbesondere Pindurchmesser, Pinlänge, Schulterdurchmesser sowie die geometrischen Ausprägungen von Schulter und Pin (z.B.: konkave Schulter, kegelter Pin, Gewindgänge an der Pinspitze). Maschinenparameter haben ebenso einem großen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften einer Naht. Die wichtigen zuerst: die Drehzahl, der Anpressdruck und die Vorschubgeschwindigkeit der Anstellwinkel.

Durch die Überlagerung von Vorschubgeschwindigkeit und Rotation des Pins kommt es in der Fügezone zu einer Asymetrie der resultierenden Geschwindigkeitsvektoren: an der Advancing Side kommt es zu einer Überlagerung der Schweißrichtung mit der Drehrichtung des Werkzeugs, während an der Retreating Side die Drehrichtung dem Vorschub entgegengesetzt ist (Abbildung 5, Abbildung 8) [10 S. 17].

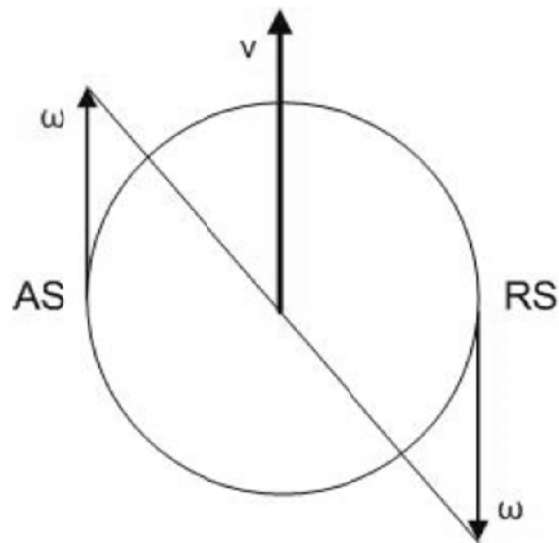


Abbildung 5: Umfangsgeschwindigkeiten (ω) und Vorschubgeschwindigkeit (v) am Werkzeug an der Advancing Side und der Retreating Side [10 S. 17]

3.1.2 Vorgänge beim FSW

Reynolds[11] untersuchte den Materialfluss beim FSW mittels eingebetteter Markermaterialien. Er stellte dabei fest, dass der Rührreißschweißprozess annäherungsweise als lokaler Extrusionsvorgang beschrieben werden kann. Dabei formen die Werkzeugschulter, die Schweißunterlage und das kalte Grundmaterial außerhalb der Schweißzone eine „Extrusionskammer“, welche sich relativ zum Werkstück bewegt.

Abweichend von dieser Theorie erfolgt an der der Oberfläche der Schweißnaht ein signifikanter Materialtransport durch die rotierende Werkzeugschulter. Der durch die Schulter verursachte Materialtransport führt zu einem mengenmäßig geringen Anteil von Zirkulation um die longitudinale Achse der Schweißung und führt dazu, dass sich zum einen das Material an der Oberfläche der Schweißung bevorzugt von der Rückseite zur Vorderseite bewegt, und zum anderen in der Mitte und im FSW-Schweißwurzel von der Vorderseite zur Hinterseite bewegt [11].

Arbegast [12] unterscheidet ein Fünf Zonen-Modell: Vorwärmzone (Preheat), die Zone beginnender Verformung (Initial deformation), Extrusion-, Schmiedezone (Forging) und Abkühlzone (Cooldown) (Abbildung 6).

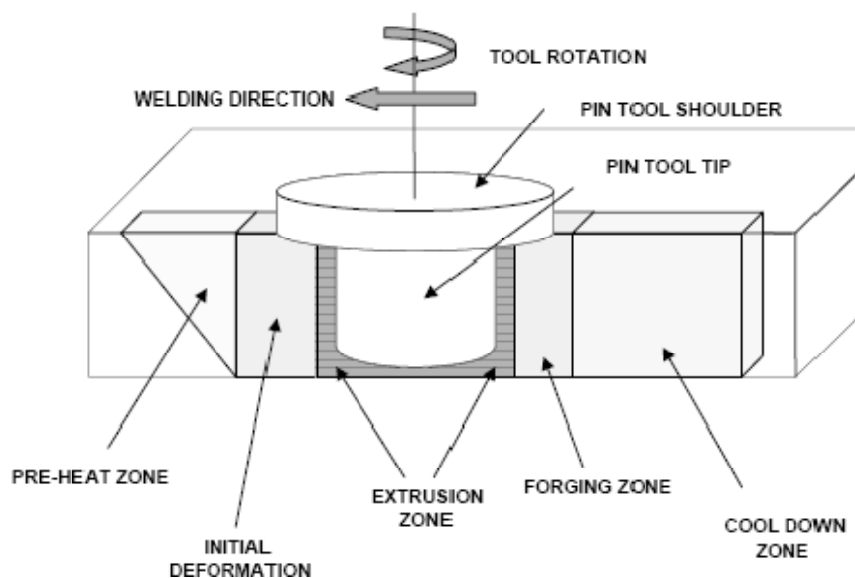


Abbildung 6: FSW als Extrusionsprozess [13 S. 9]

Durch die Reibungswärme des Werkzeugs wird das Material vor dem Pin bereits vorgewärmt. Die rotierende Bewegung des Werkzeugs führt zu einer ersten Verformung des erweichten Materials. In diesem Bereich wird das Material zunächst aufwärts zur Schulter und dann abwärts in die Extrusionszone gefördert. In der Extrusionszone wird das Material von der Vorderseite um den Pin herum gefördert. Dies geschieht durch die Sogwirkung des Hohlraumes, welchen der Pin durch die Vorschubbewegung hinter dem Werkzeug hinterlässt. Die Schulter verhindert, dass Material die Extrusionszone verlässt, und verschmiedet das Material. Die Abkühlzone schließlich ist jener Bereich, in dem das Material auskühlen kann [12 S. 45 ff].

Durch jede Umdrehung des Werkzeugs wird eine halbzyylinderförmige Materialmenge um die Retreating Side des Werkzeugs an die Rückseite des Werkzeuges gedrückt. Somit kommt es zu einer Materialvermischung des Werkstoffs.

Bei der Verschweißung von unterschiedlichen Materialien kommt es zu einer innigen Verbindung der Fügepartner, aber nur in einem begrenzten Maß zu einer chemischen Vereinigung [14 S. 247f].

Arbegast bezeichnet FSW von Polymeren als „controlled path extrusion“ [15 S. 273ff]. Die Schweißung in der Schweißrichtung wird durch eine Akkumulation von mehrschichtigen, plastifizierten Material charakterisiert. Bei metallischen und Nichteisen-Werkstoffen zeigt sich als Folge die so genannte „Zwiebelring-Struktur“ [16 S. 23f]. Diese Struktur ist auch bei Polymeren zu beobachten (Abbildung 7).

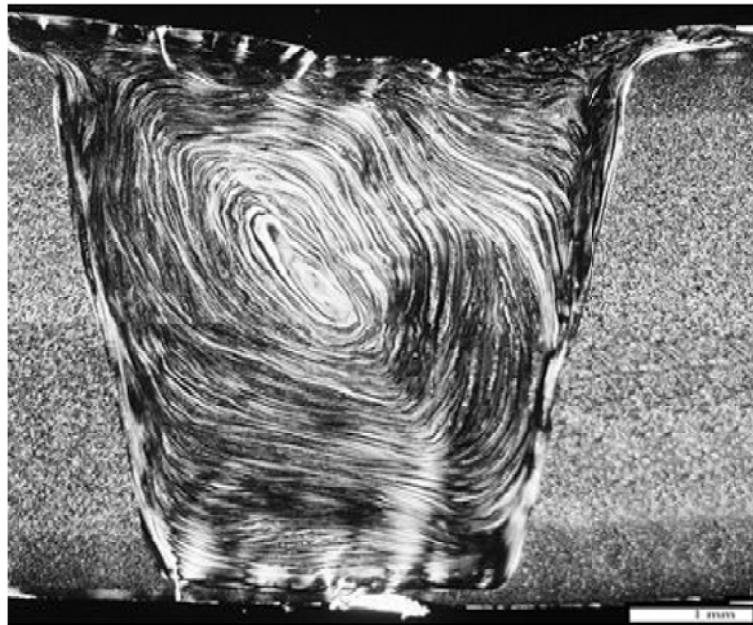


Abbildung 7: Typische Zwiebelringstruktur FSW von PP [7 S. 54]

3.1.3 Vorteile des FSW-Verfahrens

Rührreisschweißen gilt als ein umwelt- und arbeitsplatzfreundliches Schweißverfahren, da die Verbindung in der festen Phase erfolgt. Es kommt zu keiner Materialaufschmelzung, und somit muss bei einer Kombination von verschiedenen Werkstoffen keine Schmelzschweißbeignung gegeben sein; bei legierten Werkstoffen ist die Gefahr einer Legierungsveränderung vermindert. Die Verbindung erfolgt im teigigen Zustand, weshalb Stoffe mit größeren Schmelztemperaturdifferenzen miteinander verschweißt werden können.

Im Gegensatz zu herkömmlichen Schweißverfahren kann durch den geringeren Wärmeeintrag die Gefahr der Rissbildung verringert werden, und es entstehen weniger Poren und auch der Verzug kann eingeschränkt werden. Weiters kommt es zu keinen Volumensprung aufgrund der fehlenden Phasenänderung flüssig-fest. Somit treten geringe Eigenspannungen auf, und je nach Umformgrad kommt es zur Bildung eines feinkörnigen Rekristallisationsgefüge.

Weiters entstehen bei der Verarbeitung weder Rauchgase noch Strahlung, der Einsatz von Zusatzwerkstoffen und Schutzgasen entfällt. Auch müssen die Kanten und Oberflächen nicht aufwändig vorbereitet werden, die Vorreinigung des Schweißwerkstoffes entfällt ebenso wie für gewöhnlich die Nacharbeit. Es besteht keine Gefahr von Spritzern auf der Oberfläche mehr.

Sind einmal die optimalen Verarbeitungsparameter für einen Werkstoff gefunden, können Schweißungen von hoher, sehr gut reproduzierbarer Qualität durchgeführt werden.

Für FSW ist keine manuelle Handfertigkeit, sondern nur Maschinenbedienerwissen notwendig. FSW lässt sich einfach automatisieren, und da wenige Prozessparameter zu beachten sind, ist die Qualitätssicherung sehr einfach zu bewerkstelligen. Möglich sind relativ hohe Schweißgeschwindigkeiten von bis zu 6 m/min[17 S. 159][6 S. 24].

3.1.4 Nachteile

Der augenscheinlichste Nachteil ist das am Ende der Naht verbleibende Loch. Durch hohe abwärts und in Vorschubrichtung gerichtete Kräfte besteht die Notwendigkeit einer stabilen Unterlage und festen Einspannung. Durch den Materialfluß kann es zu Oxideinschlüssen kommen, die zu Bindefehlern führen können. FSW besitzt eine geringere Flexibilität als die Schmelzschweißverfahren im Bezug auf die Nahtzugänglichkeit; hinzu kommt die geringe Spaltüberbrückbarkeit, (< 2mm), da bislang in den meisten FSW-Verfahren ohne Schweißzusatz gearbeitet wird. Negativ wirken sich die hohen erforderlichen Fügekräfte, die teuren Spannvorrichtungen, die teure Anlage und die hohen Lizenzgebühren aus. Somit wird FSW nur bei Sondereinsätzen und größeren Stückzahlen industriell genutzt [17 S. 159][6 S. 24].

3.1.5 Struktur einer Rührreibschweißverbindung

Strand [7] unterscheidet folgende vier Schweißzonen, wie in Abbildung 8 dargestellt: dazu gehören die Bottom Disturbance, die Advancing und die Retreating Interface und die Rührzone („central region“).

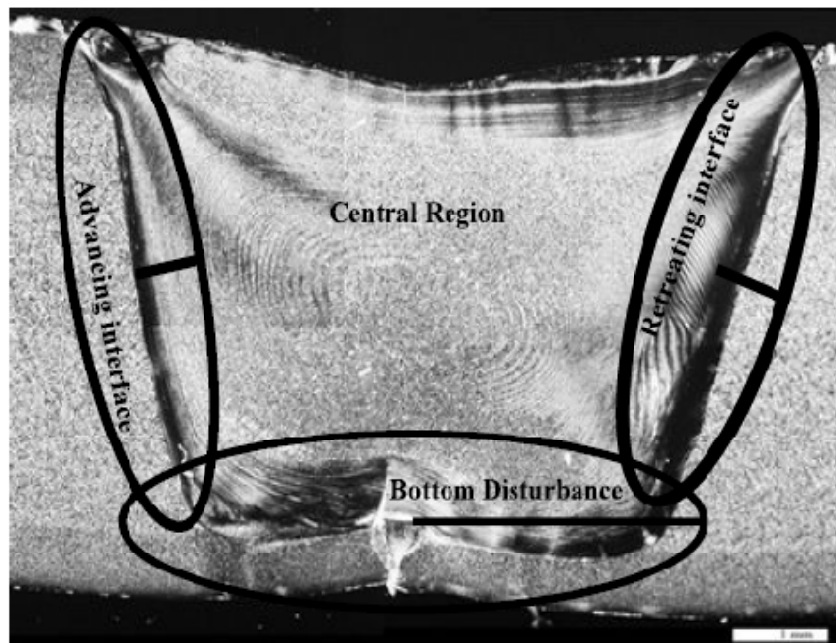


Abbildung 8: Schweißzonen in einer polymeren FSW-Stumpfnah: Advancing und Retreating Interface, Bottom Disturbance, Central Region (Stirzone) ; Grundwerkstoff: Polypropylen [7 S. 70]

Strand definiert die Stirzone am Grund der FSW-Schweißung, die Bottom disturbance, als einen Bereich von turbulenter Strömung. In dieser Zone zeigen sich zufällig angeordnete Wirbelfelder. Das

untere Ende dieser Schweißzone markiert auch jenen tiefsten Bereich, in welchem allerhöchstens noch Material von der Pingeometrie verrührt wird.

Oberhalb befindet sich die Rührzone („central region“). Sie besteht rein aus verrührtem Material und bildet den größten Bereich der Schweißung [7 S. 70]. Dieser Bereich ist der größten plastischen Verformung ausgesetzt[18].

Neben den oben genannten Begriffen, welche die Schweißnahtgeometrie charakterisieren, werden auch noch Zonen anhand der thermischen Einwirkung des FSW-Prozesses beschrieben (Abbildung 9). Die Rührzone ist jener stark plastisch verformte Bereich, der vom Pin direkt verrührt wird. Anschließend daran befindet sich die thermomechanisch beeinflusste Zone (Thermomechanical affected zone, TMAZ), die eine der Rührzone ähnliche thermische Beeinflussung zeigt[10 S. 6f]. Außerhalb des plastisch verformten Bereichs der FSW-Naht befindet sich die Wärmeeinflusszone (WEZ). Wise et al.[19 S. 44] unterscheidet bei Polymerschweißungen zwischen der sichtbaren Wärmeeinflusszone und der nicht sichtbaren Wärmeeinflusszone. Der letzte Bereich ist das unbeeinflusste Grundmaterial (GM)[10 S. 6f].

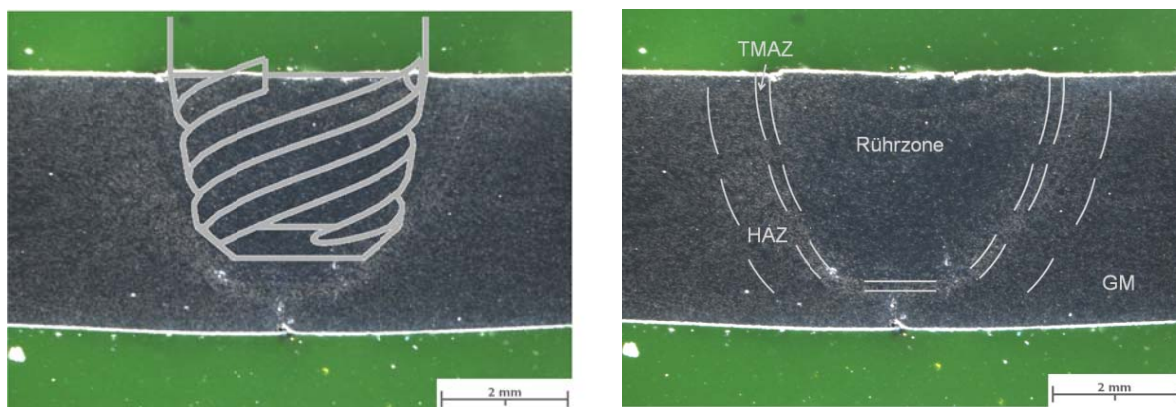


Abbildung 9: Pingeometrie (a) und mikrostrukturellen Zonen (b): Rührzone, Thermo-mechanisch beeinflusste-(TMAZ) und Wärmeeinfluss-Zone (HAZ) sowie Grundmaterial (GM) beim FSW-Schweißen von Polymeren, hier Ultradrur

3.2 Friction Stir Welding von Thermoplasten

Es gibt wenige Literaturstellen, welche das Friction Stir Welding von Kunststoffen behandeln. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass das klassische Rührreisschweißen durch die unterschiedlichen thermischen und viskoelastischen Eigenschaften von Kunststoffen an seine Grenzen stößt [20 S. 340]. Scialpi fasst die Hindernisse beim FSW von Kunststoffen wie folgt zusammen [21]:

- Schwierigkeiten, das Material in der Fügelinie zu halten
- Langsame Schweißgeschwindigkeit
- Ungleichmäßige Vermischung an der Schweißnaht
- bescheidene Oberflächengüte

Frühe Versuche, thermoplastische Polymere mittels FSW zu fügen, gehen auf das Jahr 1997 zurück[22]. An der Brigham Young University (BYU) in Utah wurden Versuche mit Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) und mit Polytetrafluorethylen (PTFE) durchgeführt. Dabei wurde bei ABS eine Schweißnahtfestigkeit von 75% der Festigkeit des Grundmaterials erreicht; PTFE hingegen erwies sich mit herkömmlichen FSW-Technologien als nicht schweißbar[7 S. 17].

2000 erfolgten die ersten Versuche mit Polypropylen am TWI in Cambridge. Dabei wurde bereits ein Schweißfaktor von 0.9 erreicht [7 S. 17]. Der Schweißfaktor ist das Verhältnis der Schweißnahtfestigkeit zur Festigkeit des unverschweißten Thermoplasts, (Kapitel 3.4.2).

In den folgenden Jahren konzentrierten sich die Forschungsaktivitäten an der BYU. Nach einer Voruntersuchung der Materialien ABS, Polypropylen (PP), High-Density-Polyethylen (HDPE) und ultrahochmolekularem Polyethylen (UHMWPE) wurde mit dem Werkstoff PP weitergeforscht. Dabei

wurden erste Erkenntnisse bezüglich der mechanischen Kennwerte und der polymeren Mikrostruktur gewonnen (Kapitel 3.2.2).

An der BYU wurde auch jenes innovative Werkzeugkonzept entwickelt und patentiert, durch welches der erste Durchbruch in der Polymeren FSW-Fügetechnik gelang. Dieses Werkzeug, mit einer stehenden und beheizten Schulter wurde von den Forschern der BYU 2004 zum Patent angemeldet [1] (Kapitel 3.2.2).

2007 führten Mattapelli et al. die Versuche an der South Dakota School of Mines (SDSMT) mit PP fort. Hierzu wurde ein ähnliches Werkzeug wie an der BYU verwendet. Es wurden erste Untersuchungen der Bruchflächen, mittels REM, sowie Viskositätsmessungen mittels DSC durchgeführt [5]. Parallel wurden auch in Ungarn und der Türkei Untersuchungen mit PP und PE durchgeführt [23][24]. Erforscht wurde hierbei unter anderem der Einfluss des Werkzeug-Neigungswinkels sowie der Profilierung am FSW-Werkzeug selbst.

Schließlich wird in Kapitel 3.2.7 noch eine Sonderform des FSW betrachtet, nämlich das „In-Line“- oder „Vertical Reciprocating“-FSW von Polymeren, eine hauptsächlich vom TWI forcierte Entwicklung. Mit Hilfe dieses Verfahrens wurden bereits erfolgreich Versuche mit Acryl und PP durchgeführt[21][25]. In Kapitel 0 wird noch kurz auf die einzige derzeit bekannte Literaturstelle zum FSW von faserverstärkten Polymeren eingegangen werden[26].

3.2.1 FSW von Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)

Einige der ersten Friction Stir Weld-Versuche wurden 1999 an der BYU mit ABS durchgeführt. ABS ist ein mit den meisten konventionellen Schweißverfahren schweißbares Polymer. Somit standen den Wissenschaftlern viele Daten zum Vergleich zur Verfügung. Hinzukommt, dass ABS kaum hygroskopisch ist, d.h. es musste nicht vor den Versuchen getrocknet werden, noch mussten spezielle Feuchtebedingungen während der Versuche eingehalten werden.

Um die Vermischung der beiden Fügepartner besser aufzuzeigen, wurden eine weiße und eine schwarze Platte miteinander verschweißt (Abbildung 10, links). Die ersten Versuche wurden mit einem für die Schweißung von Aluminium üblichen Werkzeug ausgeführt (Abbildung 10, rechts). Dies führte zu einer unverhältnismäßigen Gratbildung außerhalb der Schweißzone, da durch die Schulter das Material aus der Schweißnaht heraus befördert wurde. Durch den Mangel an Schweißgut in der Naht kam es zu Bildung von Löchern und Schlauchporen. Hinzu kam eine generell schlechte Vermischung des Materials in der Schweißzone. Dadurch konnte eine Schweißnahtfestigkeit von maximal 20% der Grundmaterialfestigkeit erreicht werden [1 S. 19f].

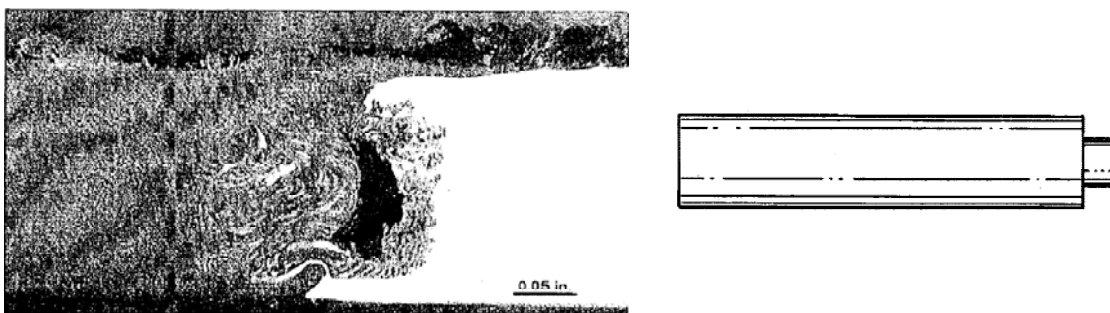


Abbildung 10: Erste Schweißversuche mit einem konventionellem Alu-FSW-Werkzeug (rechts) an zwei verschiedenfarbigen ABS-Platten (links) [1 S. Fig.1&2]

Aus diesen Problemen heraus entwickelten die Forscher ein neues FSW-Werkzeug, das so genannte „Hot-Shoe-Tool“ (Abbildung 11). Neu an diesem FSW-Werkzeug war, dass der rotierende Pin durch ein Axiallager von der stehenden Schulter getrennt wurde. Dieses sei laut Sorensen [27] einem Werkzeug mit einer rotierenden Schulter vorzuziehen.

Die Schulter sitzt dabei direkt auf der Schweißnahtoberfläche auf, und wird von einer externen Wärmequelle beheizt. Der Schuh sollte eine regelbare Temperatur haben, um den FSW Prozess zu optimieren. Durch das Axiallager kann eine gewisse Kraft auf die Oberfläche des Thermoplasts auf-

gebracht werden. Somit kann während des Schweißvorganges kein geschmolzenes Plastik aus der Fügezone herausfließen. Dadurch verbessert sich die Oberflächenqualität der Schweißung, und auch der Schmelzfluss in der Fügezone wird durch die zusätzliche Wärmeeinbringung optimiert [1 S. 19f].

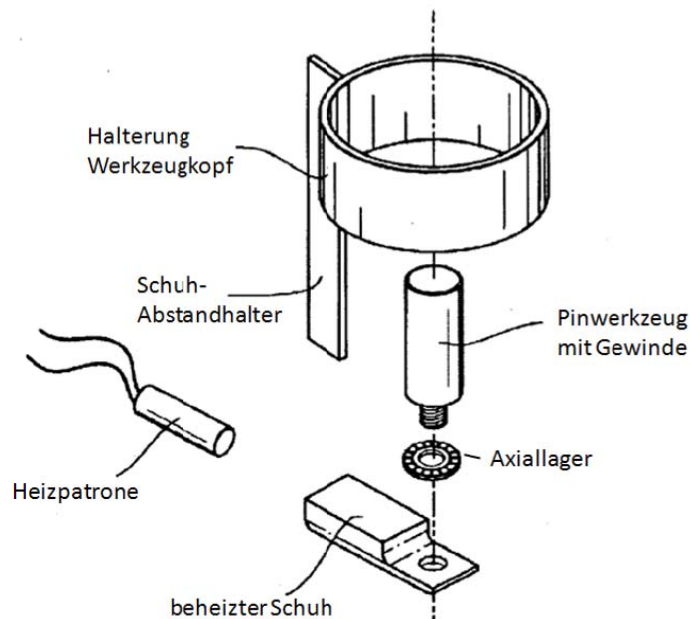


Abbildung 11: Hot-Shoe-Tool: Prinzipieller Aufbau [1 S. Fig.5]

Werkzeugdesign Hot Shoe Tool

Der Pin hat einen Durchmesser von $6,4 \text{ mm}^2$ und ist $0,25 \text{ mm}$ kürzer als die Blechdicke des zu verschweißenden Materials und weist ein Gewinde auf. Vergleichende Vorversuche mit einem glatten Pin zeigten einen vermehrten Fluss des geschmolzenen Materials aus der Fügezone heraus. Dies wurde darauf zurückgeführt, dass Gewindegänge, welche das Material in die Fügezone zurückdrängen, fehlten. Hinzu kam, dass der glatte Pin eine viel stärkere Kraft auf den Maschinenkopf ausübte als jener mit Gewindegängen. Es wird daher angenommen, dass ein Pin mit Gewindegängen den Vorschub der FSW-Maschine durch die Schweißzone ein zusätzliches „Hineinschneiden“ in das Material unterstützt.

Deutlich ist der Fortschritt durch die neue Werkzeugtechnologie am Materialfluss zu erkennen vgl. Abbildung 10 und Abbildung 12. Die optimierten Schweißversuche zeigen ein Nahtbild ohne Lunker und Poren, sowie eine gute Anbindung an die Flanken. Im unteren Teil der Rührzone erkennt man deutlich einen kleinen Strudel, eine laut Sorensen ähnliche Struktur, wie sie auch beim FSW von Aluminium vorkommt.



Abbildung 12: Optimierte Schweißversuche mit dem Hot-Shoe-Tool an zwei verschiedenfarbigen ABS-Platten, Blick in die Schweißrichtung [1 S. Fig.6]

² $6,4 \text{ mm} - 0,25 \text{ inch}$

Betrachtet wurden die Parameter Vorschub, Drehzahl des Pins und die geometrische Form des Pins (Tabelle 1).

Einflussgrößen	Min.	Max.
Drehzahl	400 [rpm]	1000 [rpm]
Vorschub	96 mm/min	288 mm/min
Pingeometrie	mit Gewinde	glatt

Tabelle 1: Untersuchte Parameter beim FSW von ABS [27]

Untersucht wurden die ABS-Proben mittels Biegeversuch (ASTM D-790), Zugversuch (ASTM D-638) und Kerbschlagbiegeversuch (ASTM D-3029). Dabei stellte sich heraus, dass sowohl die Vorschubgeschwindigkeit als auch die Pingeometrie einen deutlich geringeren Einfluss auf die mechanischen Kennwerte zeigten als die Drehzahl [1 S. 19ff].

Troughton [28 S. 408] bezeichnet die Spindeldrehzahl als den entscheidenden Parameter beim Schweißen von Thermoplasten. Werkzeuge mit ebenen, glatten Pins sind nicht geeignet, besser sind Werkzeuge mit Gewindegängen.

Nach Abschluss der Vorversuche wurden weitere Schweißversuche mit ABS, PP, HDPE, UHMWPE als Stumpfnähte durchgeführt. Nun wurden die Parameter Spindeldrehzahl, Vorschub und Schuhtemperatur näher betrachtet und miteinander verglichen. Bei den Versuchen selbst wurden folgende Schweißfaktoren erreicht: ABS: 0,96; PP: 0,98; HDPE: 0,95; UHMWPE: 0,69.

Bei der Betrachtung der Spindeldrehzahl erwies sich eine mittlere Spindeldrehzahl von 1500-1800U/Min [1 S. 24f] als optimal. Bei zu niedrigen Drehzahlen tritt ein ungenügender Materialfluss in der Rührzone auf und führt zu Bindefehlern zwischen Grundmaterial und Schweißzone; bei einer zu hohen Drehzahl kommt es zu einem Verbrennen und einer Farbänderung des Materials. Das Eindringen von Luft in die Schweißung kann zu einer zusätzlichen Schwächung der Fügeverbindung führen. Die Vorschubgeschwindigkeit schien hingegen wenig Einfluss auf die Schweißnahtqualität zu besitzen. Die Schuhtemperatur allerdings erwies sich als ein kritischer Parameter (Tabelle 2).

Parameter	Max.	Min.
Spindeldrehzahl	Verbrennung Lufteinschlüsse	Material/ ungenügender Materialfluss/ Bindefehler
Vorschub	kaum Einfluss auf die Schweißnahtqualität	
Schuhtemperatur	thermischer Abbau	Schlechte Anbindung Rührzone-Grundmaterial

Tabelle 2: Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Schweißnahtqualität von ABS, PP; und HDPE[27]

An der BYU wurden erstmals Beobachtungen zum Bruchverhalten der Polymere durchgeführt: Schweißungen mit guten Festigkeitswerten brachen in der Schweißzone, während schwache am Rand der Schweißzone brachen. Bei der Betrachtung der Bruchflächen zeigte sich, dass das verrührte Material sich nicht richtig mit dem unverrührten Grundmaterial verbunden hatte[27 S. 1031ff].

3.2.2 Patent "Friction Stir Welding of Polymeric Materials"

2001 meldeten die Erfinder Nelson et al. von der BYU ihr Patent „Friction Stir Welding of Polymeric Materials“ als Worldpatent (01/85383) an.

Nelson beschreibt in dem Patent, warum sich für das FSW von Polymeren die konventionelle FSW-Pingeometrie als ungeeignet erwies. Probleme ergeben sich durch das unterschiedliche Verhalten von Polymeren und Metall (wie etwa die unterschiedliche Viskosität und Schmelztemperaturbereiche) und durch andere, polymerspezifische Eigenschaften.

Als Lösung bietet das Patent zum einen die schon bekannte, stehende Schulter an (Abbildung 13). Zusätzlich ließen sich Nelson et al. unterschiedlichste Pingeometrien und Vorrichtungen, etwa zum Orbital-FSW, durch das Patent schützen.

Im Patent sind sehr viele Vorstudien zum FSW von Polymeren enthalten. Die Schweißbarkeit unterschiedlicher Materialien wie HDPE, UHMW, PVC wurde nachgewiesen[1].

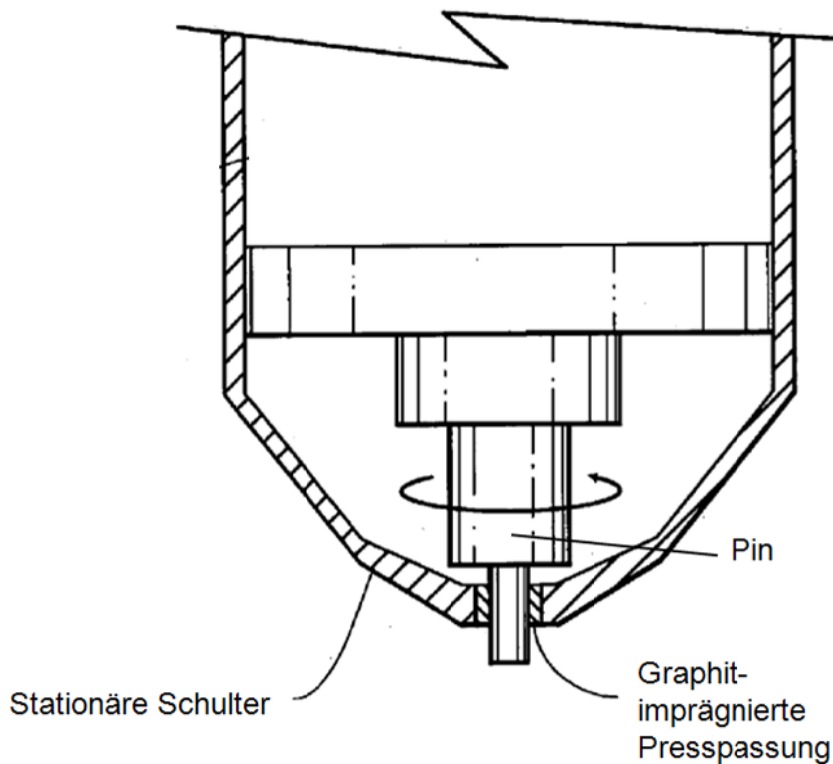


Abbildung 13: Prinzipskizze Patent FSW Tool für Polymere[1]

Zusammenfassend bietet das Patent folgende Erkenntnisse zum FSW von Polymeren an[1]:

1. Die Pindrehzahl ist ein signifikanter Prozessparameter für das FSW von Polymeren. Die Drehzahl muss hoch genug sein, um genügend Reib- und Verformungsenergie in das polymere Material einzubringen, um es zu plastifizieren. Die Werkzeugoberfläche übt zusammen mit der Geschwindigkeit einen deutlichen Einfluss auf die zu erreichende Schweißnahtfestigkeit aus. Eine größere Oberfläche führt zu einem höheren Energieinput und zu einer größeren Erwärmung durch Reibung. Die Reibung wird durch die Erhöhung der Kontaktfläche zwischen Pin und Material vergrößert, der Energieinput durch die höheren auftretenden Scherkräfte durch die geometrische Form des Pins. Ein höherer Energieinput scheint zu einer besseren Anbindung von verrührtem und unbeeinflusstem Grundmaterial in der Stirzzone zu führen.
2. Zwar ist das Risiko von thermischer Degradation beim FSW geringer als wie bei vielen anderen Schweißverfahren für Thermoplaste, doch kann es bei einer Kombination von langsamen Vorschubgeschwindigkeiten und hohen Pindrehzahlen auch hier zu thermischen Abbau der polymeren Moleküle kommen. Bei moderaten Spindeldrehzahlen bleibt dieses Risiko aber gering. Bei den Voruntersuchungen zeigte sich, dass bei vielen Polymeren Materialien durchaus Zug- und ca. 39-98% des Grundmaterials erreicht werden können (Tabelle 3).

Material	Base Material	Friction Stir Welding Results	
	Ultimate Tensile Stress (MPa)	Ultimate Tensile Stress (psi)	% base material Ultimate tensile stress
ABS	34,1	32,7	96
HDPE	22,5	21,5	95
PA (nylon)	72,4	28,4	39
PC	68,3	57,1	83
PMMA	42,0	21,5	51
PP	31,3	30,6	98
UHMWPE	28,8	20,0	69

Tabelle 3: Zugversuchsergebnisse für unterschiedliche Polymere [13 S. 50]

3. Das optimale FSW-Werkzeug besteht aus einem Pin mit Gewinde und einem beheizten Schweißschuh. Das Zusammenspiel dieser beiden Elemente führt dazu, dass das verrührte Thermoplast während des Fügevorganges in der Schweißzone bleibt.
4. Es kann angenommen werden, dass sich FSW auf sehr viele polymere Materialien anwenden lässt, da sich bereits in den Vorversuchen beinahe alle Materialien sich problemlos verschweißen ließen.
5. Zum Unterschied zum Schweißen von Aluminium weist FSW von Polymeren folgende Eigenheiten auf:
 - a. Polymere werden am besten mit einem feststehenden Schuh, am besten beheizt, verschweißt, um das Material in der Schweißzone zu halten.
 - b. Der FSW-Werkzeugkopf sollte parallel und nicht in einem Winkel zur Werkstückoberfläche angeordnet sein.
 - c. Beim FSW von Polymeren wird das Grundmaterial laut Nelson, partiell aufgeschmolzen, und nicht nur erweicht.
 - d. Die Kraft in vertikaler Richtung führt durch die viskoelastische Natur des Polymers dazu, dass das Material nach der Wegnahme des beheizten Schuhs sich wieder nach oben ausbreitet, und eine Wulstnaht ausbildet. Dies führt jedoch nur zu einer Beeinflussung der optischen, aber nicht der mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung.

Das Patent bietet eine umfangreiche Sammlung wertvoller Erfahrungen das FSW von Polymeren betreffend. Eine Recherche auf www.epoline.org ergab, dass das Patent in Europa mit 20/06/2007 wegen der Nichtbezahlung der Patentgebühren als zurückgezogen gilt.

3.2.3 FSW von PP

Auf der ANTEC Conference von 2003 präsentierten Sorensen et al. dann weitere Ergebnisse anhand von Schweißversuchen an PP mit 6mm Dicke mit einem beheizten Schuh (Abbildung 14).

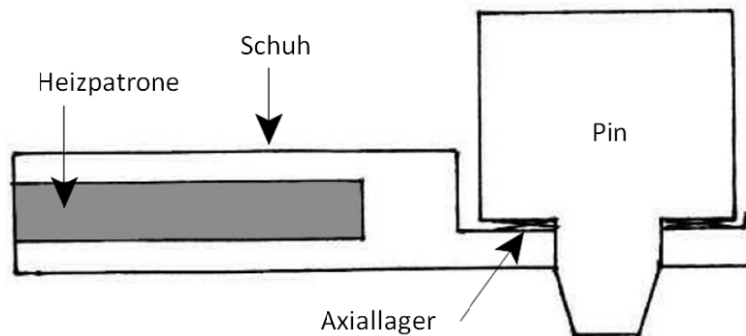


Abbildung 14: Werkzeug für das FSW von PP [7]

Um die Störung der polymeren Mikrostruktur durch das Schweißen möglichst gering zu halten, empfehlen die Autoren folgende Maßnahmen:

- Geringe Vorschubgeschwindigkeit (50-100 mm/min)
- Hohe Schuhtemperatur ($> 160^{\circ}\text{C}$)
- Haltezeit³ von länger als 90 Sekunden
- Pindurchmesser = $1,3 \cdot \text{Materialdicke}$

Bei Einhaltung dieser Parameter erreichte das Forscherteam eine ähnliche Anordnung und Größe der Sphärolite in der Schweißnaht wie im Grundmaterial. Es wurden keine ausgeprägten Fließ- und Wirbellinien in der Schweißzone mittels optischer Mikroskopie gefunden. Ein enger Bereich mit einer veränderten Sphärolit-Orientierung bildet sich an der Grenzfläche von Schweißgut und Grundmaterial. Werden diese Charakteristiken alle erfüllt, so ist laut Sorensen die Schweißmikrostruktur der Schweißzone jener des Grundmaterials so ähnlich, dass auferlegte Lasten optimal übertragen werden können[28 S. 408].

³ Haltezeit (pressure time): Jene Zeit, die das die abkühlende Schweißnaht unter Druck gehalten wird. [8 S. 1079]

3.2.4 FSW von Polyethylen

Arici[24] verschweißte erfolgreich Polyethylen mit einer mittleren Dichte (Medium Density PE, MDPE) mit einer beidseitigen Naht im Stumpfstoß. Er verwendete dazu ein konventionelles FSW-Werkzeug mit Schulter. Mithilfe dieser Methode konnte er den beim FSW von Polymeren häufig auftretenden Wurzeldefekt eliminieren. Zuerst wurde eine Seite verschweißt, dann wurde die halbverschweißte Platte umgedreht, noch einmal eingespannt und dann nochmals verschweißt (Abbildung 15).

Die Pinlänge wurde hierzu geringfügig länger als die Hälfte der Materialdicke gewählt. In den Querschliffen der FSW Naht wurden weder Risse, noch Poren beobachtet. Teilweise konnte eine Schweißnahtfestigkeit höher als die des Grundmaterials erreicht werden.

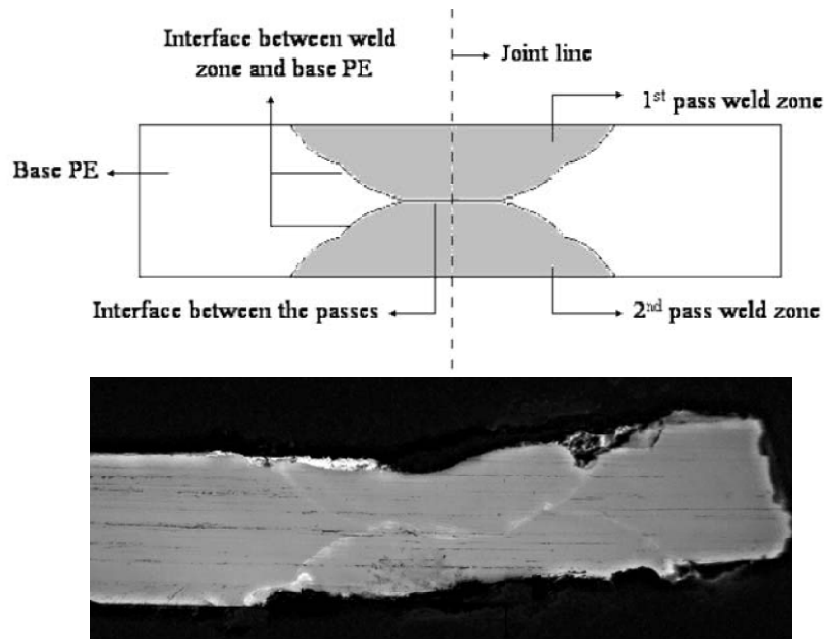


Abbildung 15: Schweißen von PE mittels beidseitigem FSW[24 S. 3315]

Hinzu kommt die Einstellung eines Werkzeugwinkels größer 0° (hier 1°). Dies führt laut Arici ebenso zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften der Verbindung, da durch den Winkel das Material am Herausfließen aus der Naht gehindert wurde[24].

Abbildung 16 zeigt anhand der Bruchlage die schwächsten Bereiche der Schweißnaht. Die höchsten Festigkeiten wurden bei einem Bruch außerhalb der Schweißzone im Grundmaterial (e) erreicht.

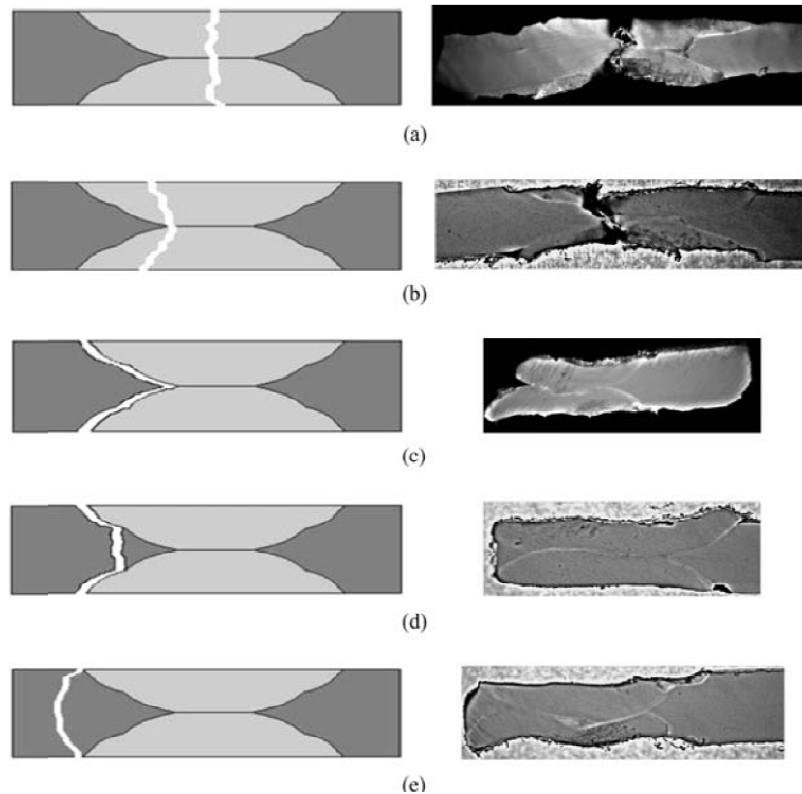


Abbildung 16: Unterschiedliche Bruchzonen beim beidseitigen FSW von PE nach dem Dreipunktbiegeversuch; Die besten Ergebnisse lieferten Bruchbild (e) vor Bruchbild (b) und (d); die schlechtesten Ergebnisse (a)[24 S. 3315]

3.2.5 Verschweißen von PP mit einem Fräswerkzeug

Kiss et al. [23 S. 15ff] führten 2007 an der Budapest University of Technology and Economics (BME) detaillierte Untersuchungen der Mikrostruktur von FSW-Nähten durch. Hierzu wurden 15 mm dicke PP Platten mit Hilfe einer Fräsmaschine mit Standard-Fräs Werkzeugen (Durchmesser: 8mm) verschweißt. Die Fräser wurden gegen die Schneidrichtung gedreht, was die Vermischung der Platten förderte. Der Vorversuch wurde mit einem 6-schneidigen Fräs Werkzeug (Steigung 30°) durchgeführt. Dabei wurden Zugfestigkeiten von 50% des Grundmaterials erreicht.

Die Kristallinität des Schweißnahtsaums und die anschließende Wärmeeinflusszone wurden mittels Differential Scanning Calorimetry (DSC) untersucht [23].

Mit dieser Methode kann die Änderung der Kristallinität in verschiedenen Bereichen der Schweißzone gemessen werden. Der kristalline Anteil wurde mittels der untenstehenden Formel berechnet.

Formel 1: kristalliner Anteil (Berechnung)

$$X_c = \frac{H_c}{H_{100\%}}$$

H_{100} : Schmelzwärme bei einem zu 100% kristallinem PP= 190J/g

H_c : lokale Schmelzwärme % X_c : % Kristallinität[5]

PP ist ein teilkristallines Polymer, und erstarrt in kristalline und amorphe Bereiche. Wie in Abbildung 17 ersichtlich, kommt es durch das FSW zu Strukturänderungen in der Schweißzone. Die Rührzone und die Grenzlinie der Rührzone zeigen einen deutlich höheren amorphen Anteil als die Matrix. Kiss erklärt dies damit, dass das im Verhältnis zur Naht große metallische Werkzeug sehr schnell Wärme aus dem Schweißgut absorbiert, was zu einem schnellen Abkühlen der Rührzone und somit zu einer reduzierten Kristallinität führt. Das geschmolzene Material an der grundmaterialeseitigen Grenzfläche hingegen befindet sich in größtmöglicher Distanz zum Werkzeug und kann somit langsamer abkühlen, was zu einem erhöhten Kristallisationsgrad führt.

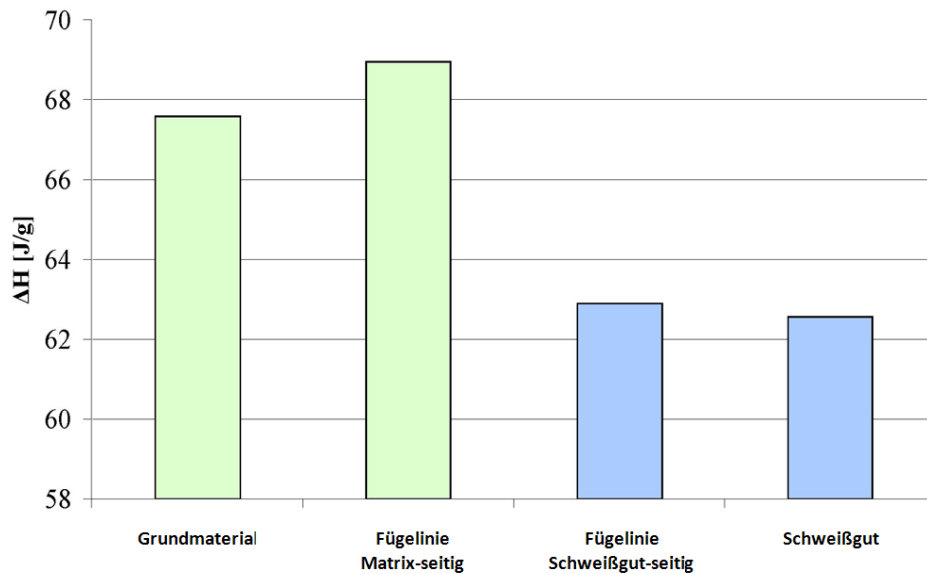


Abbildung 17: Verteilung der DSC-Schmelzwärme in der Fügezone von PP; deutlich ist die erhöhte Kristallinität in der matrixseitigen Wärmeinflusszone zu erkennen [23 S. 16]

Der Kristallinitätsunterschied an der Grenzlinie von Grundmaterial und Rührzone führt zu einer geringeren Anbindung in diesem Bereich, was sich versprödhend auswirkt. Wie in Abbildung 18 erkennbar ist, führt der Mangel an Bindekraft im Schweißsaum zu einer klaren Grenzlinie zwischen amorphen und kristallinen Bereichen. Die Schweißzone links zeigt deutliche Inhomogenitäten, während die Bruchfläche auf der Seite des Grundmaterials sich relativ gleichförmig präsentiert (duktileres Verhalten). Bereiche mit einer verringerten Kristallinität zeigen ein spröderes Bruchverhalten.

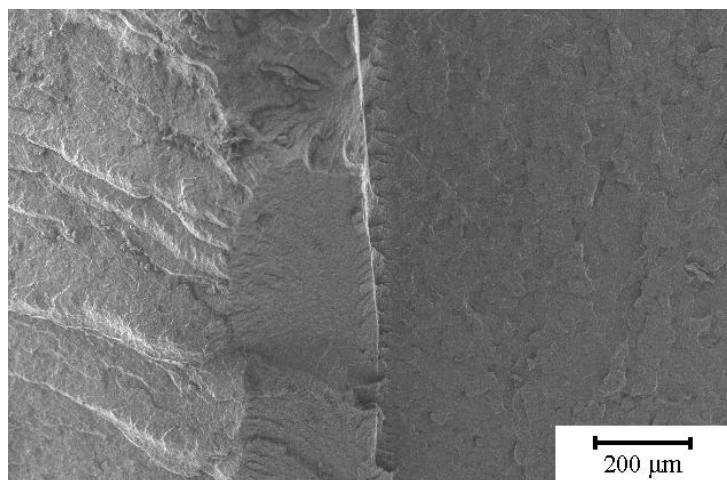


Abbildung 18: REM-Aufnahme der Bruchfläche der Schweißnaht, Schweißsaum links, Grundmaterial rechts [23 S. 16]

Aus diesen Beobachtungen schließt Kiss et al. [23], dass die mechanischen Kennwerte der Schweißung direkt mit der Ausbildung der Anbindung von Rührzone und Grundmaterial abhängen. Diese lässt sich zum einen von den Schweißparametern beeinflussen, aber auch die Werkzeuggeometrie scheint einen großen Einfluss zu haben.

Das Werkzeug soll zum einen Wärme mittels Reibung in das Material einbringen, zum anderen soll das Material in einer homogenen Weise verrührt werden. Zusätzlich soll die Nahtverbindung optimal ausgebildet werden. Kiss et al. [23] sieht in der Anzahl und der Form der Rillen am FSW-Werkzeug einen bedeuten Einflussfaktor auf die Fließeigenschaften des Polymers beim Schweißprozess. Das Werkzeug soll den optimalen Transport des teigigen Polymers in der Füge naht garantieren. Durch Testen verschiedener Rillenformen soll es zu einer Verbesserung des für eine optimale Verbindung

notwendigen Scher-Mischeffekts im zu verrührenden Material kommen. Durch die Orientierung der Rillen sollten optimale Strömungsverhältnisse im teigigen Schweißgut geschaffen werden. Die Rillen vergrößern die aktive Reibfläche des Pins, wodurch die Wärmeeinbringung verbessert wird. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden zwei unterschiedliche Pingeometrien miteinander verglichen, vgl. Abbildung 19.



Abbildung 19: Fräswerkzeuge, 8-gängig mit einem Steigungswinkel der Schneide von 15° (links) und 45° (rechts)[23]

Dabei zeigte sich, dass mit dem 45° Werkzeug deutlich höhere Schweißfaktoren erreicht werden konnten. Daraus folgt, dass eine höhere Anzahl von Rillen, dicht hintereinander angeordnet, zu einer besseren Schweißnahtqualität führt. Sehr deutlich zeigt dies der Querschliff der Rührzone in Abbildung 20. Laut Kiss et al. durchdringen sich die beiden unterschiedlich gefärbten PP-Platten in einer laminaren Ausprägung, und zeigen, ganz der Rotation des Fräswerkzeuges entsprechend, eine homogene Verteilung der beiden Fügepartner an [23 S. 15ff].

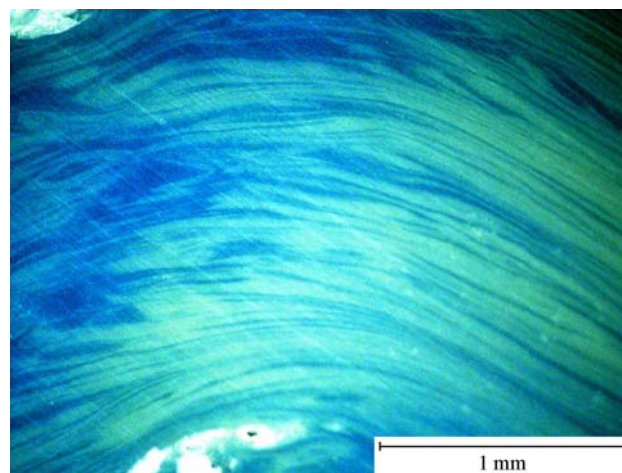


Abbildung 20: Querschliff der FSW-Schweißnaht, poliert; Vermischung der beiden Fügepartner (PP-Platten; links blau, rechts grau)[23 S. 18]

3.2.6 FricStion Stir Joining von Polypropylen

2007 veröffentlichten Mattapelli et al.[5] die FSJ-Ergebnisse ihrer zweijährigen Versuche an der South Dakota School of Mines and Technology (SDSM&T) mit dem Werkstoff PP. Der Begriff „Friction Stir Joining“ in Zusammenhang mit dem Rührreißschweißen von Thermoplasten wurde von Prof. Arbegast von der SDSM&T geprägt, um eine sprachliche Abgrenzung zum konventionellen Friction Stir Welding zu schaffen.

Folgende Gründe sprachen dafür, ebenso wie die Forscher an der BYU den Werkstoff PP für die Versuche zu verwenden: Zunächst versprach man sich eine Weiterentwicklung der FSJ Technik, PP ist

eines der billigsten polymeren Materialien, und es wurden damit die bisher höchsten Verbindungsfestigkeiten erreicht. Um die Versuche durchführen zu können, wurde ein ähnliches Werkzeug wie an der BYU entwickelt. Hierzu wurde ein mehrteiliges Werkzeug, bestehend aus Pin, Pinhalterung und einem beheizten Schuh konstruiert, welches an einer konventionellen Fräsmaschine montiert wurde (Abbildung 21).

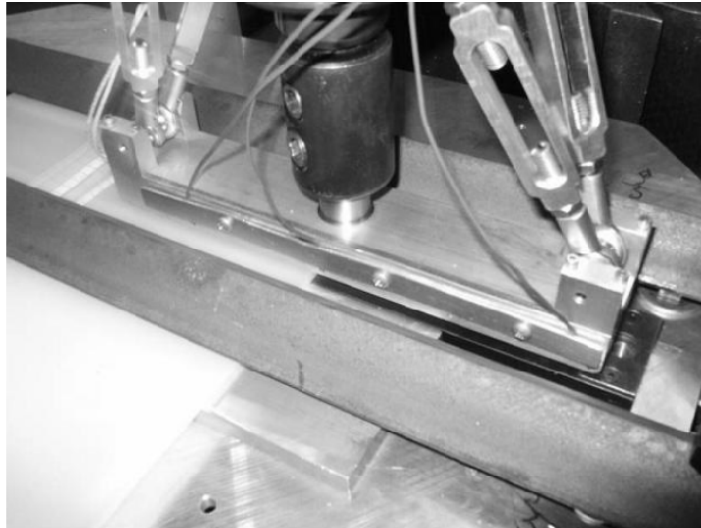


Abbildung 21: FSW-Werkzeugkonzept an der SDSM&T: Überblick[5]

Der Pin wurde aus H13-Werkzeugstahl gefertigt; die freie Pinlänge betrug 6 mm. Der Pin hat einen Durchmesser von 9,5 mm an der Oberseite, verjüngt sich auf einen Durchmesser von 3 mm an der Pin Spitze. Mattapelli et al. verwendeten in ihren Versuchen drei verschiedene Pinspitzen mit unterschiedlichen Gewindegängen, in den Qualitäten fein, mittel und grob (Abbildung 22).

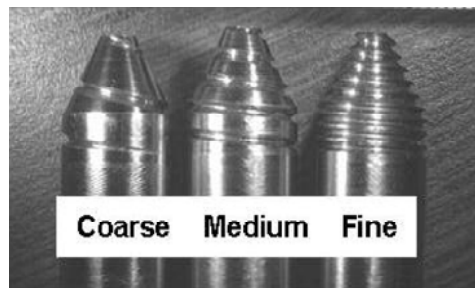


Abbildung 22: Pingeometrien mit unterschiedlichem Abstand der Gewindegänge: Coarse (4,2 mm), Medium (2,1 mm) und Fine (1 mm) [5]

Das Pinwerkzeug wurde in eine so genannte „Schulter“ eingeklemmt (Abbildung 23). Diese Schulter fungierte als Halter für den Pin. Der beheizte Schuh wurde am Werkzeugkopf des Fräasers mittels einer Klemmvorrichtung und 4 Spannschlössern befestigt. Weiters wurde eine spezielle Aufspannplatte für das Material entworfen, um eine optimale Einspannung der Platten zu gewährleisten. Die Platten selbst waren 6.4 mm (0.25 Inch) dick.

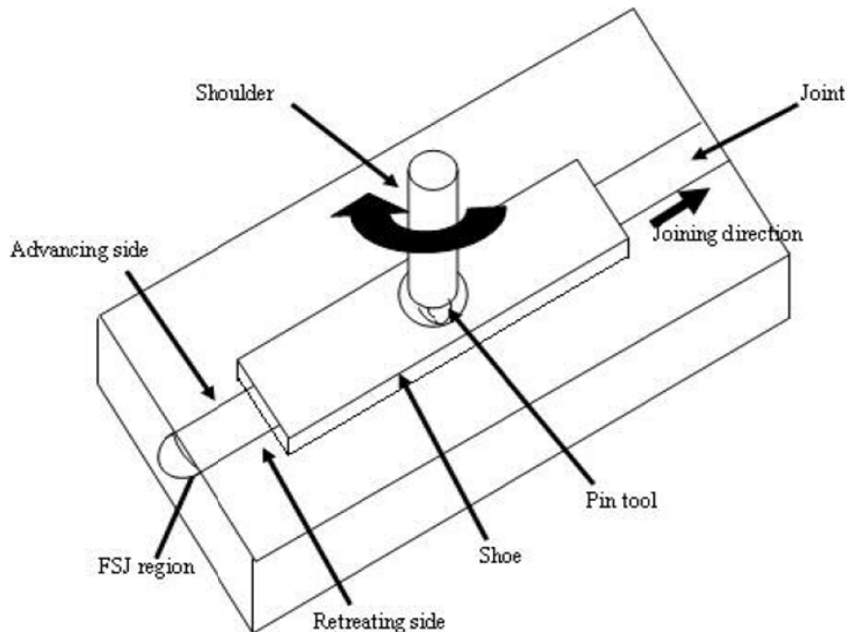


Abbildung 23: FSJ-Werkzeug an der SDSM&T: Funktionsprinzip[5]

Eine Anfrage bei Professor Arbegast von der SDSM&T ergab, dass die Schweißversuche sowohl im vollen Plattenmaterial als auch mit zwei bündig aneinander liegenden Platten durchgeführt wurden⁴. Der vordere Teil des Schuhs wurde mit einer Heizpatrone beheizt, um Wärme in das Material unterhalb einbringen zu können. Zusätzlich soll der Schuh dafür sorgen, dass das vom Pin verrührte Material in der Fügezone bleibt. Eine zusätzliche Temperaturregeleinheit wurde installiert um die Solltemperatur des Schuhs kontrollieren zu können. Die Temperaturen an der Heizeinrichtung und dem Pin wurden gemessen.

In Tabelle 4 sind jene FSJ-Parameter aufgeführt, welche bei den Versuchen am SDSM&T untersucht wurden. Es waren dies die Spindeldrehzahl und der Vorschub des Tisches, auf welchem die PP-Platten eingespannt wurden. Weiters wurde der Effekt der Vorwärmtemperatur und –zeit auf die Qualität der Schweißung untersucht.

Parameters	Range	Values of good visual joint
Rotation speed of the pin tool	900 - 3000 rpm	3000 rpm
Travel speed of the table	38.1-241.3 mm/min (1.5 – 9.5 inch/min)	38.1 mm/min (1.5 inch/min)
Pre-heat temperature	120 - 175°C	120°C
Pre-heat time	30 – 500 secs	200 secs
Pin tool thread pitch (PTTP)	1, 2.1 & 4.2 mm	4.2 mm
Constant pin tool (penetration) ligament	0.5 mm	0.5 mm
Constant shoe pressure	5.6 mm (0.22 inches)	5.6 mm (0.22 inches)

Tabelle 4: FSJ-Prozessparameter, Wertebereiche und optimierte Prozessparameter[5]

Bei den Untersuchungen blieben der Abstand zwischen der Pinspitze und der Aufspannplatte mit 0.5mm, sowie der Abstand zwischen der Schuh-Unterseite und der Aufspannplatte mit 5.6mm konstant.

⁴ Email von Arbegast am 18. Mai 2009

Die besten optischen Ergebnisse lieferten die maximale Spindeldrehzahl (3000rpm) in Kombination mit der geringsten Vorschubgeschwindigkeit (38.1mm/min), sowie eine möglichst geringe Vorheiztemperatur (120°C). Eine Untersuchung mit Thermoelementen auf der Rückseite der PP-Platten zeigte auf, dass sich nach ca. 200 Sekunden Vorheizzeit ein pseudo-stationärer Zustand einstellt. Als optimale Gewindeform auf der Pinspitze zum Erreichen eines optisch ansprechenden Ergebnisses erwies sich die „grobe“ Variante mit einer Steigung von 4,2mm.

Der Zugversuch ergab eine signifikante Reduktion der Bruchdehnung von ca. 180% bei nicht verschweißtem PP auf ca. 10% bei rührreibverschweißtem PP (Tabelle 5). Hierbei erwies sich die Pinspitze mit dem „feinen“ Gewinde als optimal.

Material	Pin tool thread pitch (mm)	Average tensile strength (MPa)	% FSJ material tensile strength w.r.t. base material tensile strength	% Elongation
Pure PP		34.9	100	180
Friction Stir Joined PP	4.2	30.9	89	9.3
	2.1	32.2	92	12
	1	30.8	88	10

Tabelle 5: Durchschnittliche Zugfestigkeit und Bruchdehnung des unverschweißten PP-Grundmaterials im Vergleich mit drei, mit unterschiedlichen Pindesigns verschweißten FSW-Proben [5]

Beinahe alle Proben brachen auf der Retreating Side⁵. Diese verminderte Duktilität wurde auf eine lokale Änderung der Kristallinität durch den Wärmeeinfluss des FSW-Verfahrens im Material zurückgeführt. Die FSW-Proben brachen alle spröde, ohne faserige Ausdehnung des Grundmaterials. Um diese Hypothese zu testen, wurde an verschiedenen Stellen im polymeren Material eine Messung der Schmelzwärme mittels DCS (Differential Scanning Calorimetry) durchgeführt (Formel 1, Kapitel 3.2.5).

Es wurden in einer Tiefe von 0.1 mm unterhalb der Schweißnahtoberfläche Proben entnommen, zunächst in der Schweißnahtmitte, an der Grenzfläche von Rührzone und unverrührtem Material, unterhalb des beheizten Schuhs und außerhalb der Wärmeeinflusszone. Als Vergleich wurden Proben aus dem Grundmaterial in einem Abstand von 4 Inch (101,6mm) entnommen. Die Ergebnisse der Kristallinitätsmessungen sind in Tabelle 6 aufgelistet, Abbildung 24 gibt einen graphischen Überblick.

Sample region	Position (inches)	Average Percent Crystallinity	SD
Center of the FS joint	0	30.03	2.67
Interface of the FS joint and non-processed material	0.2	32.95	14.27
With in the shoe	0.63	29.59	4.07
Outside the heat effected zone	1.19	32.63	2.52
Untreated PP	4	32.05	1.31

Tabelle 6: Durchschnittliche Kristallinität und Standardabweichung in Bereichen der FSW-Schweißzone[5]

⁵ Beinahe alle FSW-Proben brechen im Zugversuch auf der Retreating Side. Diese Seite weist prozessbedingt mehr Poren auf, verursacht durch den ungenügenden Materialfluss auf der RS wegen des verminderten Geschwindigkeitsvektors. (Figner, G.)

Deutlich ist die erhöhte Standardabweichung für die Kristallinitätsmessungen im Grenzbereich zwischen Rührzone und Grundmaterial erkennbar (Abbildung 24). Die Schwankungen betreffen genau jenen Bereich, in welchem der größte Teil der Proben brach.

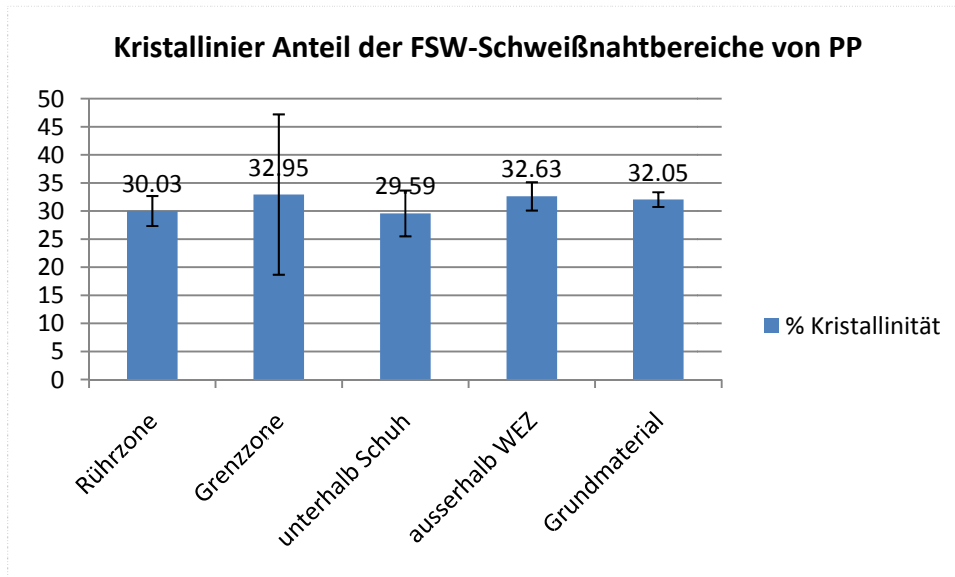


Abbildung 24: Kristalliner Anteil der FSW Schweißnahtbereiche von PP, nach[5]

Den Abschluss der Untersuchungen bildete eine Analyse der Bruchflächen auf der Advancing Side mittels REM. Matapelli unterscheidet zwischen zwei Sprödbbruchtypen: Typ 1 zeigt eine raue Oberfläche mit Plateaus, während Typ 2 eine gewisse Glätte der Sprödbbruchfläche zeigt (Abbildung 25).

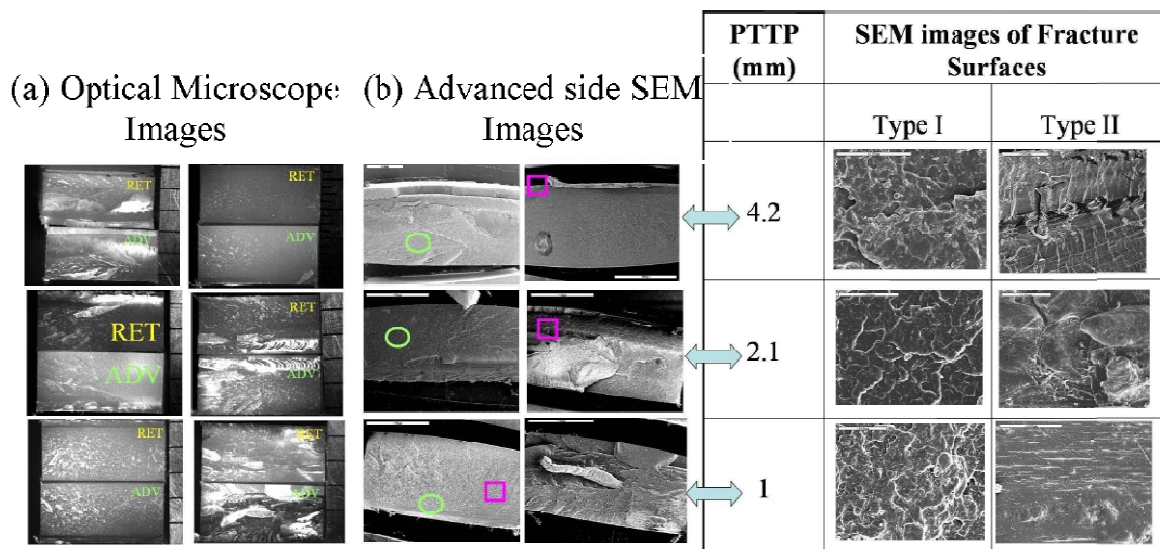


Abbildung 25: Bruchflächenanalyse von PP mittels optischer und Rasterelektronen-Mikroskopie; PTTP bezeichnet die verschiedenen Pingeometrien (coarse, medium, fine) [5]

Auf den Bruchflächen wurde kein Anzeichen für ein duktiler Bruchverhalten, wie es dem PP-Grundmaterial entsprochen hätte gefunden.

3.2.7 In-Line oder Vertical Reciprocating FSW von Polymeren

Am TWI wurden 1993 unter der Bezeichnung "Vertical Reciprocating FSW" Versuche mit einer sich hin- und her-bewegenden Klinge durchgeführt (Abbildung 26). Diese ergaben jedoch, dass durch die

Auf- und Ab- Bewegung der Klinge zu viel Material aus der Schweißfuge heraus befördert, was zur Löcherbildung in der Schweißnaht und zu entsprechend reduzierten Festigkeiten führt[21].

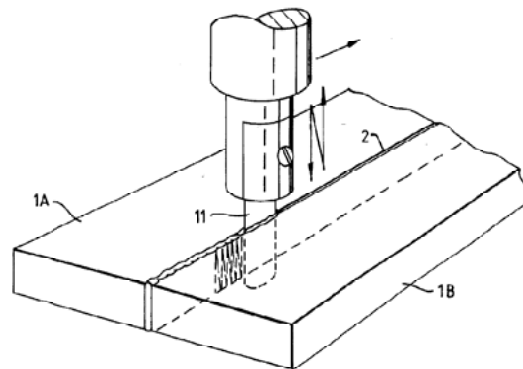


Abbildung 26: Prinzip Vertical Reciprocating FSW[29]

2004 veröffentlichte ein indisches Forscherteam um Panneerselvam et al.[25] Ergebnisse von Schweißversuchen mit Acryl-Platten, welche mittels einer umgebauten Sägemaschine durchgeführt wurden (Abbildung 27a). Ausgegangen wurde dabei von Beobachtungen, die zeigten, dass die oszillierenden Bewegungen des Sägeblattes beim Schneiden von Polymeren die Schnittländer durch Reibung anschmolzen. Bei den Versuchen wurde das Sägeblatt durch einen Draht aus HSS ersetzt. Die Acrylplatten wurden durch die Wärmeentwicklung bei der oszillierenden Bewegung des Drahtes gefügt. Diese Reibungswärme erweichte die Ränder der Acrylplatten, die sich hinter dem Draht wieder verfestigten, und so zu einer Schweißverbindung führten (Abbildung 27b).

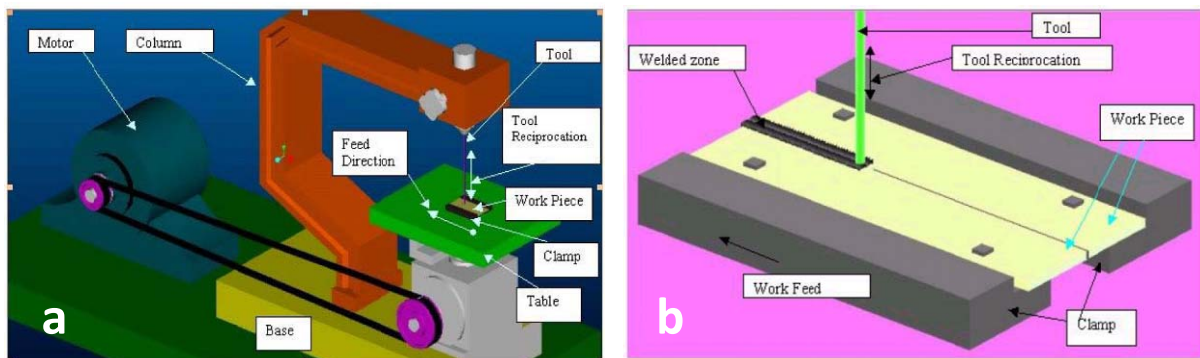


Abbildung 27: (a) Equipment und (b) Versuchsaufbau der Schweißversuche mit „Frictional Vibration“ [25 S. 5]

Die Zugversuche ergaben, dass durch Reibungs-Vibrationsschweißen (Frictional Vibration Welding) ein Schweißfaktor von etwa 0.8 erreicht werden konnte. Die verminderte Schweißnahtfestigkeit ist vor allem auf die Poren in der Fügezone und schlechte Vermischung des Materials in der Schweißnaht zurückzuführen (Abbildung 28)[25].

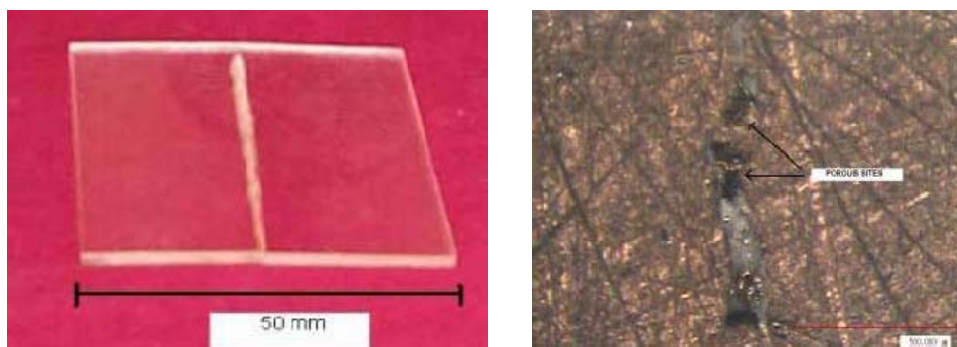


Abbildung 28: Typische Verbindung bei „Frictional Vibration Welding“[25 S. 5]

Als Konsequenz der bekannten Probleme beim "Vertical Reciprocating FSW" wurde das Verfahren 2007 am TWI in Cambridge als „In-line reciprocating friction stir welding“ weiterentwickelt. Dabei wird eine Klinge (Viblade™) im Fügespalt in Schweißrichtung linear hin- und her-bewegt. Oberhalb wird eine feststehende Schulter mittels einer vertikalen Kraft auf die Fügestelle gepresst (Abbildung 29 links).

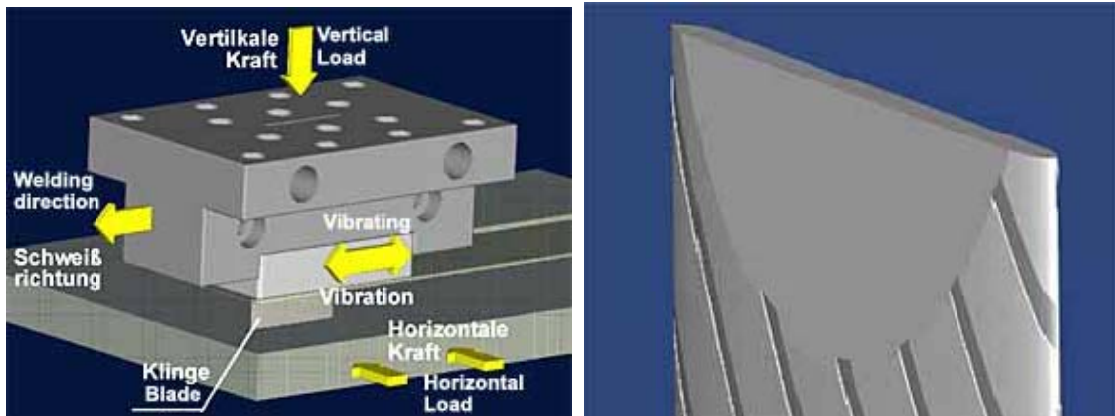


Abbildung 29: Verschweißen von Polymeren mit Viblade™: Vorrichtung und optimierte Geometrie der Titanklinge[21]

Der große Vorteil dieses Verfahrens ist, dass die Klinge während des ganzen Fügeprozesses komplett in der Schweißnaht verbleibt, und das Material theoretisch nicht aus dem Fügespalt heraus befördert werden kann. Zusätzlich behindert die Schulter den Materialfluss nach oben. Die gesamte Wärme zum Fügen wird durch Reibung der Klinge in das Material eingebracht. Die Forschungsgruppe am TWI testete anhand von 9mm dicken PP-Platten das Potential dieser FSW-Variante zum Fügen für Thermoplaste aus.

Dabei wurde großes Augenmerk auf die Werkstoffwahl der Klinge und der Schulter gelegt. Das Viblade™-Werkzeug besteht aus einer Teflon (PTFE) Schulter in Kombination mit einer Titanklinge (Abbildung 29 rechts). Titan besitzt eine relativ geringe Wärmeleitfähigkeit, womit die Wärmeverluste in der Fügezone möglichst gering gehalten werden können. Um den Reibungskoeffizienten zwischen dem PP und der Klinge zu verbessern, wurden Riefen an der Klinge angebracht. Zusätzlich wurde die Klinge abgeschrägt.

Eine Untersuchung mittels DOE ergab, dass die Haupteinflussparameter dieses Verfahrens die Klingenlänge, die Dicke der Klinge, die vertikal und horizontal aufgebraachte Kraft und die Vorschubgeschwindigkeit sind. Die Biegeversuche nach DVS 2203-1 ergaben, dass die Schweißungen (Abbildung 30) mittels Viblade™ durchaus die Mindestanforderungen für Warmgas- und Extrusionschweißungen bei vergleichbaren Schweißgeschwindigkeiten erfüllen [21].



Abbildung 30: Optimiertes Nahtaussehen und Querschliffe typischer Viblade™-Schweißungen[21]

3.2.8 FSW von faserverstärkten Thermoplasten

Zum Friction Stir Welding von faserverstärkten Thermoplasten findet sich eine einzige Literaturstelle, nämlich das US-Patent 0156411 „*Friction Stir Welding of Fiber Reinforced Thermoplastics*“ von Juni 2008 der Erfinder Manicke und Helder[26]. Darin beschreiben die Autoren FSW als eine Methode, mit der es möglich ist, faserverstärkte Platten miteinander zu verbinden und gleichzeitig eine zufällige Faserorientierung in der Naht zu erreichen. Über den Werkstoff machen die Autoren jedoch keine Angaben.

Thermoplastische Verbundwerkstoffe mit Kurzfasern besitzen durch die wahllos angeordneten Verstärkungsfasern isotrope Eigenschaften, und vereinigen die Vorteile eines geringen Gewichts bei guter Festigkeit.

Bei den üblichen Schweißmethoden für Thermoplaste werden die Fügeteile geschmolzen oder mittels Wärmeeinbringung angeschmolzen. Laut den Autoren kommt es bei der Verflüssigung („Fluid flow“) während des Schweißens zu einer Störung der ursprünglichen Anordnung der Fasern, so dass in dem Bereich Schweißnaht nur die Festigkeit der Matrix erreicht werden könne. Der verstärkende Effekt der wahllos angeordneten Kurzfasern gilt nicht für die Schweißnaht. Mittels Friction Stir Welding soll laut Patentschrift erreicht werden, dass die Verstärkungsfasern in einer dreidimensional zufälligen Anordnung in der Matrix der Schweißzone vorliegen (Abbildung 31).

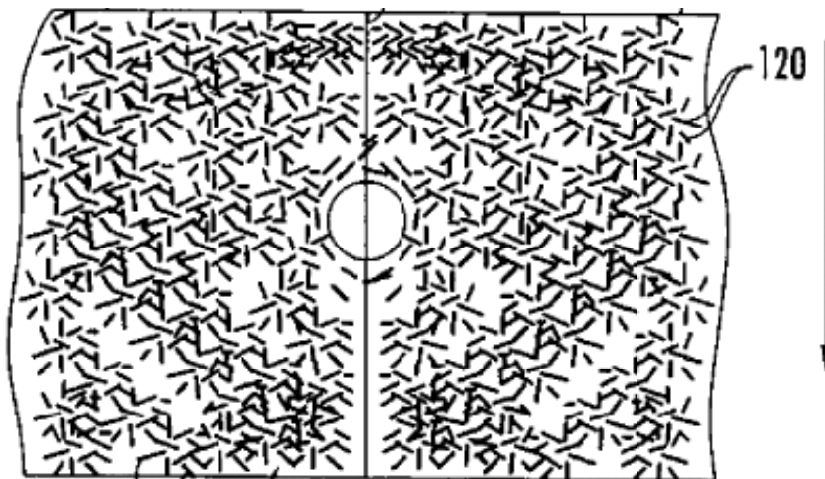


Abbildung 31: Prinzipskizze Friction Stir Welding of Fiber Reinforced Thermoplastics. Angeben sind die Schweißrichtung und die Faserorientierung in den beiden zu verschweißenden Thermoplasten vor (unten) und nach (oben) dem FSW[26]

Die Verstärkungsfasern in dem Patent haben eine Länge von etwa 1mm und einen Durchmesser von 1-25 μ . Die Werkzeuggeometrie des patentierten Pins sowie die in der Patentschrift genannten Schweißparameter sind in Tabelle 7 dargelegt. Manicke und Helder beschreiben den Vorgang des FSW folgendermaßen: das zylindrische Werkzeug mit Schulter und Pin dreht sich und wird mit einer definierten Kraft gegen die zu fügenden faserverstärkten Thermoplaste gedrückt. Die Reibung zwischen dem Pin und den beiden Fügeteilen bringt das Material zum Fließen, ohne zu schmelzen.

Werkzeuggeometrie	
Schulter ϕ D [mm]	10.7
Pin ϕ d [mm]	6.4
Pinlänge l [mm]	2.8
Gewinde	linksgängig
Schweißparameter	
Drehzahl [U/min]	700-900
Vorschub [mm/min]	100
Kraft auf Pin [kN]	4,89-6,23

Tabelle 7: Parameter Friction Stir Welding of Fiber reinforced Thermoplastics[26]

Durch den beim Fügeprozess auftretenden Temperaturgradienten können, ausgehend von der Fügestelle nach außen hin folgende drei Zonen unterschieden werden: die Rührzone (Stirzone), die thermomechanische Einflusszone und die wärmebeeinflusste Zone. Die Dimensionen dieser Zonen werden durch die thermischen Eigenschaften der Fügepartner bestimmt, ebenso durch deren Gestalt und Abmessungen.

In der Rührzone kommt es um den Pin wie in einem Wirbel zu einem spiralförmigen, zirkulären Fluss der Matrix. Da sich die Matrix laut Manicke und Helder in einem flüssigen Zustand befindet, können sich die Verstärkungsfasern frei mit dem Fluss bewegen. Die Fasern werden rund um die Peripherie des Pins mitgenommen. Es wurde herausgefunden, dass Verstärkungsfasern dazu tendieren, ihre longitudinale Achse parallel an den Schergradienten im Material anzunähern. Daher werden die Fasern dazu tendieren, tangential zur Fließrichtung ausgerichtet zu sein.

In der thermomechanische Einflusszone kommt es bereits zu einem verminderten Fasertransport. In dieser Zone orientieren sich die Fasern parallel zu einer beweglichen Scherebene normal zu der Fügelinie. Im Gegensatz zu anderen Methoden zum Verschweißen verstärkter Thermoplaste bleiben die Fasern in der Nähe der Fügezone. Nachdem das FSW-Werkzeug den zu fügenden Bereich verlassen hat, kühlt die Rührzone ab und verfestigt sich. Die einzelnen Fasern bleiben in den Orientierungen und Lagen fixiert, in welchen die abkühlende Matrix sie „einfängt“. Manicke und Helder postulieren, dass durch die Veränderung einzelner FSW – Parameter auf die endgültige Orientierung der Fasern Einfluss genommen werden kann. Sie geben weiters an, dass die fertige Schweißnaht eine glatte Oberfläche aufweist und es durch die optimale Verteilung der Fasern es keine Schwächung der gefügten Bauteile an der Fügenaht gäbe[26].

Arbagast von der South Dakota School of Mines gab 2007 im Buch „Friction Stir Welding and Processing“(ASM, 2007) an, zusammen mit dem Airforce Forschungslabor Kirtland an einem Projekt zum Schweißen von Faser-, Partikel- und Nanogefüllten polymeren Werkstoffen zu arbeiten[15 S. 302f].

3.2.9 Zusammenfassung

Ein großes Problem beim FSW von Polymeren besteht darin, dass das Material nicht in der Fügezone bleibt, sondern herausgeschleudert wird. Dieser Materialschwund führt zur Entstehung von Löchern in der Schweißzone. Weitere Schwierigkeiten sind die geringen bisher angewandten Schweißgeschwindigkeiten, teilweise kommt es zu einer uneinheitlichen Vermischung entlang der Schweißnaht, meist verbunden mit einer schlechten Oberflächenqualität der Schweißnaht.

3.3 Eigenschaften der glasfaserverstärkten Thermoplaste

Das folgende Kapitel soll einen Überblick über die Werkstoffe im Allgemeinen, und den Einfluss der Faserverstärkung auf die spezifischen Eigenschaften der verwendeten Materialien geben. Kunststoffe besitzen eine zunehmende Bedeutung als Konstruktionswerkstoffe. So besteht etwa der neue Airbus A350 XWB zu mehr als der Hälfte aus Verbundwerkstoffen (Abbildung 32, links). Diese sind zum größten Teil kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe, aber auch glasfaserverstärkte Güten, wie etwa am Flugzeugheck des A380-800 (Abbildung 32, rechts).

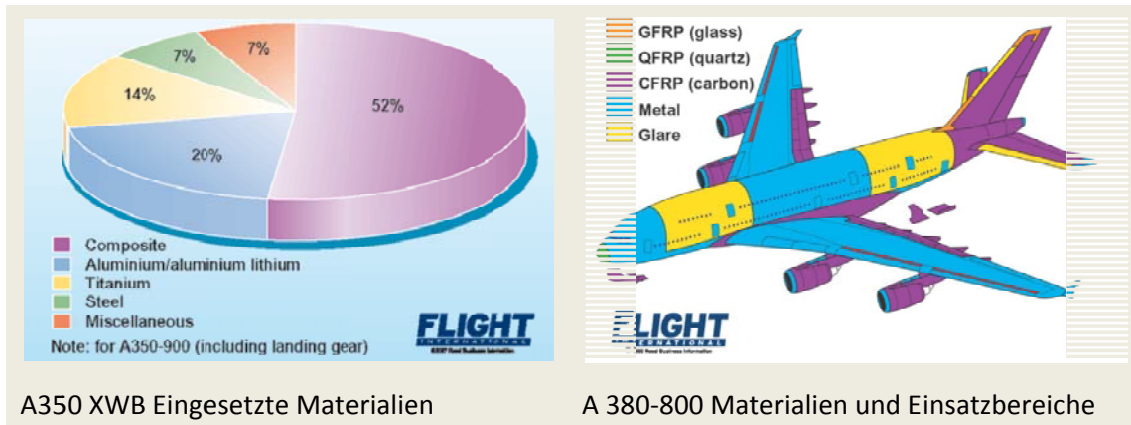


Abbildung 32: Zunehmende Bedeutung von thermoplastischen Faserverbunden in der Werkstoffwahl für den Flugzeugrumpf; Darstellung anhand der Materialverteilung bei A350XWB (links) und A380-800(rechts)[30]

Die Haupteinsatzbereiche von thermoplastischen und duroplastischen Verbundwerkstoffen als Konstruktionswerkstoffe liegen im Transportwesen, der Luftfahrt und im Schiffsbau. Hier werden zunehmend Bauteile aus Metall durch Kunststoffbauteile ersetzt. Dies ist vor allem auf das gute Verhältnis von Festigkeit bzw. Steifigkeit zu Gewicht der Verbundwerkstoffe im Vergleich zu den Metallen zurückzuführen. Durch die höheren, spezifischen Eigenschaften der Polymere kann im Vergleich zu metallischen Werkstoffen Gewicht eingespart werden und Nutzlasten können erhöht werden. Der Einsatz- und Arbeitsbereich von Bauteilen kann erweitert werden und das mechanische Verhalten der Strukturen wird verbessert[3 S. 303ff]. Abbildung 33 zeigt schematisch einen Überblick der wichtigsten werkstoffkundlichen Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffen im Vergleich zu Stahl und anderen Konstruktionswerkstoffen.

Einordnung der Eigenschaften von Kunststoffen

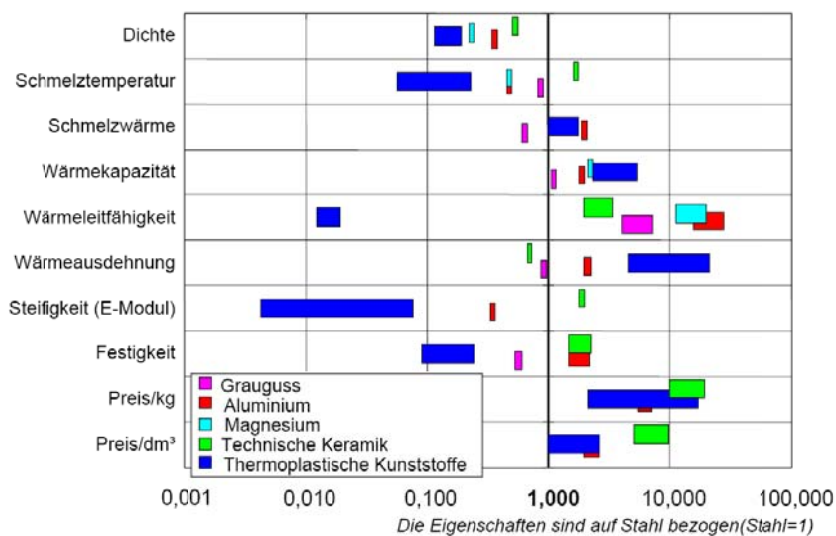


Abbildung 33: Einordnung der Eigenschaften von Kunststoffen im Vergleich zu Stahl (=1)[31 S. 38]

Im Unterschied zum atomaren Aufbau der Metalle besitzen die Kunststoffe durch Ihren molekularen Aufbau folgende charakteristische Eigenschaften:

- relativ niedrige Festigkeit (ohne Verstärkungen)
- niedriger Elastizitätsmodul (geringe Steifigkeit)
- Zeitabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften (Entspannen – Kriechen)
- starke Temperaturabhängigkeit der Eigenschaften, besonders bei Thermoplasten
- hohe Wärmeausdehnung
- geringe Wärmeleitfähigkeit
- gute elektrische Isoliereigenschaften
- gute Beständigkeit
- teilweise physiologische Unbedenklichkeit
- teilweise ausgezeichnete Gleiteigenschaften, auch ohne Schmierung[32 S. E76ff]

Im Vergleich mit Metallen besitzen Kunststoffe die folgenden Nachteile:

- Geringe Steifigkeit und Zugfestigkeit
- Die Formbeständigkeit ist infolge des hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten und starker Wasserabsorption nicht gegeben.
- geringe Kerbschlagzähigkeit beim Bruch
- niedrige Höchst-Betriebstemperatur
- geringe Kriechfestigkeit
- geringe Härte und Kratzfestigkeit[33 S. 533ff]

Trotz dieser Nachteile besitzen Kunststoffe im Vergleich zu den meisten Metallen ein besseres Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht. Im Unterschied zu den meisten metallischen Werkstoffen können Verbundwerkstoffe mit anisotropen Eigenschaften hergestellt werden und somit in Bereichen mit hoher Belastung beanspruchungsgerecht eingesetzt werden; hiermit kann ein nochmals höheres Verhältnis von Festigkeit zu Gewicht erreicht werden. Ebenso können Kunststoffe als zähe, viskoelastische Materialien hohe Verformungen ertragen, bevor es zum Bruch kommt.

Mittels Füllstoffen und Additiven kann ein hoher Widerstand gegen Umwelteinflüsse erreicht werden. So werden Kunststoffe häufig für Chemikalienbehälter eingesetzt, da sie chemisch beständige, leichte Werkstoffe sind. Ein weiterer Vorteil ist die leichte Verarbeitbarkeit; Thermoplaste können mittels Spritzgießen in komplexe Formen gebracht werden, das Recycling ist einfach und kann oft in den Herstellungsprozess mit eingebunden werden[1].

Die vorliegende Diplomarbeit beschäftigt sich mit einer Untergruppe dieser modernen Konstruktionswerkstoffe, den glasfaserverstärkten Thermoplasten. Thermoplastische Verbundwerkstoffe zeichnen sich durch einen hohen Widerstand gegen Korrosion und Lösungsmittel, hohe Bruchzähigkeitswerte, eine hohe Kerbschlagzähigkeit und Dauerfestigkeit aus[3 S. 303ff].

Die folgenden Kapitel geben eine kurze Übersicht über die Eigenschaften und Eigenheiten der amorphen und teilkristallinen Thermoplaste und die Einordnung dieser Werkstoffe in die große Gruppe der Polymere.

3.3.1 Polymere

Kunststoffe sind künstlich hergestellte Werkstoffe, die mit chemischen Verfahren entweder durch Umwandlung von Naturstoffen oder aus niedermolekularen Stoffen „synthetisch“ aufgebaut werden[34 S. 9]. Sie sind organische Verbindungen und basieren auf der Fähigkeit des Kohlenstoffatoms, durch Bindung mit anderen Kohlenstoffatomen lange, kettenförmige Moleküle (Makromoleküle) zu bilden[35].

„Polymere sind Substanzen mit Molekülen, die aus sich wiederholenden konstitutiven Einheiten bestehen - so groß, dass sich die Eigenschaften nicht ändern würden, wenn man einige wenige dieser Einheiten hinzufügt oder entfernt“[35]⁶.

Wie die beiden Definitionen zeigen, sind Kunststoffe/Polymere organische, hochmolekulare Werkstoffe, die größtenteils synthetisch hergestellt werden. Dies geschieht durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition von Polymeren aus Monomeren. Daher stammt die Bezeichnung „Polymerwerkstoffe“. Als Monomere werden molekulare Substanzen bezeichnet, die Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O) sowie Stickstoff (N), Chlor (Cl), Schwefel (S) und Fluor (F) enthalten[32 S. E76].

3.3.2 Einteilung der Polymere

Kunststoffe können durch ihren molekularen Aufbau charakterisiert werden. Dieser beeinflusst in hohem Maße die Struktur und somit die physikalischen Eigenschaften (Abbildung 34). Unterschieden wird zwischen linearen und vernetzten Kettenmolekülen (Makromoleküle).

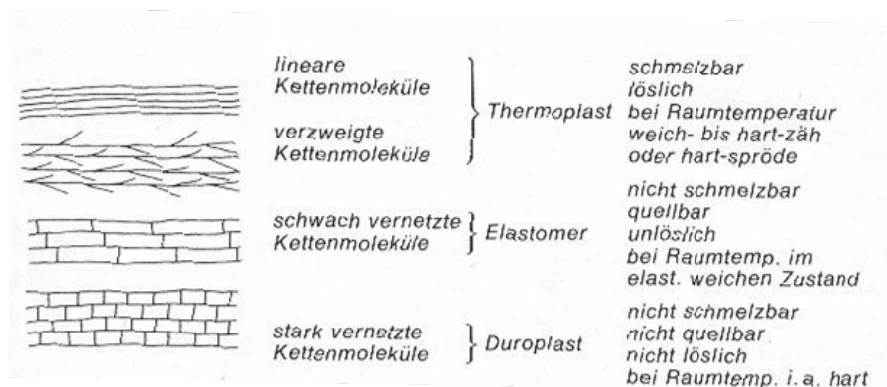


Abbildung 34: Schematische Darstellung der Anordnung der Kettenmoleküle in Kunststoffen und deren Eigenschaften [36]

Lineare Polymere oder lineare Makromoleküle mit kurzen Seitenketten (Verzweigungen) werden als Thermoplaste bezeichnet. Diese oftmals sehr langen Molekülketten werden durch zwischenmolekulare Kräfte im festen Verbund zusammengehalten. Diese Werkstoffe zeichnen sich durch ihre wiederholte Schmelzbarkeit und Löslichkeit aus, da die Kettenmoleküle durch Wärme/ Lösungsmiteleinfluss aneinander abgleiten können. Sind die einzelnen Kettenmoleküle hingegen durch Querbrücken miteinander vernetzt, so können die Polymerketten auch bei erhöhter Beweglichkeit nicht mehr aneinander abgleiten. Dies führt zu veränderten Eigenschaften, wie etwa bei Elastomeren zu einer sehr starken reversiblen Verformbarkeit aufgrund der schwach vernetzten Kettenmoleküle. Duroplaste hingegen besitzen wegen der engmaschigeren Vernetzung der Kettenmoleküle (Raumnetzwerk) über chemische Bindungskräfte eine hohe Steifigkeit und Sprödigkeit und sind nicht quell- und schmelzbar[34 S. 9][36 S. 31f]. Abbildung 35 gibt zusammenfassend einen Überblick über die drei großen Kunststoffgruppen.

⁶ Definition der IUPAC (Union for Pure and Applied Chemistry)

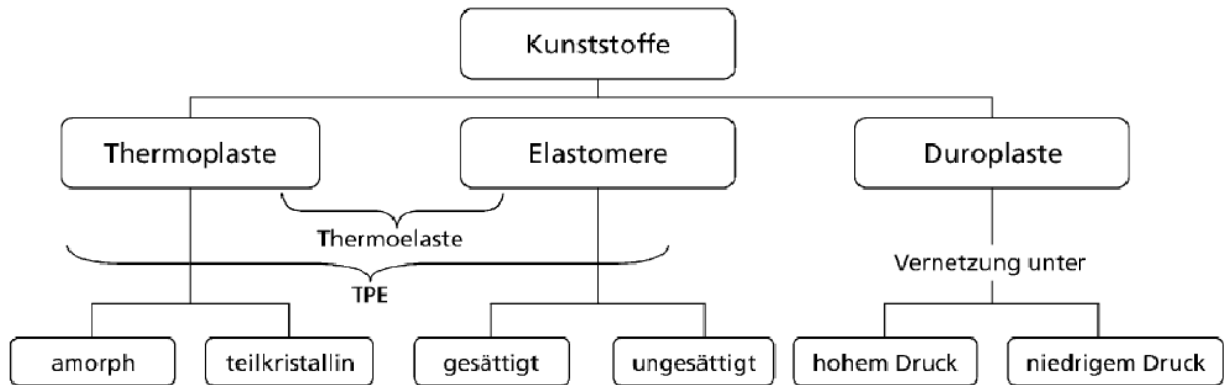


Abbildung 35 Einteilung der Kunststoffe [37 S. 3]

Entsprechend DIN 7724 [38] können Kunststoffe in Thermoplaste, thermoplastische Elastomere, Elastomere und Duroplaste eingeteilt werden. In den folgenden Kapiteln wird näher auf die Eigenschaften von Thermoplasten eingegangen.

3.3.3 Struktur der Polymere

Hinsichtlich der Struktur können Polymere in kristalline, semikristalline und amorphe Materialien eingeteilt werden. Abbildung 36 zeigt schematisch die Struktur eines amorphen im Vergleich zu einem teilkristallinen Thermoplast.

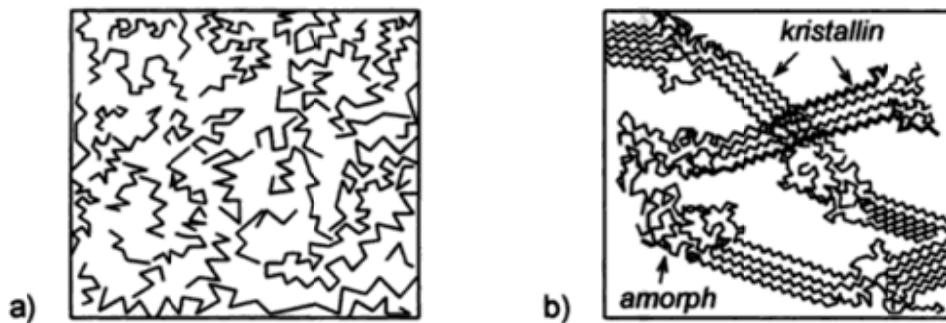


Abbildung 36: Strukturen thermoplastischer Kunststoffe: a) Thermoplast mit einem geringen Anteil an kristallinen Bereichen (amorpher Thermoplast); b) Thermoplast mit einem höherem Anteil an kristallinen Bereichen (teilkristalliner Thermoplast) [39 S. 432]

Amorphe Polymere weisen keine räumliche Ordnung auf, während kristalline Polymere eine regelmäßige Kristallstruktur aufweisen. Ein großer Teil der Polymere weist ein teilkristallines (semikristallines) Gefüge auf, sie enthalten sowohl kristalline als auch amorphe Bereiche. Die Kristallisation von Polymeren erfolgt aus der Schmelze innerhalb eines definierten Temperaturbereichs. Polymere kristallisieren im Temperaturbereich unterhalb des Gleichgewichtschmelzpunktes und oberhalb der Glasübergangstemperatur [40 S. 14]:

Amorphe Kunststoffe sind im festen Zustand glasartig, transparent und meist spröde, während *teilkristalline Kunststoffe* opak (durchschimmernd) sind, meist eine höhere Wärmebeständigkeit aufweisen und eine höhere Festigkeit und Zähigkeit als amorphe Kunststoffe besitzen [41].

3.3.4 Verarbeitung von Kunststoffen, Zustandsbereiche

Thermoplaste sind – im Gegensatz zu Duroplasten und Elastomeren- unvernetzte Kunststoffe und können durch Erhitzen in einen thermoplastischen Zustand gebracht werden. Das Thermoplast kann wie eine viskose Flüssigkeit verarbeitet werden, und erreicht seine Gestaltfestigkeit durch Abkühlung. Dieser Vorgang kann unendlich oft wiederholt werden. Durch Erhitzung wird die amorphe Struktur erweicht und beginnt zu fließen, bzw. die teilkristalline Struktur beginnt bei ausreichend hoher Temperatur zu schmelzen [37 S. 3].

Abbildung 37 zeigt die unterschiedlichen Zustandsformen von Thermoplasten bei unterschiedlichen Temperaturen. Die Glastemperatur⁷ (GT) begrenzt jenen Bereich unterhalb dessen das Material eine erhöhte Festigkeit und Härte besitzt, da die zwischenmolekularen Anziehungskräfte noch voll wirksam sind. Oberhalb der Glastemperatur wird bei amorphen Thermoplasten das Material plastisch fließbar, bei teilkristallinen Thermoplasten durch den noch vorhandenen festen kristallinen Anteil zähelastisch biegsam. Erst ab der Kristallitschmelztemperatur (KST) setzt die Erweichung der teilkristallinen Thermoplaste ein. Nach Erreichen der Schmelztemperatur (ST) sind die Makromoleküle völlig frei verschiebbar, jedoch nicht die Atome. Da zwischen den Makromolekülen auch in der Schmelze noch sehr starke Reibungskräfte auftreten, ist dieser Zustand sehr viskos. Zum Zerfall kommt es erst bei der Überhitzung der Schmelze und zur völligen Zersetzung durch chemische Umwandlung [42 S. 379].

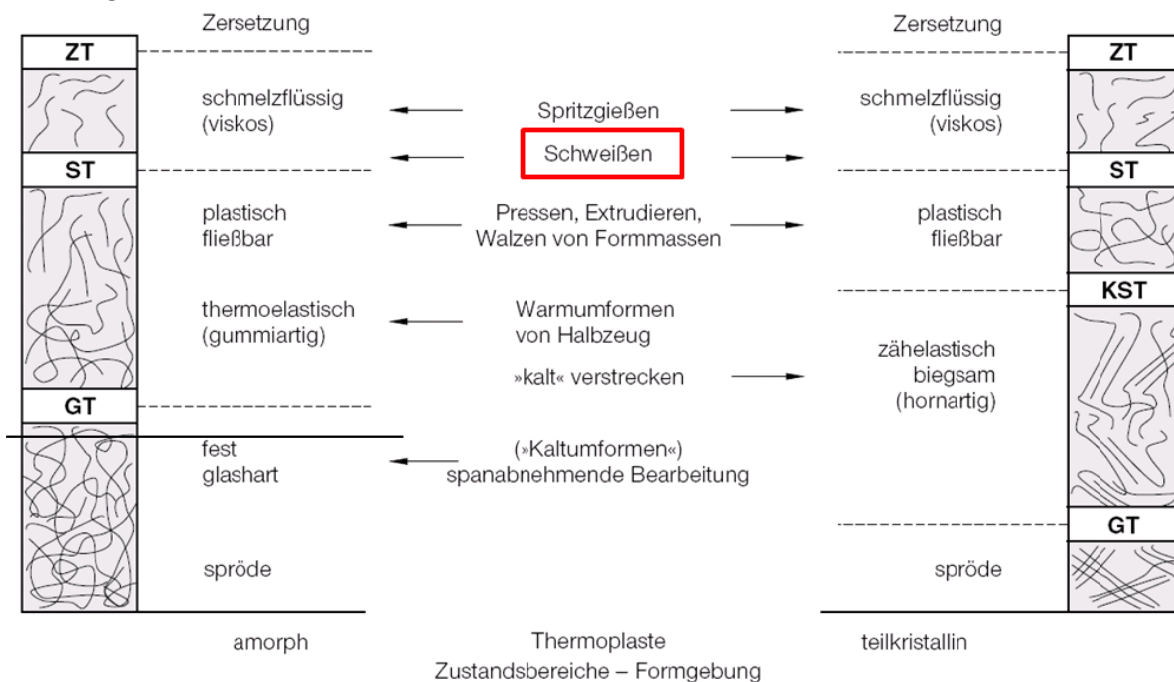


Abbildung 37: Zustandsformen von Thermoplasten: ZT... Zersetzungstemperatur, ST... Schmelztemperatur, KST... Kristallitschmelztemperatur, GT...Glastemperatur [42 S. 381]

Amorphe Thermoplaste besitzen sehr bewegliche Moleküle. Dadurch nehmen sie eine Zwischenstellung zwischen den Flüssigkeiten und Festkörpern ein. Der feste Zustand ist eigentlich der einer unterkühlten Schmelze, bei der die Fließfähigkeit durch den hohen Viskositätsgrad beinahe aufgehoben ist. Beim Erwärmen nimmt die Fließfähigkeit zu, der Thermoplast erweicht und gelangt schließlich in den schmelzflüssigen Zustand, (Tabelle 8). Eine genaue Abgrenzung des schmelzflüssigen Zustands vom vorhergehenden plastisch-fließbaren Zustand ist nicht möglich, eine definierte Schmelztemperatur liegt bei amorphen Thermoplasten nicht vor [42 S. 379].

⁷ Die Bestimmung der Glastemperatur erfolgt mittels Messung der Änderung der spezifischen Temperatur und des spezifischen Volumens mit zunehmender Temperatur, [42], S. 380

Zustandsform	fest, glasartig, spröde	thermoelastisch, gummielastische Dehnung	thermoplastisch, zähviskoses Fließen	Zersetzung
Molekulare Struktur	ineinander verknäuelte Makromoleküle, zwischenmolekulare Bindungskräfte groß	noch weitgehend verknäulte Makromoleküle, zunehmende Beweglichkeit der Molekülketten	Makromoleküle gegeneinander verschiebbar, zwischenmolekulare Bindungskräfte weitgehend aufgehoben	Molekularer Abbau des Thermoplasten
Verarbeitung	spanendes und spanloses Trennen, lösbares und unlösbares Fügen (Kleben), Oberflächen-Veredelung	Umformen: Biege-, Druck-, Zug- und Zugdruckumformen	Urformen: Spritzgießen, Extrudieren, Pressen, Schäumen, Kalandrieren, Rotationsformen usw. unlösbares Fügen (Schweißen)	

Tabelle 8: Zustandsverarbeitungsschema für amorphe Thermoplaste [34 S. 9]

Teilkristalline Thermoplaste besitzen durch den kristallinen Anteil eine Zustandsform mehr als amorphe Thermoplaste (Tabelle 9).

Zustandsform	fest, glasartig, spröde	Fest, zähelastisch bis	thermoelastisch	thermoplastisch	Zersetzung
Molekulare Struktur	Amorphe und teilkristalline Bereiche fest, zwischenmolekulare Bindungskräfte groß	Amorphe Bereiche zunehmend beweglich, kristalline Bereiche noch feste, zwischenmolekulare Bindungskräfte in kristallinen Bereichen groß	Kristalline Bereiche zunehmend gelöst	Makromoleküle gegeneinander verschiebbar	Molekularer Abbau des Thermoplasten
Verarbeitung	In diesem Bereich nicht üblich	spanendes und spanloses Trennen, lösbares und unlösbares Fügen (Kleben), Oberflächen-Veredelung	Umformen: Biege-, Druck-, Zug- und Zugdruckumformen	Urformen: Spritzgießen, Extrudieren usw., unlösbares Fügen (Schweißen)	

Tabelle 9: Zustandsverarbeitungsschema für teilkristalline Thermoplaste [34 S. 9]

3.3.5 Verbundwerkstoffe/ Faserverbundwerkstoffe

Verbundwerkstoffe sind Materialien, die aus mindestens zwei makroskopisch voneinander separierten festen Phasen bestehen, wobei sich an der Phasengrenze eine „Zwischenphase“ mit besonderen Eigenschaften befindet. Die mechanischen Eigenschaften des Verbundwerkstoffs sind teilweise besser als die der einzelnen Komponenten, wenn diese getrennt vorliegen. Durch eine geeignete Anordnung und Verteilung der Phasen können die mechanischen Eigenschaften eingestellt werden. Unterschieden werden können 3 Basistypen von Verbundwerkstoffen: Faserverbund, Schichtenverbund und Teilchenverbund (Tabelle 10). Die von BASF zur Verfügung gestellten Materialien werden dem Basistyp des Faserverbunds zugerechnet.

Geometrie		Teilchenverbunde	Faserverbunde	Werkstoffverbunde Schichtverbunde
Verstärkungsstoffe	Matrixwerkstoffe	Glaskugeln, Talkum, Quarzmehl, Ruße	Glasfaser, Whisker, C-Faser, Aramidfasern	Sandwich aus – hochfesten Blechen/Folien – Faserlagen u. a.
	Metalle	Femur-Kopf (Blockkarbide)	Kolbenboden Kolbenmuldenrand	Brennraumeinfassung (ZKD) Flachdichtung
anorg. Werkstoffe	Glas	gesintertes Schaumglas	Drahtglas	Sicherheitsglas
	Keramik	Schutzplatten für Raumleiter	Ventile, Turbinenschaufeln	Kolbenboden, Piezoaktoren
	Zement	Beton	Stahl-, C-Faserbeton	CFK schichtsanierete Brücken
	Kohlenstoff	–	Bremsbeläge	Flachdichtungen
Polymere	Thermoplaste	Pumpengehäuse	Lüfterräder, Frontend, Unterboden	Surfbrett, Verpackung, Instrumententafel
	Duroplaste	Schleifscheiben	Stoßfänger, Implantate, Flugzeugstrukturen	Scheinwerferreflektor, Sperrholz
	Elastomere	Schiffsmotor-Fundamente Autoreifen (Lauffläche)	Gummischlauch	Membranen, Gummi-Metall-Verbindungen

Tabelle 10: Gliederung der Verbundwerkstoffe und Anwendungen [37 S. 3]

Als *Faserverbund-Kunststoff* wird ein Werkstoff bezeichnet, der aus einem Matrix-Material mit einem bestimmten Anteil an Verstärkungsfasern besteht. Diese Verstärkungsfasern sind entweder in bestimmte Richtungen orientiert oder liegen regellos vor.

Das *Matrix-Material* bezeichnet die formbare Einbettmasse für die Verstärkungsfasern; in der vorliegenden Arbeit sind dies thermoplastische Polymere (PA6, PBT oder PES). Die Aufgabe der Matrix ist die Gewährleistung der geometrischen Form, die Krafteinleitung und –überleitung und dient zum Schutz der Fasern.

Nach der Geometrie der eingebrachten Verstärkungsstoffe wird zunächst zwischen *Teilchen* und *Fasern* unterschieden. Die Ausdehnung der Teilchen ist in alle Richtungen gleich, während bei Fasern die Ausdehnung in einer Richtung größer ist als in alle anderen, analog zu einem langen, schlanken Zylinder. Eine dritte Möglichkeit sind Verbundstrukturen, bei denen sich Lagen unterschiedlicher Materialien abwechseln, wie z.B. in einer Sandwichstruktur.

Die Fasern selbst können, je nach ihrem Einfluss auf die Eigenschaften des Verbundwerkstoffes, in Langfasern und Kurzfasern unterteilt werden. Bei *Langfasern* ändern sich die Eigenschaften auch bei weiterer Verlängerung der Fasern nicht. Die Länge beträgt typischerweise 1-50 mm, längere Fasern werden als „Endlosfasern“ bezeichnet. Bei den *Kurzfasern* hingegen hat die Länge einen Einfluss auf die Verbundeigenschaften. Damit werden Glasfasern mit einem Durchmesser von einigen 10 µm und einer Länge von weniger als 1mm bezeichnet. [43 S. 296].

Fasern sind stabförmige Körper, meist mit Kreisquerschnitt und einem Durchmesser von gewöhnlich 10 µm; Als Fasermaterialien werden Werkstoffe mit hoher Festigkeit und/oder Steifigkeit bezogen auf das Gewicht verwendet.

Als *Kurzfasern* werden gemahlene Textilglasfasern mit einer Faserlänge von 0,1-0,5 mm und einem Verhältnis von $l/d > 10$ verarbeitet [44 S. 19ff].

Durch das Einbetten von zusätzlichem Material wie etwa Glas-, Aramid-, Kohle-, oder Borfasern können faserverstärkte Kunststoffe bei Raumtemperatur teilweise die Festigkeit von Stahl erreichen. Das mechanische Verhalten wird vom eingebetteten Material und nicht vom Kunststoff bestimmt [35].

Faserverstärkte Kunststoffe besitzen eine zunehmende Bedeutung in maschinenbaulichen Anwendungen. Wie in Abbildung 38 dargestellt, bildet Aluminium den Hauptbestandteil am Strukturgewicht von Flugzeugen; Verbundwerkstoffe kommen gleich an zweiter Stelle mit Anteilen zwischen 3 und 50%.



Abbildung 38: Relativer Werkstoffeinsatz in der Luftfahrt/ Airbus und Boeing (GLARE: glasfaserverstärktes Aluminium)[30]

Die in dieser Diplomarbeit untersuchten Werkstoffe weisen einen Gewichtsanteil von 30% Kurzglasfasern auf. Diese Verstärkungsfasern werden aus gemahlten Textilfasern gewonnen. Der Begriff Textilfaser kennzeichnet aus geschmolzenem Glas gesponnene feine Fäden mit einem annähernd runden Querschnitt. Gläser können je nach ihrer chemischen Zusammensetzung in drei Gruppen eingeteilt werden (Tabelle 11).

Bestandteile	E-Glas	R-Glas	C-Glas
SiO	51-55	60	65
Al ₂ O ₃	13-15	25	4
CaO , MgO	20-24	14/ 3	9 /6
B ₂ O ₃	6-9	-	5
K ₂ O, Na ₂ O	<1	-	8

Tabelle 11: Richtwerte der Glaszusammensetzung in % [44 S. 22]

Dabei wird zwischen drei Gruppen von Glaszusammensetzungen unterschieden: E-Glas (E= Electric) ist die Standardfaser mit 90% Marktanteil, während S-Glas (S=Strength) und R-Glas (R=Resistance) erhöhte Festigkeiten aufweisen[45].

Glasfasern weisen aufgrund ihrer amorphen Struktur isotrope Eigenschaften auf, dh. die Werkstoffkennwerte in Faserrichtung sind gleich denen quer zur Faserrichtung[44 S. 27]. Die wichtigsten mechanischen und thermischen Eigenschaften der Glasfasern sind in Tabelle 4 angeführt.

	Dichte [g/cm ³]	Zugfestigkeit [N/mm ²]	E-Modul [N/mm ²]	Bruchdehnung [%]	Querkontraktionszahl [-]	Thermische Ausdehnung [K ⁻¹]
E-Glas	2.52	3 400	75 000- 80 000	4.5	0.24	4.6 10 ⁻⁶
C-Glas	2.4	4 600	85 000- 89 000	5.0	-	-

Tabelle 12: Eigenschaften der Glasfasern [44 S. 27].

Abbildung 39 zeigt schematisch den strukturellen Aufbau einer Glasfaser sowie die REM Aufnahme einer Glasfaser in der Ultramid-Grundmatrix.

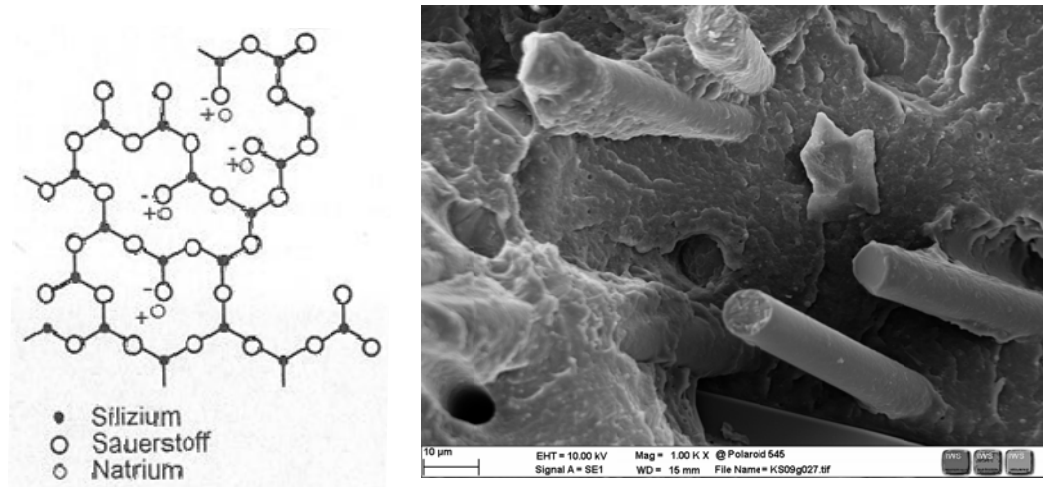


Abbildung 39: Molekularer Aufbau der Glasfaser (links), Struktur und REM-Aufnahme von Glasfasern in einer Polyamid6 Matrix (rechts)[46 S. 19].

Kurzfaserverstärkte Werkstoffe erreichen bei weitem nicht die Festigkeiten und Steifigkeiten von langfaserverstärkten Werkstoffen. Jedoch zeigen sie eine deutliche Erhöhung von Steifigkeit und Zugfestigkeit im Vergleich zum unverstärkten Polymerwerkstoff[43]. Häufig sind die Kurzfasern regellos verteilt, sodass ein isotropes Verhalten des Werkstoffes angenommen werden kann. Der große Vorteil der Kurzfaserverstärkung liegt in der kostengünstigeren Herstellung und der einfacheren Verarbeitung des Materials, beispielsweise durch Spitzgießen. Durch die Ausrichtung der Kurzfasern kann eine weitere Erhöhung des E-Moduls und der Zugfestigkeit erfolgen. Dies geschieht oft durch den Verarbeitungsprozess. Beim Spritzgießen des flüssigen Polymers mit Kurzfasern, kommt aufgrund der unterschiedlichen Ausprägungen der Strömungsgeschwindigkeiten in der Form zu einer gerichteten Faserverteilung, vgl Kapitel 11.2.

Tabelle 13 zeigt den Einfluss der Kurzglasfaserverstärkung auf die E-Moduli und die Zugspannungswerte bei verstärkten bzw. unverstärktem Polyamid 6.

Faserart	E (GPa)/kond.	Rm (MPa)
Polyamid 6 unverstärkt	1,2	45
Polyamid 6, 25% Glasfasern	5	105
Polyamid 6, 30% Glasfasern	6,2	115
Polyamid 6, 35% Glasfasern	7,2	130

Tabelle 13: Vergleich der Eigenschaften von unverstärkten mit kurzfaserverstärkten Güten (PA6)⁸

⁸ Ultramid® B3S im Vergleich mit Ultramid® B3WG5, Ultramid® B3WG6, Ultramid® B3WG7[65]

3.3.6 Eigenschaften der untersuchten Werkstoffe

Untenstehend sind die wichtigsten Eigenschaften der im Rahmen der Diplomarbeit untersuchten Werkstoffe angeführt. Alle sind mit 30% Gewichtsprozent Kurzglasfasern verstärkt.

	Ultramid B3 WG 6	Ultrason E2010G6	Ultradur B4300G6
Bezeichnung	Polyamid 6 (PA6)	Polyether- sulfon (PES)	Polybutylen- terephalat (PBT)
Struktur	teilkristallin	amorph	teilkristallin
Zugfestigkeit [MPa] tr./kond.	185/115	-/140	140
Bruchdehnung [%]	3.5/8	-/ 1.9	3
Schmelztemperatur	220 °C	/	223°C
Glasübergangstemperatur	/	225°C	/
Feuchtigkeitsaufnahme	2.1 %	0.6%	0.2%
Bild			

Tabelle 14: Mechanische und thermische Kennwerte der verwendeten Werkstoffe Ultramid, Ultrason, Ultradur, verstärkt mit 30% Kurzglasfasern

Diese drei Werkstoffe können aufgrund Ihrer Dauergebrauchstemperatur in die Kategorien „Technische Thermoplaste“ (PA und PBT) und „Hochtemperaturbeständige Thermoplaste“ (PES) unterteilt werden (Abbildung 40).

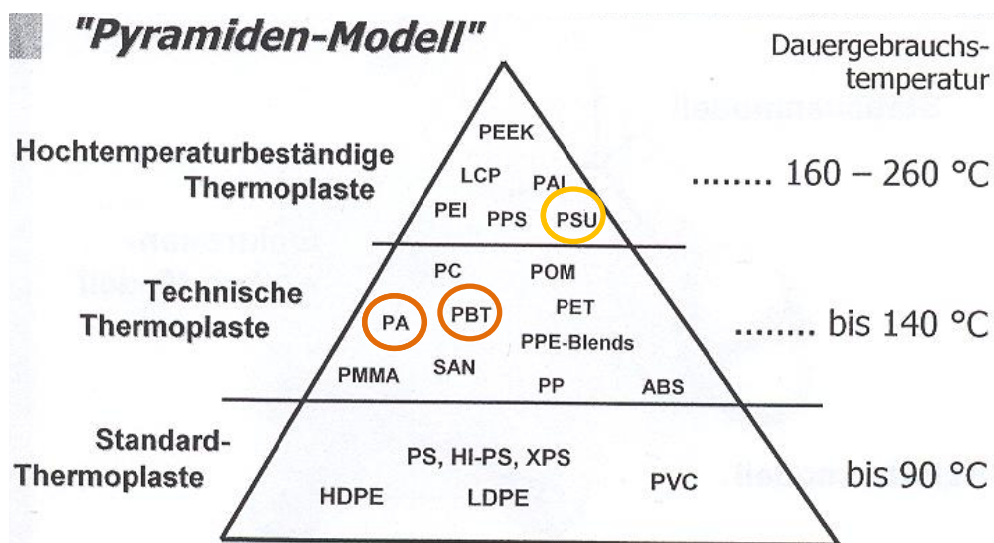


Abbildung 40: Einteilung der Kunststoffe nach dem Temperaturbereich; PA und PBT zählen zu den Technischen Thermoplasten, PES (PSU) zu den hochtemperaturbeständigen Thermoplasten [35]

3.3.6.1 Ultramid B3WG6 Schwarz

Die BASF-Bezeichnung Ultramid® B3WG6 Schwarz steht für ein Polyamid 6 (Abbildung 41). Polyamide werden durch Polykondensation aus bifunktionellen Grundmolekülen gebildet[47 S. 30].

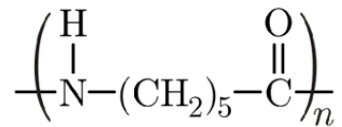


Abbildung 41: Strukturformel PA6 [48]

Die erste Ziffer in der BASF-Produktbezeichnung B3WG6 benennt die Viskositätsklasse. Die hier aufgeführte Ziffer 3 bezeichnet ein leichtfließendes Material mit einer niedrigen Schmelzviskosität, welches sich besonders für das Spritzgießen eignet. Der Buchstabe W zeigt an, dass das Polymer stabilisiert wurde. Durch die Stabilisierung mit bestimmten chemischen Substanzen (Phenole, Phosphite) kann der Abbaumechanismus durch Oxidationsreaktionen beendet oder verzögert werden[49 S. 224]. Ultramid weist eine sehr hohe Wärmealterungsbeständigkeit auf. Mit G6 wird die Verstärkung des Werkstoffs durch 30 Gewichtsprozent Kurzglasfasern angezeigt [48].

Polyamide sind polymere Makromoleküle, welche die periodisch auftretende Amid-Gruppe⁹ CO-NH enthalten. Häufig werden diese Werkstoffe auch als Nylon bezeichnet.

Polyamid 6 entsteht durch Ringöffnungspolymerisation aus dem ϵ -Caprolactam ($\text{C}_6\text{H}_{11}\text{NO}$)-Molekül, (Abbildung 42). ϵ -Caprolactam ist ein 7-gliedriger Ring mit Amidgruppe, welcher hydrolytisch in eine ω -Aminocapronsäure aufgespalten wird. Diese Säure leitet den Kettenstart ein, da sie zusammen mit ϵ -Caprolactam zu Polycaprolactam oder Polyamid 6 reagiert[50]. Es entsteht eine Polymerkette mit 6 C-Atomen in der Monomereinheit, (Abbildung 42).

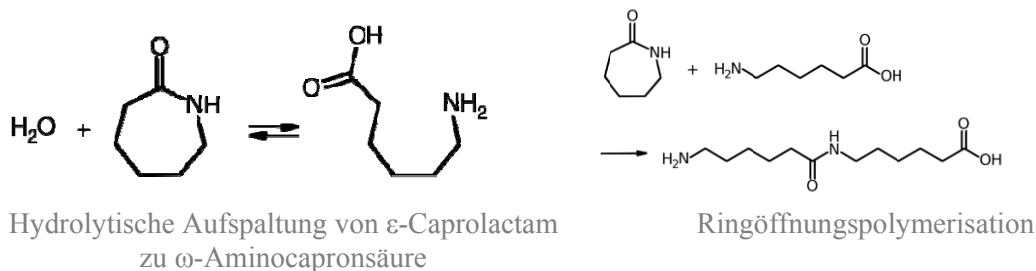


Abbildung 42: Ringöffnungspolymerisation von ϵ -Caprolactam. Start der Reaktion durch Hydrolyse (links); aus den ϵ -Caprolactam-Molekülen entsteht das kettenförmige Polycaprolactam-Makromolekül (rechts)[50]

Neben der Ringöffnungspolymerisation kann Polyamid 6 auch durch die hydrolytische Spaltung der Amid-Bindung von ϵ -Caprolactam mit darauf folgender Polykondensation gewonnen werden.

Polyamid (PA) ist ein teilkristallines Thermoplast und gehört zu den PA-Formmassen nach DIN EN ISO 1874. Die Eigenfarbe ist milchig trüb. Polyamid neigt stark zu Wasseraufnahme. Durch den steigenden Wassergehalt kommt es zu einer Abnahme von Zähigkeit und Festigkeit; die elektrischen Isoliereigenschaften sind ebenso vom Feuchtegehalt abhängig. Für die Verarbeitung ist meist eine Konditionierung der Polyamidteile erforderlich. Die Einsatztemperaturen von PA6 liegen zwischen 40 °C bis 80 bis 120 °C. Polyamid 6 ist beständig gegen viele Lösemittel, Kraftstoffe und Öle, jedoch nicht gegen Säuren und Laugen.

In der Industrie findet sich Polyamid als Konstruktionswerkstoff für Bauteile, welche hohe Anforderungen an Festigkeit, Zähigkeit und Gleiteigenschaften stellen. Beispielhaft seien hier Gleitelemente, Zahnräder, Laufrollen und besonders schwingungsbeanspruchte Gleitlager genannt, da PA6 besonders zähhart, stoß- und verschleißfest ist[32 S. E77][51 S. 324].

⁹ Amid-Gruppe: Leiten sich vom Ammoniak (NH_3) ab; Ein Amid wird gebildet, wenn ein Wasserstoffatom durch einen Säurerest ersetzt wird [116]. Säurerest sind negative Ione, welche bei Zerfall einer Säure in Ihre Bestandteile (Dissoziation) entstehen. [http://infofrosch.info/s/sa/sa_urerest_ion.html]

Durch Verstärkung mit Glas- oder Kohlefasern ist eine weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften möglich. Durch die Zugabe der Fasern steigt jedoch auch die Hydrolyseempfindlichkeit der Thermoplaste, da an der Anbindungsfläche Matrix-Faser ein mikroskopisch kleiner Spalt bleibt, durch den wegen des Kapillareffekts Feuchtigkeit eingezogen wird. Abhängig ist dieser Effekt von der Schlichte an der Glasfaseroberfläche[52]

Weitere mechanische und thermische Kennwerte des Werkstoffs Ultramid B3WG6 finden sich im Anhang.

3.3.6.2 Ultrason E2010G6

Der Buchstabe E steht für den Polymertyp (E...Polyethersulfon; PESU). Die erste Ziffer (2) bezeichnet die Viskositätsklasse. Hierbei bezeichnet die 1 die niedrigste Klasse, die 6 steht für die höchste. Der Buchstabenkombination G6 steht für die Glasfaserverstärkung mit einem Gewichtsanteil von 30%[53].

Polyethersulfon wird nach DIN EN ISO 1043-1 [54] als PESU bezeichnet, es ist aber auch unter der Bezeichnung PES bekannt.

PESU gehört zu der Gruppe der Sauerstoff-Schwefel-Kohlenstoff-(O, S, C)-Kettenpolymere. In der Hauptkette enthält PES die für Polyarylenethersulfone typische Sulfongruppe ($-\text{SO}_2-$), sowie in 1,4-Stellung verknüpfte Phenylenringe und eine Ethersauerstoffbrücke. Von seiner Struktur wird PES als Polyoxy-1,4-phenylensulfonyl-1,4-phenylen bezeichnet.

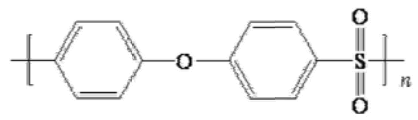


Abbildung 43: Strukturformel PESU[55]

Ultrason gehört zu der Werkstoffgruppe der Polysulfone (PSU/PES), und ist ein amorpher Thermoplast mit leichter Eigenfarbe. Ultrason besitzt eine gute Festigkeit und Steifigkeit und eine geringe Kriechneigung bis zu Temperaturen von ca. 180°C. Der Werkstoff kann deshalb bei Temperaturen von -100°C bis 180°C eingesetzt werden. Von der Wasseraufnahme verhält sich das PES ähnlich PA. Es besitzt gute elektrische Isoliereigenschaften. Verwendet wird Ultrason für Formteile mit hohen mechanischen, thermischen und elektrischen Beanspruchungen[32 S. E78].

Wegen seiner aromatischen Verbindungen¹⁰ hat PESU eine hohe thermische Beständigkeit, einen hohen Erweichungspunkt auf Grund der Sperrigkeit der Molekülkette und eine hohe oxidative Beständigkeit. Das Sauerstoffatom in der Hauptkette gewährleistet die Flexibilität der Moleküle, und führt zu einer niedrigeren Glasübergangstemperatur als bei der alleinigen Verbindung der Sulfongruppe mit Phenylenringen. Gleichzeitig hemmt der sperrige Aufbau der Polyethersulfone die Kristallbildung in der Schmelze, so dass diese Polymere amorph sind[56 S. 943]. Aus diesem Grund sind die Moleküle im festen Zustand nicht als Kristallgitter regelmäßig angeordnet, sondern bilden ein unregelmäßiges Muster aus[57].

Ultrason wird für Wasserpumpenlaufräder im Kfz-Kühlwasserkreislauf, und für Regeleinheiten, Rotoren und Gehäuse im Ölkreislauf eingesetzt. Ultrason zeigt eine gute Beständigkeit gegenüber Motorölen, sowie eine hohe mechanische Festigkeit und Dimensionsstabilität im Temperaturbereich von -50 °C bis + 180 °C [53].

¹⁰ Als Aromaten werden planare, cyclische Moleküle mit konjugierten Doppelbindungen bezeichnet. Einfachster Vertreter ist Benzol (C_6H_6). Zeichnen sich durch besonders günstiges Energieniveau aus. Gegenteil: Aliphatische Verbindungen

3.3.6.3 Ultradur B4300G6

Der Buchstabe B steht für den Werkstoff PBT oder ein PBT+PET-Blend. Die erste Ziffer (4) bezeichnet die Viskositätsklasse; auch dieser Werkstoff ist mit 30 Gewichtsprozent Glasfasern verstärkt[58].

PBT gehört zu der Gruppe der so genannten linearen Polyester. Dazu gehört auch PET, welches zusammen mit PBT zu den Polyalkylenterephthalaten zusammengefasst wird, in Anlehnung an die ISO 7792 [59]. Die Anordnung der Moleküle ist teilkristallin, mit unterschiedlicher Kristallinität von PET (zum Teil amorph) und PBT (milchigweiß). Polyalkylenterephthalate zeichnen sich durch ihre guten mechanischen Eigenschaften über einen weiten Temperaturbereich aus.

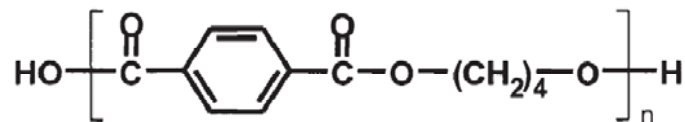


Abbildung 44: Strukturformel PBT[60]

PBT besitzt gute Gleiteigenschaften, geringer Abrieb und somit ein günstiges Langzeitverhalten. Reines PBT ohne Füllstoffe tendiert zu sehr geringer Feuchteaufnahme, geringer Wärmedehnung und sehr gute elektrische Isoliereigenschaften. Der Werkstoff ist nicht beständig gegen heißes Wasser und Dampf, Aceton und halogenhaltige Lösemittel, sowie starke Säuren und Laugen. Eingesetzt wird PBT für Formteile und Konstruktionsteile mit hoher Maßhaltigkeit bei guten Lauf- und Gleiteigenschaften im Maschinenbau[32 S. E77].

PBT besitzt einen engen Schmelzbereich zwischen 220 und 225°C, da PBT einen sehr hohen kristallinen Anteil aufweist, kann PBT bis kurz unter der Schmelztemperatur ohne Verformung und Schädigung erwärmt werden[58].

3.3.7 Wasseraufnahme

Die Eigenschaften der Polymere hängen in besonderem Maße von deren Wassergehalt ab. Werden beispielsweise Polyamide offen gelagert, kommt es zu reversibler Wassereinlagerung oder –abgabe in den amorphen Bereichen der Polyamid-Struktur. Das Ausmaß der Wasseraufnahme hängt wesentlich von der Konzentration der Amidgruppen¹¹ ab. Die Wasseraufnahme selbst erfolgt durch Diffusionsprozesse, die durch Wasserstoffbrückenbindungen erleichtert werden. Das Wasser lagert sich hauptsächlich in den weniger dicht gepackten, amorphen Bereichen ein[61][52]. Unpolare Polymere wie PE und PP nehmen sehr wenig Feuchte auf, polare Werkstoffe wie Polyurethan (PUR) mehr; Polyamide in hohem Maße[62]. Bei Lagerung an Umgebungsluft nimmt z. B. PA 6 ca. 2,5–3,5 % Wasser auf.

Durch die Verstärkung der Thermoplaste durch Glasfasern kommt es zu einer Zunahme der Hydrolyseempfindlichkeit [52]. Vor der Verarbeitung ist es zu empfehlen, Polyamid zu trocknen, um Dampfblasenbildung zu verhindern. Der zunehmende Wassergehalt führt zu einer Abnahme der Schweißeignung[62]. Wird beim Schweißen die Wärmeformbeständigkeit (HDT¹²) der Materialien überschritten, werden bereits kleinste Mengen absorbiertes Feuchtigkeit in die Wandbereiche getrieben. Es kommt zur Delamination bzw. Blasenbildung unter der Oberfläche[63]. Abbildung 45 zeigt den Einfluss des Feuchtegehalts auf die Schweißnahtqualität von Polyamid 6. Beide Schweißungen wurden mittels Heizelementschweißen durchgeführt; die Proben wiesen jeweils einen erhöhten Feuchtegehalt auf (>0,2% Wasseranteil). Die Größe der Dampfblasen nimmt mit steigendem Wassergehalt (0,75%- 4,16%) zu.

¹¹ Wesentliche Eigenschaften der Polyamide werden durch die Amidgruppen bestimmt, die über Wasserstoffbrückenbindungen miteinander wechselwirken [52]. Polyamide enthalten die periodisch auftretende Amid-Gruppe-CO-NH-

¹² Heat deflection (distortion) temperature; Maß für die Temperaturbelastbarkeit von Kunststoffen

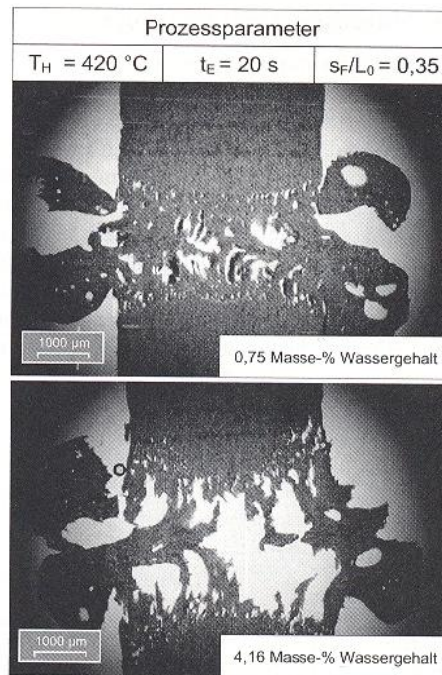


Abbildung 45: Dampfbblasen in Schweißnähten aus Polyamid 6 [64 S. 132]

Konditionieren ist der zeitlich beschleunigte Vorgang zur Einstellung des Feuchtegehalts bei stark wasseraufnehmenden Kunststoffen, vor allem bei Polyamiden. Konditionierung erfolgt meist durch Lagerung bei erhöhter Temperatur in Wasser oder feuchtem Klima. Mit zunehmendem Wassergehalt nehmen die Festigkeitseigenschaften und die Härte ab, ebenso die elektrischen Isoliereigenschaften, und es kommt es zu einer Zunahme der Schlagzähigkeit und der Bruchdehnung. Die Wasseraufnahme führt zu Quellung und zu Maßänderungen[62]. Abbildung 46 zeigt einen Vergleich der mechanischen Eigenschaften von trockenem und konditioniertem Ultramid B3WG6 (Polyamid 6).

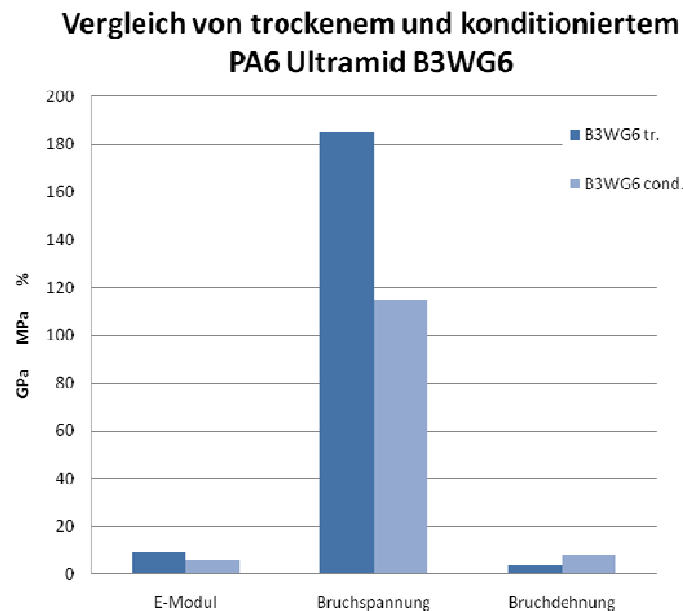


Abbildung 46: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Polyamid 6 trocken und konditioniert[65]

Auch thermoplastische Polyester wie Polybutylenterephthalat (PBT) sind hydrolyseempfindliche Werkstoffe. Wenn während des Aufschmelzens – etwa beim Verschweißen – der Feuchtegehalt zu hoch ist, können Schädigungen auftreten. Die Hydrolyse führt zu einer Abspaltung der Molekülket-

ten und führt so zu einer Verminderung des Molekulargewichts. Erkennbar ist dies an einem Verlust von Zähigkeit, Dehnung und mit einem Festigkeitsverlust in geringerem Ausmaß. Eine Materialschädigung kann durch Ermittlung der Viskositätszahl nach DIN ISO 1628-5 [66] oder des Volumenfließindex nach ISO 1133 [67] nachgewiesen werden. Laut BASF sollte der Feuchtigkeitsgehalt bei der Verarbeitung von Ultradur® $\leq 0,04\%$ betragen[65].

3.3.7.1 Trocknen von Ultramid

In den Produktdatenblättern von Ultramid finden sich nur Trocknungshinweise für das Trocknen von Ultramid-Granulat. Ein zu hoher Feuchtegehalt kann zu Abbau des Werkstoffs führen. Empfohlen wird die Trocknung im Luft- oder Vakuumtrockner. Dabei liegen die maximal zulässigen Temperaturen bei ca. 80 °C bis 110 °C. Laut BASF liegt die maximal zulässige Feuchtigkeit bei 0,15 %; bei der Extrusion liegt sie bei 0,1 % [48 S. 32]. Bei Polyamid werden 3 Konditionierungszustände unterschieden:

- trocken - keine Feuchte, Anteil Wasser $< 0,2\%$
- luftfeucht - Anteil Wasser 2,7% - 3%
- nass - Anteil Wasser 7,2% - 8%[61]

Kukutschki[68] trocknete Ultramid-Platten im Heißluftofen bei 120°C fünf Tage lang, bis keine Gewichtsabnahme mehr stattfand.

3.3.7.2 Trocknen von Ultrason

Bauteile aus Ultrason nehmen je nach Umgebungsbedingungen mehr oder weniger Feuchte auf. Dies geschieht bereits innerhalb der ersten 30 Minuten bei Lagerung ohne Schutzverpackung im Raumklima. Infolge der Feuchteaufnahme bilden sich beim Aufheizen unerwünschte Dampfbläschen im Material. Mittels Trocknung im Umluftofen bei den in Tabelle 15 angegebenen Bedingungen können Bauteile aus Ultrason wieder getrocknet werden. Für eine Plattendicke von 4 mm ergibt sich eine Trocknungszeit von 4 Stunden bei 150°C.

Plattendicke (mm)	Trocknungszeit (h) für ULTRASON E bei 150°C
3	3
6	6

Tabelle 15: Richtwerte für die Trocknung von Platten aus Ultrason [53] [62 S. 96]

3.3.7.3 Trocknung von Ultradur

Laut BASF-Produktinformationen sollte der Feuchtigkeitsgehalt bei der Verarbeitung von Ultradur® $\leq 0,04\%$ betragen. Die Trockenzeiten belaufen sich im Trockenlufttrockner bei 80°C÷120°C auf 4 Stunden[58].

3.4 Fügen von thermoplastischen Polymeren

„Kunststoffschweißen ist ein Vereinigen von thermoplastischen, d. h. nicht härtbaren Kunststoffen gleicher oder ähnlicher Art, unter Anwendung von Wärme und Druck mit oder ohne Zusetzen von Kunststoff als Zusatzwerkstoff“ [69 S. 304].

Generell können verstärkte und unverstärkte thermoplastische Kunststoffe mittels mechanischer Verbindung (Nieten, Klemmen, Schrauben) gefügt werden. Weitere Fügeverfahren sind das Kleben (Warmkleben, Schmelzkleben) und das Schweißen (Abbildung 47)[3 S. 303f].

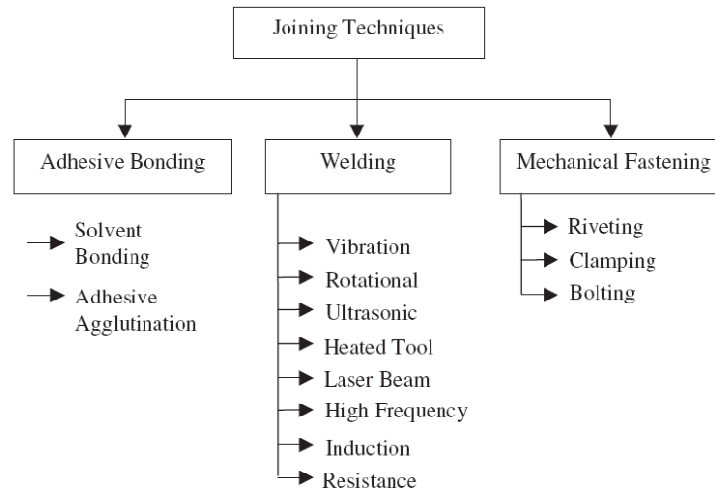


Abbildung 47: Fügeverfahren für unverstärkte und verstärkte Thermoplaste [3 S. 305]

Die Wärmeleitwerte λ von Polymeren liegen in einem Bereich von etwa 0,1 bis 1 W/(m*K), was ca. 3 bis 4 Größenordnungen geringer ist, als die Werte von Metallen (z.B. Kupfer $\lambda \approx 103$ W/(m*K)). Hinzu kommt die hohe Viskosität der geschmolzenen Kunststoffe (Kapitel 0). Auch wenn das polymere Material erweicht ist verbinden sich die Fügepartner erst unter Druck. Die beiden Faktoren (Wärmeleitung und Viskosität) sind maßgebend dafür, dass Metall- und Kunststoff-Schweißen völlig unterschiedliche Prozesse sind.

Ein weiteres Problem sind die oftmals kleinen Prozessfenster, manchmal nur im Bereich weniger Grad. Die Temperatur soll während des Schweißprozesses unterhalb der Zerfallstemperatur, jedoch deutlich oberhalb des Erweichungspunktes liegen. Diese Temperaturbereiche sind jedoch stark vom Herstellprozess (Kettenlänge, Zugabe von Additiven) abhängig und können auch bei scheinbar „identen“ Polymeren variieren. Das Verschweißen unterschiedlicher Polymere ist nur bei einer ausreichenden Überschneidung der jeweiligen Erweichungsbereiche möglich [70].

Yousefpour [3 S. 306] gibt in Abbildung 48 einen guten Überblick über die derzeit zum Schweißen von faserverstärkten Thermoplasten eingesetzten Verfahren. Dabei wird zwischen verschiedenen Arten der Wärmeeinbringung an der Fügestelle unterschieden. Die Wärmeeinbringung kann durch eine externe Wärmequelle (thermisch), durch Reibung sowie elektromagnetisch erfolgen.

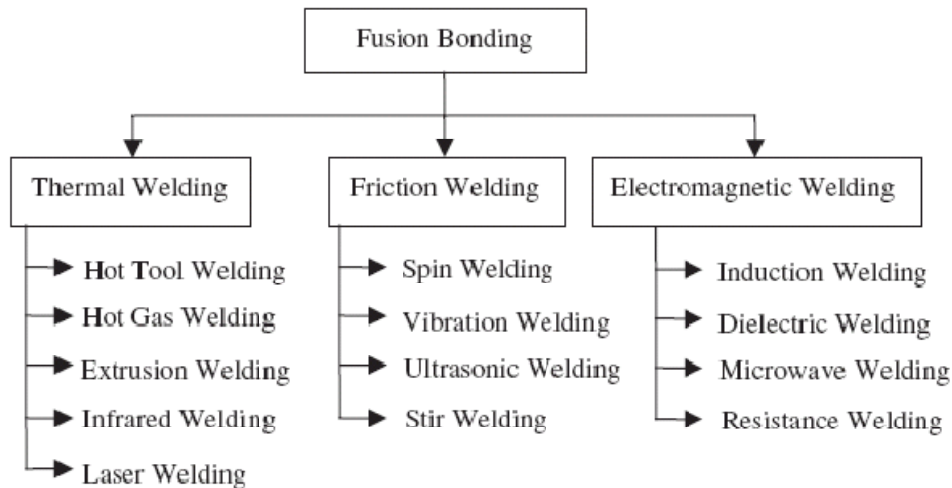


Abbildung 48: Klassifikation der Schweißverfahren für faserverstärkte Thermoplaste[3 S. 306]

Thermoplaste besitzen einige Nachteile, die die Fügbarkeit herabsetzen. Dies sind die niedrige Oberflächenenergie, die schlechte Benetzbarkeit und die Rückstände von Trennmitteln auf der Oberfläche.

Ein effizientes Schweißverfahren für Thermoplaste sollte nach Sorensen die folgenden Charakteristiken aufweisen können [27 S. 1031]:

- Reproduzierbarkeit der schweißverfahrenspezifischen Kennwerte
- Schweißen von Fügeteilen unterschiedlicher Geometrie
- geeignet für große und kleine Schweißflächen
- geringstmögliche Nahtvorbereitung
- geringstmöglicher Einsatz von teurer und spezieller Technik
- Potential für industrielle Anwendung
- haltbare Fügeverbindung auch bei wechselnden Belastungen und Umwelteinflüssen

3.4.1 Physikalisches Prinzip

Schweißtechnisch fügen lassen sich nur Kunststoffe, welche durch Wärme erweichbar bzw. schmelzbar sind[71 S. 440f].

Allgemein kann der polymere Schweißprozess dadurch charakterisiert werden, dass Thermoplaste im Bereich der Schweißfuge durch Wärmezufuhr so weit erwärmt werden, dass sie in den plastischen Zustand übergehen. Sie lassen sich dann unter Anwendung von Druck miteinander verbinden, wobei die Makromoleküle der Verbundpartner gegenseitige Diffusionsprozesse ausführen. Zum Erzeugen einer haltbaren Schweißverbindung ist beim Schweißen von Kunststoffen die Bildung einer vollen Schmelzflüssigkeit - wie etwa beim Schweißen von metallischen Werkstoffen - nicht nötig[72 S. 340]. Falls eine annähernde Homogenisierung des Kunststoffes in der Schweißnaht erreicht wird, ist Festigkeit der Schweißverbindung nicht sehr viel geringer als die des Grundwerkstoffs [71 S. 440f]. Schweißverfahren für Kunststoffe lassen sich nach Michel[73 S. 3-1] in folgenden Schritte einteilen:

- Erwärmen der Fügeflächen bis in den Schmelzzustand
- Kontaktieren der Fügeflächen und Druckaufbau
- Fixieren und Abkühlen der Fügeteile

Für das Schweißen von Kunststoffen gilt, dass die Fügeflächen frei von Schmutz- und Fettschichten sein müssen und die Erwärmung auf die Temperatur des viskosen Fließens ist nötig. Weiters muss der zu fügende Werkstoff an den Schweißflächen durch Wärmezufuhr in einen weichplastischen Zustand gebracht werden (Abbildung 49)[3 S. 305f] [72 S. 198].

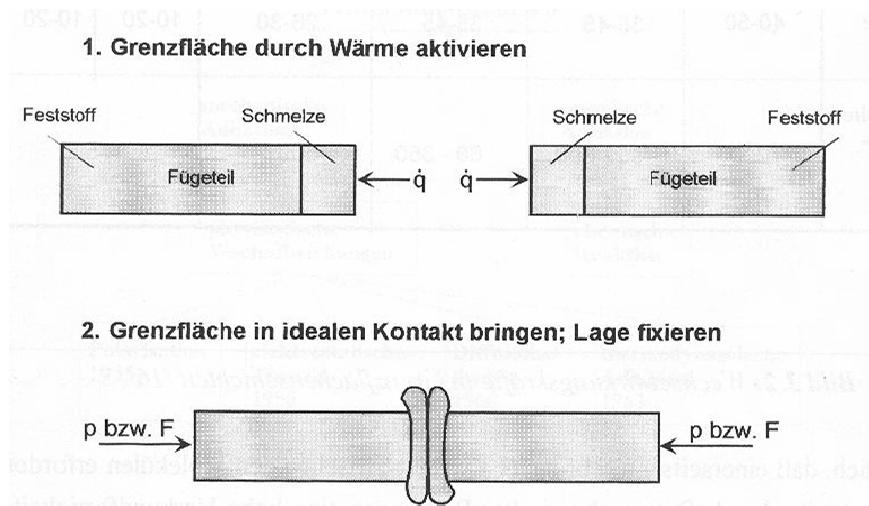


Abbildung 49: Schematischer Schweißablauf: 1. Erwärmung der Fügeflächen durch Wärmeleitung, Konvektion, Dissipation oder Strahlung; 2. Kontaktherstellung, Abkühlung und Lagefixierung[73 S. 3-1]

Der schlechte Wärmeleitkoeffizient von Kunststoffen führt dazu, dass eine Überhitzung (Zersetzung) der Teile auftreten kann, daher muss während der Schweißung genau auf die Einhaltung der Temperatur und auf kurze Schweißzeiten geachtet werden. Die besten Ergebnisse werden beim Schweißen von artgleichen Teilen mit vergleichbaren Viskositäten erzielt[69 S. 304ff].

Laut Ruge und Wohlfahrt [69] ist zum Erzielen einer einwandfreien Schweißnaht neben Wärme auch Druck zwingend erforderlich. Das Aufbringen von Druck führt zu einem innigen Kontakt der Fügepartner, und zum Ablauf von gegenseitigen Diffusionsprozessen der Makromoleküle der Verbundpartner[3] (Abbildung 50). Chemische Reaktionen laufen beim Schweißen von Kunststoffen nicht ab[72].

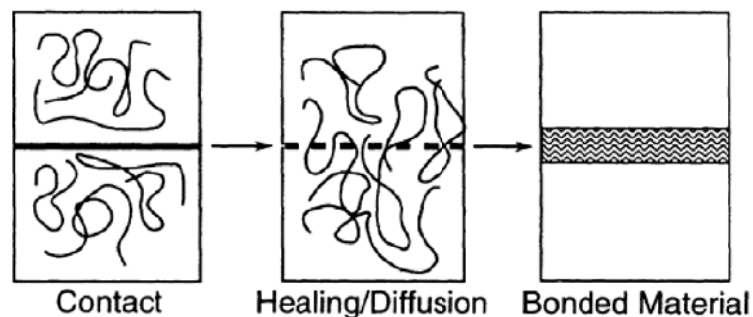


Abbildung 50: Die wichtigsten Schritte beim Verbinden von thermoplastischen Oberflächen beim Schweißen: inniger Kontakt unter Druck und Temperatur (links), Diffusion der Molekülketten über die Grenzflächen der Fügepartner hinweg (Mitte); Schweißverbindung(rechts)[74 S. 346].

Die Polymerketten werden während des Schweißens an einer Grenzschicht vermischt, was zum Verschwinden der Fügeflächen und zum Entwickeln der Fähigkeit führt, Beanspruchungen in der Schweißzone zu übertragen[3]. Die Nahtfestigkeiten sind auf intermolekulare Kräfte (Adhäsion und Kohäsion) zurückzuführen. Für das Schweißen sind einige Theorien der spezifischen Adhäsion entwickelt worden. Die wichtigsten Adhäsionstheorien können wie folgt unterteilt werden:

- Polarisation
- elektrostatische Theorie
- thermodynamische Adhäsion
- chemische Bindungen
- Diffusionstheorie

Für das Verbinden von Thermoplasten kommt die Diffusionstheorie zur Anwendung. Die so genannte Reptationsbewegung¹³ der Molekülketten ist ein wesentlicher Faktor zum Aufbau der Schweißnahtfestigkeit. Die Polymerketten an der Verbindungsfläche einer Schweißnaht können während des Schweißvorganges in der Schmelze über die Verbindungsfläche hinaus in die andere Seite hinein diffundieren und dort Verhakungen bilden. Es kommt zu einer Art „Vernähen der Grenzfläche“. Jedes Mal, wenn ein Stück einer interdiffundierenden Kette die Verbindungsflächen überquert, wird eine molekulare Brücke zwischen den Fügepartnern gebildet[73 S. 3-17f] [75].

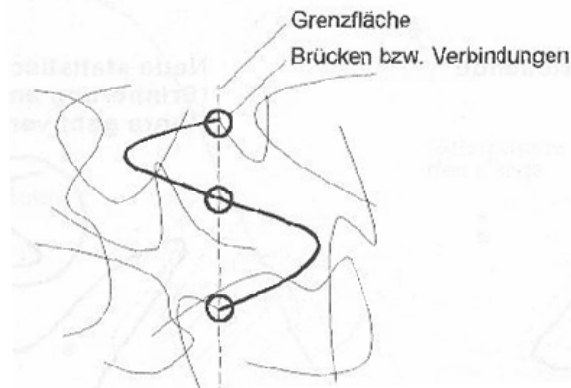


Abbildung 51: Verschlaufungen von linearen Polymerketten über die Grenzflächen der Fügepartner[73 S. 3-18]

3.4.2 Charakterisierung von Thermischen Schweißungen bei Polymeren

Als Gütefaktor für die Schweißung dient der Schweißfaktor[64 S. 218] (Formel 2).

Formel 2: Kurzzeitschweißfaktor[64 S. 218]:
$$f_z = \left(\frac{\sigma_{Sch}}{\sigma_{GM}} \right)$$

σ_{Sch}Zugfestigkeit der Schweißverbindung

σ_{GM}Zugfestigkeit Grundmaterial

Der Schweißfaktor bezeichnet das Verhältnis der Schweißnahtfestigkeiten zur Festigkeit des unverschweißten Grundwerkstoffs. Der Schweißfaktor wird zur Bewertung der Ergebnisse aus Zug-, Falt-, Biege- und Schlagbiegeprüfung herangezogen. Bei der Verschweißung von Polyamiden liegt der Schweißfaktor meist im Bereich von 0,3-1. Die Festigkeitsabnahme in der Schweißnaht geschieht hauptsächlich durch zu hohe bzw. zu niedrige Schweißtemperaturen. Auch ein zu niedriger Schweißdruck, verunreinigte Oberflächen und Eigenspannungen führen zu einem geringen Schweißfaktor [71 S. 440f].

Beim Verschweißen von Polymeren liegt der Schweißfaktor¹⁴ zwischen 0,3-1. Bei faserverstärkten Werkstoffen ist die Festigkeit des Verbundmaterials sehr stark von den Verstärkungsfasern abhängig; die Festigkeit der Verbindung hingegen ist hauptsächlich von der Festigkeit des ursprünglichen Polymers abhängig[76 S. 12ff]. Für faserverstärkte Thermoplaste vermindert sich die erreichbare Schweißfestigkeit bedeutend; der Verstärkungseffekt durch die Fasern kommt in der Naht kaum zum Tragen, sodass nur annähernd die Festigkeit der unverstärkten Grundmatrix erreicht werden kann[3].

Soll die Schweißbarkeit von faserverstärkten mit unverstärkten Materialien verglichen werden, bietet sich ein Vergleich anhand des verfahrens- und materialunabhängigen Schweißnahtfaktors an[77 S. 47] (Formel 3):

¹³ Reptation (lat. reptare: kriechen) bezeichnet die schlangenartige Bewegung eines Polymers aus einem Polymernetzwerk (Diffusion) [117].

¹⁴ Schweißfaktor bezeichnet den von der Schweißnaht übertragenen Anteil der Materialfestigkeit[55].

Formel 3: Verfahrens- und materialunabhängiger Schweißnahtfaktor:

$$f_z \approx f_{z,GM} - \%GF / 100$$

f_zKurzeitschweißfaktor

$f_{z,GM}$...Kurzeitschweißfaktor des Grundmaterials

% GF..Faseranteil in Prozent

3.4.3 Strukturelle Veränderungen

Nach Wise[19] enthält ein verschweißtes amorphes Thermoplast auch amorphes Material in der Schweißnaht. Somit ist die Festigkeit, die in der Fügezone erreicht wird, eine Funktion des Ausmaßes an Verknäuelung und Spaltüberbrückung der Ketten zwischen den Fügeflächen sowie der Schweißnahtfestigkeit aufgrund von Benetzung und der Bildung von chemischen Bindungen an der Grenzfläche.

Wird nun aber ein teilkristallines Thermoplast verschweißt, treten zusätzlich Kristallinitäts-Effekte in der Schweißnaht auf. Wird nämlich die Schmelztemperatur während des Fügevorganges überschritten, wird die kristalline Struktur zerstört, und es bildet sich eine neue Struktur beim Abkühlen. Die neue kristalline Struktur hängt vom chemischen Aufbau des Polymers ab, und von den Schweißbedingungen, abhängig von der Abkühlrate und der Scherströmung. Ein anderer Parameter, der die mechanische Festigkeit der Schweißung beeinflusst, ist die Orientierung der Polymerketten. Diese Anisotropie führt zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften entlang der Ausrichtungsrichtung der Polymerketten.

In einer teilkristallinen, polymeren Schweißung lassen sich nach Wise drei oder vier Zonen identifizieren. Der Autor unterscheidet zwischen Schweißachse (weld centreline), der Schweißzone (weld zone), der sichtbaren Wärmeinflusszone und der nicht sichtbaren Wärmeinflusszone. Die vierte Zone liegt zwischen dem Grundmaterial und der sichtbaren Wärmeinflusszone, und zeigt ein angelassenes Verhalten. Diese ist mittels FTIR (Fourier-Transformations-IR-Spektroskopie), DSC (Differential Scanning Calorimetry), SEM (Scanning Electron Microscopy) oder durch mechanisches Testen nachweisbar. Für die Analyse von polymeren Schweißungen sind weiters die Lichtmikroskopie, Röntgenbeugungsanalyse und Raman -Spektroskopie geeignet[19].

Durch Ätzen von polymeren Schweißnähten können amorphe und teilkristalline Bereiche sichtbar gemacht werden[19]. Bei Ultramid können etwa kristalline Bereiche durch Ätzen mit Kaliumpermanganat ($KMnO_4$) dargestellt werden¹⁵.

Wichtig für das Fügeverhalten ist die Morphologie der Übergangszone zwischen festem und aufgeschmolzenem Material und die Struktur in der Schweißzone selbst. Laut Velthuis sehen viele Autoren in der Dicke der Schmelzzone ein entscheidendes Kriterium zur Kontrolle der Qualität der Schweißverbindung[76 S. 12ff].

Durch die einzelnen Prozessparameter entstehen in der WEZ verschiedene polymere Gefügestrukturen.

Teilkristalline Thermoplaste durchlaufen beim Abkühlen von der Schmelztemperatur die niedrigere Kristallisationstemperatur. Die amorphe Schmelze wird teilweise in ein kristallines Gefüge umgewandelt. Dieses ist durch ein Gefüge regelmäßig nebeneinander liegender Molekülketten charakterisiert. Ausgehend von so genannten Kristallisationskeimen wachsen Kristalllamellen in radialer Richtung und bilden so kugelförmige Sphärolite aus; dazwischen verbleiben amorphe Bereiche. Weiters können durch starken Orientierungseinfluss auf die Schmelze (wie z.B. beim Heizelementschweißen) Verstreckungen, so genannte Fibrillarstrukturen entstehen. Hierbei orientieren sich die Makromoleküle in Richtung des Strömungsgradienten, und es kommt zu einer ausgeprägten Anisotropie in den fibrillaren Bereichen.

Die Gefügeausbildung ist von der Abkühlgeschwindigkeit abhängig. Langsame Kristallisation führt zu einem grobsphärolitischen Gefüge, mit geringeren Bruchspannungs- und Bruchzähigkeitswerten.

¹⁵ Gespräch mit DI Kuriykov am 22.11.2009; [84], S. 229

Dies kommt daher, dass die plastische Verformung fast nur in den Sphärolitgrenzen wirkt. Diese sind meist fehlerbehaftet und leisten nur geringen Widerstand gegen die Rissausbreitung. So kommt es bei grobsphärolitischem Gefüge zu einer inhomogenen Verformung, während die größere Menge an Sphärolitgrenzen bei feinsphärolitischem Material eine homogene Verformung zulässt.

Wie in Abbildung 52 zu erkennen ist, lassen sich in der Fügezone verschiedene Schweißnahtschichten unterscheiden. Grob kann zwischen Fügeebene, Nahtbereich, Fließzone, Übergangszone und Grundmaterial unterschieden werden.

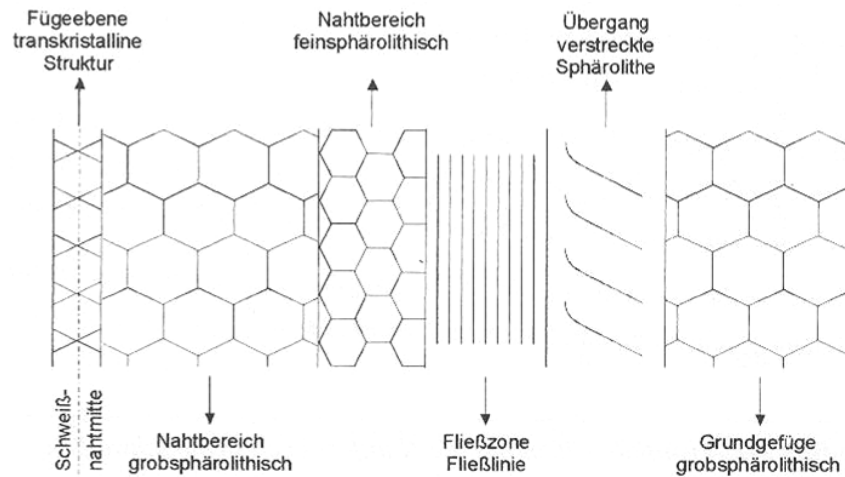


Abbildung 52: Schematische Aufeinanderfolge von Gefügeformationen an einer Heizelementschweißnaht aus PP[73]

In der Fügeebene bilden sich feinere, in einer Linie aufgereiht Sphärolite, entstanden durch das relativ schnelle Abkühlen der Fügeflächen. Daran schließt sich der Nahtbereich mit einem grobsphärolitisches Gefüge an, welches aber mit größer werdenden Abstand von der Schweißnahtmitte immer feiner wird.

Die Fließzone ist charakterisiert durch die Fließlinien die durch die Scherdeformation der abfließenden Schmelze entstehen. Der Übergangsbereich besteht anfangs aus stark verstreckten Sphäroliten des Grundmaterials, bis sich schliesslich in einem gewissen Abstand von der Schweißnahtmitte kein Verstreckungseinfluss der Fließzone mehr feststellen lässt[73 S. 3-32f].

3.4.4 Schweißen von Ultramid, Ultradur und Ultrason

Prinzipiell sind sehr viele Thermoplaste mit sich selbst verschweißbar (Abbildung 53). Auch Kombinationen mit anderen Polymeren sind möglich, wie etwa von amorphen Acrylester-Styrol-Acrylnitril (ASA) mit amorphen PES bzw. teilkristallinen PBT. PES kann laut Plasticportal.net prinzipiell mittels Ultraschallschweißen mit anderen Kunststoffen (wie etwa PBT, ASA und ABS-Acrylnitril-Butadien-Styrol)[53] verschweißt werden.

Polyamid zeigt laut BASF eine erschwerte Kombinierbarkeit mit den anderen in Abbildung 53 angeführten Materialien, wie etwa PP. Die Materialien PA, PBT und PES sind mit herkömmlichen Schweißverfahren für Thermoplaste nach dem heutigen Stand der Technik nicht in Kombinationen miteinander verschweißbar.

	ABS	PS	PC	PMMA	PP	POM	PBT	PA	PC/ABS	PBT/PC	PEI	ASA	SAN	PES	PET
ABS	Green	Green	Green	Green	White	Orange	Green	Orange	Green	White	White	Green	Green	Orange	White
PS	Green	Blue	White	Green	White	Orange	Orange	Orange	White	White	White	White	Green	Orange	White
PC	Green	White	Blue	Green	White	Orange	Green	Orange	Green	Green	White	White	White	Orange	White
PMMA	Green	Green	Green	Blue	White	Orange	Orange	Orange	Green	White	White	White	Green	Orange	White
PP	White	White	White	White	Blue	White	Orange	Orange	White	White	White	White	White	Orange	White
POM	White	White	White	White	White	Blue	White	White	White	White	White	White	White	Orange	White
PBT	Green	White	Green	White	White	White	Blue	White	White	Green	White	Green	Green	Orange	Green
PA	White	White	White	White	White	White	White	Blue	White	White	White	White	White	Orange	White
PC/ABS	Green	White	Green	Green	White	Orange	White	White	Blue	White	White	White	White	Orange	White
PBT/PC	White	White	Green	White	White	Orange	Green	Orange	White	Blue	White	White	White	Orange	White
PEI	White	White	White	White	White	Orange	Orange	Orange	White	White	Blue	White	White	Orange	White
ASA	Green	White	White	White	White	Orange	Green	Orange	White	White	White	Blue	Green	Orange	White
SAN	Green	Green	White	Green	White	Orange	Green	Orange	White	White	White	Green	Blue	Orange	White
PES	White	White	White	White	White	Orange	White	White	White	White	White	Green	White	Blue	Orange
PET	White	White	White	White	White	Orange	Green	Orange	White	White	White	White	White	Orange	Blue

Abbildung 53: Realisierbare Werkstoffkombinationen für Serienschweißverfahren; grün: guteSchweißbeignung ; orange: schlechte Kombinierbarkeit; weiß: k.A.(BASF)

Prinzipiell sind die drei betrachteten Werkstoffe Ultramid (PA), Ultradur (PBT) und Ultrason (PES) mit allen für Thermoplaste geeigneten Schweißverfahren ffügbar, mit Ausnahme des Hochfrequenzschweißens (HF). Dies kommt daher, dass die genannten Thermoplaste einen keinen hohen dielektrischen Verlustfaktor aufweisen, welcher für das HF-Schweißen wesentlich ist [2].

3.4.4.1 Schweißen von Polyamid 6(PA6/Ultramid)

Laut Becker[71 S. 441] kommen für das Verschweißen von Polyamidformteilen und -halbzeugen die folgenden Verfahren in Betracht:

- Ultraschallschweißen,
- Heizlementschiweißen,
- Rotationsreibschweißen,
- Vibrationsschweißen

Mit diesem Verfahren werden Schweißfaktoren von 0,3-1 erreicht. Wichtige Parameter, um optimale Fügeergebnisse erreichen zu können sind:

- Druck
- Temperatur
- Schweißzeit (Schweißgeschwindigkeit)

Die Parameter Druck und Temperatur müssen aufeinander abgestimmt werden, da die für eine einwandfreie Verbindung erforderliche Temperatur der Schmelze mit sinkendem Druck zunimmt. Unterhalb der „kritischen Schweißtemperatur“ (ca. 10-20° oberhalb des Schmelzpunktes) ist auch bei hohem Druck keine befriedigende Verschweißung möglich. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit der Polyamide ist auch die Schweißzeit ein entscheidender Parameter, der von der Art der Erwärmung und der Schichtdicke abhängig ist. Die Kristallinität beeinflusst das Erweichungsverhalten und die Erweichungstemperatur, da sich normalerweise Polyamide mit geringeren Kristallinitätsgraden leichter verschweißen lassen[71 S. 440f].

Kennzeichnend für das Verhalten von Polyamiden im Fügeprozess sind die im Vergleich zu anderen Polymeren folgende Eigenschaften:

- E-Modul und Dämpfung je nach Modifikation,
- Kristallitschmelztemperatur,
- sprunghafter Übergang in niedrigviskose Schmelze,
- Füll- und Verstärkungsstoffe,
- beträchtliche Wasserabsorption.

Bei Polyamiden besitzt laut Uebbing Reibschweißen Vorteile gegenüber den anderen Fügeverfahren. Durch die hohe Schmelztemperatur und die Neigung zur Oxidation wirkt sich der direkte und ununterbrochene Kontakt der Fügeflächen positiv auf die Schweißnahtqualität aus. So kommt es zu Beginn des Fügeprozesses, wo dank der noch niedrigen Temperatur Feststoffreibung vorliegt, durch die große Formsteifigkeit der Polyamide zu einer günstigen Umwandlung der Energie in Wärme. Jedoch wird eine beträchtliche Reibleistung benötigt, um die Aufschmelztemperatur zu erreichen. Besitzt das Polyamid einen hohen E-Modul, wird die Energieumwandlung in der Fügezone konzentriert. Die Schmelzfilmbildung erfolgt instationär, mit abruptem Übergang zu niedrigviskoser Schmelze. Das Erreichen von stationären Abschmelzverhältnissen charakterisiert die günstigste Schweißzeit. Wird ab diesen Zeitpunkt weiterhin Reibarbeit zugeführt, kann dies zu einer Abnahme der Schweißnahtfestigkeiten durch Materialabbau führen [77 S. 49].

Laut Becker et al sind Polyamide bei ausreichender Anschmelzung der Schweißflächen gut verschweißbar. Für einwandfreie Verbindungen ist es aber wichtig, die Schweißbedingungen sorgfältig einzuhalten, da Polyamid sehr enge Erweichungsbereiche hat [71 S. 440f].

Aufgenommenes Wasser kann zu Festigkeitseinbußen durch Wasserdampfeinschlüsse in der Füge-naht führen. Üblicherweise werden beim Schweißprozess Formteile in der Fügezone innerhalb kürzester Zeit auf Temperaturen über dem Schmelzpunkt erhitzt. Diffusionsvorgänge zum Transport des Wassers von der Füge-teiloberfläche können nicht stattfinden, so bleibt in der Polyamidschmelze ein großer Anteil des Wasserdampfes als Blase zurück. Diese Blasen können oberflächlich an der Schweißnahtoberfläche auftreten, ebenso wie in Schweißgut selbst als Lunker (Abbildung 54). Laut

Becker sollte der Feuchtigkeitsgrad möglichst gering sein, damit sich an der Schweißnaht keine Blasen bilden und die Schmelze nicht übermäßig abgebaut wird [71 S. 440f].

Die mittlere Temperatur der Schmelze von Polyamid wurde mittels Simulation auf ca. 230-240°C bestimmt. Im Vergleich mit der Dampfdruckkurve des Wassers wird ersichtlich, dass der Druck ausreichend hoch sein muss, um eine Dampfbildung zu vermeiden [77 S. 57] (Abbildung 54).

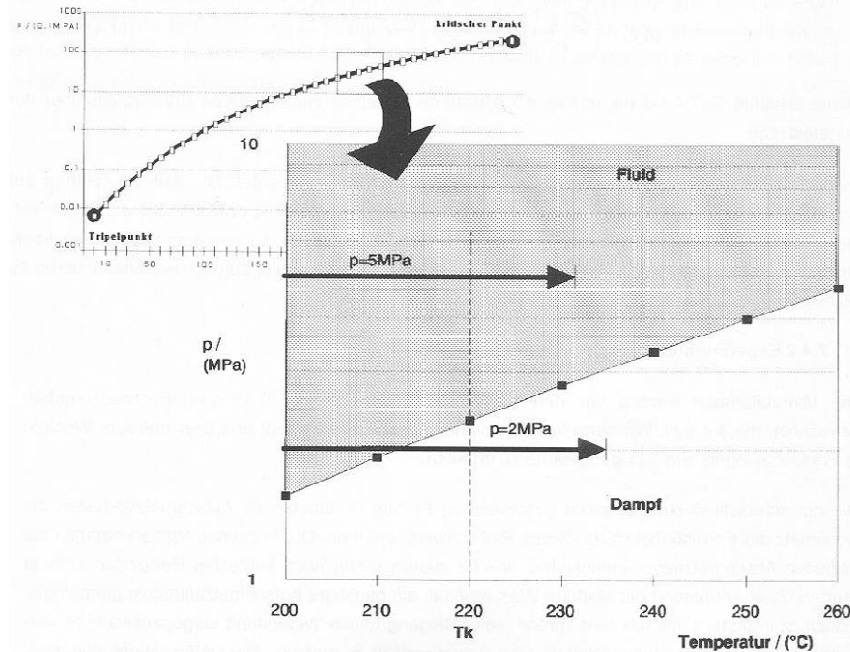


Abbildung 54: Der Schweißprozess im Zustandsdiagramm für Wasser [77]

Beim FSW-Schweißen müssen die zu verschweißenden Platten vorgetrocknet werden, um einen Wert von unter 0.15% Wassergehalt aufzuweisen. Beim Vibrationsschweißen und Rotationsreibschweißen ist eine Vortrocknung oft nicht nötig, da durch die hohen Fügedrücke Blasenbildung verhindert werden kann, bzw. die Blasen durch den starken Materialfluss in die Wulst aussen verdrängt werden. (vgl. auch Abbildung 59, Fügenahtbereich von PES).

Zum Schweißen von Ultramid sind sehr viele Schweißverfahren geeignet. Dazu gehören laut BASF [2] das Vibrationsschweißen (lineares, biaxiales), Rotationsreibschweißen, Ultraschallschweißen, Laserstrahlschweißen und das Heizelementschweißen (Wärmekontakt- und Strahlungsschweißen). Neben den genannten Verfahren ist Polyamid laut Hellerich auch sehr gut mittels Warmgasschweißen zu fügen [62 S. 78]. In Tabelle 16 sind die Vor- und Nachteile der einzelnen Schweißverfahren aufgeführt.

Vor- und Nachteile der Schweißverfahren			
Verfahren	Vorteile	Nachteile	Anwendungen
Vibration	relativ kurze Zykluszeiten; hohe Festigkeit	hohe Schweißkräfte; Belastung durch Vibration; körniger Schweißaustrieb; breite Naht	Saugrohre, Behälter, Luftführungen
Rotation	relativ kurze Zykluszeiten; hohe Festigkeit	rotationssymmetrische Naht erforderlich	Behälter, Stutzen, Deckel, Stabwerke, Filtergehäuse
Ultraschall	kurze Zykluszeit; Integrierbarkeit in Fertigungslinien	hohe mechanische Belastung durch Schwingungen, Schäden durch Mitschwingen möglich	Gehäuse, Geräte, Lagerkäfige, Filter
Laser	austriebsfreie, saubere Schweißnaht; belastungsfreie Schweißung; Gestaltungsfreiheit	möglicherweise Materialanpassung erforderlich	Gehäuse, Deckel, Filter, medizinische Geräte
Heizelement Wärmekontakt	hohe Festigkeit; glatter, zusammenhängender Austrieb	lange Zykluszeit; Kleben der Schmelze am Heizelement; Prozess nur mit Reinigung des Heizelements nach jeder Schweißung möglich	Behälter
Heizelement Strahlung	hohe Festigkeit; glatter, zusammenhängender Austrieb	lange Zykluszeit; nur geringer Verzug zulässig oder Kompensation durch Werkzeug erforderlich	Gehäuse

Tabelle 16: Vor- und Nachteile der Schweißverfahren für Ultramid; Anwendungen [48]

Jedes Verfahren stellt für sich spezielle Anforderungen an die Schweißnahtvorbereitung bzw. an den Fügeprozess. Allen Verfahren zum Schweißen von Ultramid ist aber gemeinsam, dass hohe Festigkeiten der Schweißverbindung erreicht werden können[48].

Wichtig ist laut Becker et al., dass spritzgegossene Formteile aus Polyamid sich beim Verschweißen in „spritzfrischen“ Zustand befinden, da die Teile sonst zur Wasseraufnahme aus der Luftfeuchtigkeit tendieren. Bei glasfaserverstärkten Polyamiden lassen sich nur solche Festigkeiten erzielen, welche jener der Matrix entsprechen, da „an der Naht keine Glasfaserverstärkung wirksam wird“[71 S. 440f].

Kagan et al. bezeichnet das Heizelementschweißen und das Vibrationsschweißen als die effizientesten Schweißverfahren zum Fügen von glasfaserverstärkten Polyamid 6 (Tabelle 17). Der Faktor f_{wm} bezeichnet die Bruchfestigkeit der Schweißverbindung bezogen auf die reine unverstärkte Polymermatrix, f_{wpl} bezeichnet den Schweißfaktor des verstärkten Nylon 6. Ultraschallschweißen erreicht dabei nur ca. 1/3 der Festigkeiten von Laserschweißen, Vibrations- und Heizelementschweißen [78].

Type of the Welding Technology	Weld Factor f_{wm}	Weld Factor f_{wpl}
Linear vibration	1.08	0.46
Orbital vibration	1.10	0.47
Hot plate (contact)	1.12	0.48
Ultrasonics	0.34	0.15
Laser (Transmission)	0.92	0.41

Tabelle 17: Effizienz der Schweißverfahren für glasfaserverstärktes Nylon 6 (33% Glasfasern, bei 23°C, trocken, optimierte Prozess-Konditionen)[78]

Bisher wurden bei Schmelzschweißverfahren von kurzfaserverstärkten Thermoplasten Festigkeiten erreicht, welche unter den Festigkeiten der ungeschweißten, kurzfaserverstärkten Matrix lagen. Abbildung 55 zeigt den Einfluss des Glasfaseranteils auf die mechanischen Kennwerte einer PA6-Schweißnaht, die mittels Heizelementschweißverfahren hergestellt wurde.

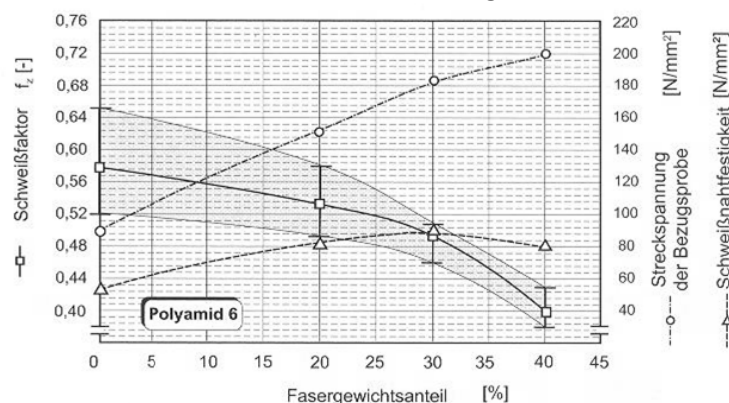


Abbildung 55: Streckspannung, Schweißnahtfestigkeit und Schweißfaktor von Polyamid 6 in Abhängigkeit vom Fasergewichtsanteil [64 S. 13]

Auch mit einem unverstärkten PA6 kann beim Heizelementschweißen die Grundwerkstofffestigkeit nicht erreicht werden. Der Grund hierfür liegt in der im Verhältnis zu anderen Standardthermoplasten niedrigen Schmelzviskosität und Wärmeleitfähigkeit. Dadurch ist die Adhäsionskraft zwischen der plastifizierten Füge-teiloberfläche und der Heizelementoberfläche größer als die Kohäsionskraft innerhalb der Schmelze. Dies führt zum Anhaften von Schmelzrückständen am Heizelement [64 S. 131] Abbildung 56 zeigt schematisch den Schmelzfluß des glasfaserverstärkten Materials beim Heizelementschweißen, was prozessbedingt zu einer querorientierten Anordnung der Glasfasern in der Fügenaht führt.

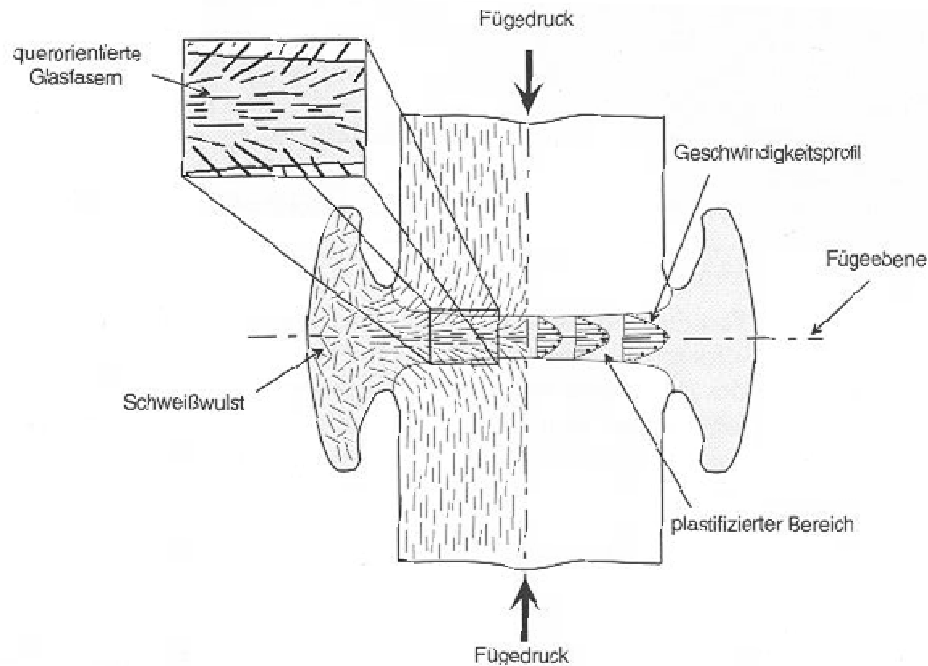


Abbildung 56: Schematische Anordnung der Glasfasern in einer Heizelement-Schweißnaht [64 S. 127]

Industriell werden bei Polymeren die Verfahren Heizelementschweißen und Rotationsreißschweißen genutzt; für kurze Taktzeiten werden Ultraschallschweißen und Vibrationsschweißen bevorzugt.

Entscheidend ist, ob mit den unterschiedlichen Erwärmungsmethoden der verschiedenen Verfahren die für den Fügeprozess erforderliche Schmelzschicht aufgebaut werden kann.

Hierbei wurden bisher mit Vibrationsschweißen die besten Ergebnisse erzielt. Die Verbindung von sehr unterschiedlichen Materialien, wie etwa Holzverbundwerkstoffe und Textilien, ist ebenso möglich [77 S. 2].

Die große Schwierigkeit beim Fügen von Verbundwerkstoffen besteht laut Messler [4 S. 54] darin, die Integrität und die Kontinuität der als Verstärkung wirkenden Phase über die Fügestelle beizubehalten bzw. wiederherzustellen. Dabei ist mit zwei Problemstellungen zu rechnen: Einerseits muss ein genügender Zusammenhalt der Matrices der Fügepartner erreicht werden, andererseits soll der Verstärkungstoff über die Schweißstelle ähnlich wirken wie im unverarbeiteten Verbundwerkstoff.

Beim Verschweißen von glasfaserverstärkten Kunststoffen kommt es zu einer Umorientierung der Fasern in der Schweißnaht (Abbildung 57). Dadurch, dass sich die Fasern, besonders im Randbereich bis zu 90° umorientieren, können die Fasern auch nicht mehr als Verstärkungstoff angesehen werden.

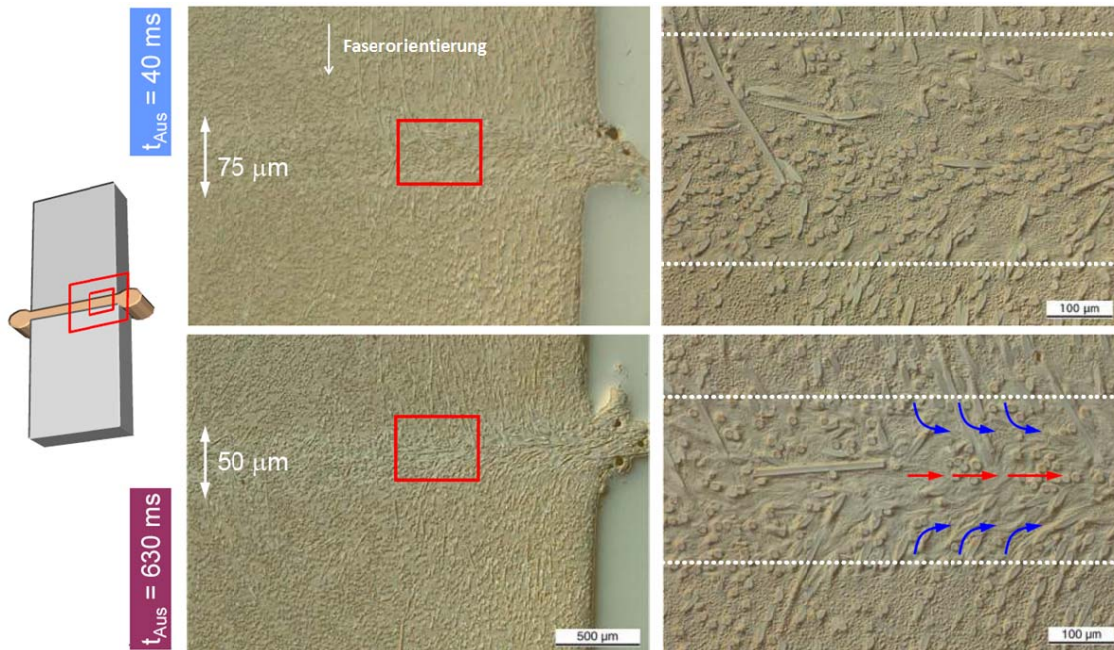


Abbildung 57: Vibrationsschweißen: Schweißnähte aus PA6-GF30 (linear längs; $p = 4,0 \text{ N / mm}^2$; $a = 0,6 \text{ mm}$; $s = 1,5 \text{ mm}$) (BASF).

Sehr deutlich ist die Umorientierung der Fasern in der Schweißnaht im Vergleich zu Orientierung der Fasern in Spritzrichtung zu erkennen (Abbildung 58). Beim Vibrationsschweißen kommt es in der Schweißzone zu einer Verdichtung der Fasern und zu einer Umorientierung und Abscherung der Fasern senkrecht zur Belastungsrichtung des Vibrationsschweißprozesses („Sollbruchstelle“). Dies führt zu einer Abnahme der Festigkeit in der Schweißnaht [77 S. 53f].

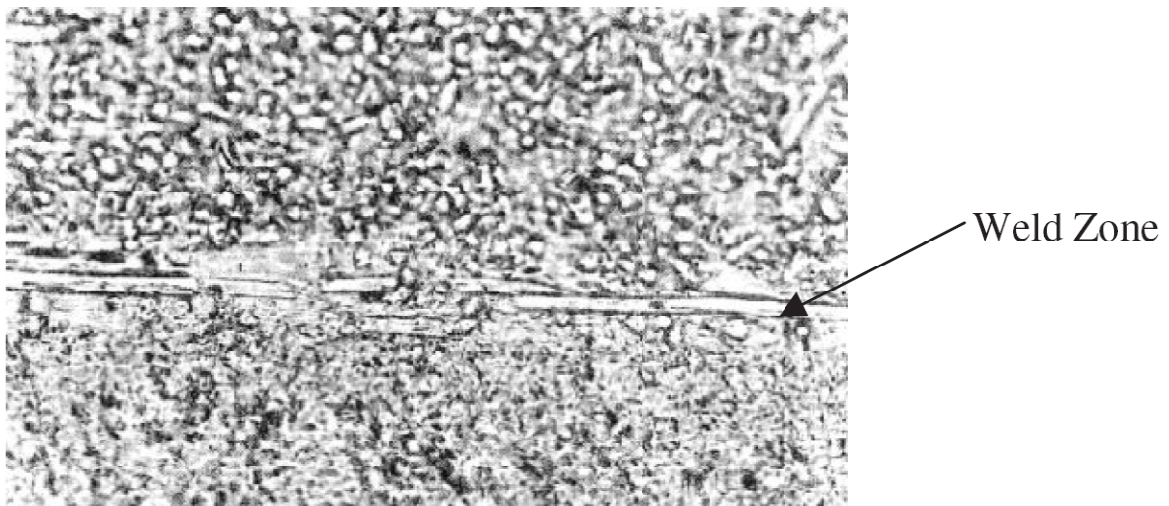


Abbildung 58: Mikroschliffbild der Schweißzone eines kurzfaserverstärkten Polyamids [3 S. 310]

3.4.4.2 Schweißen von Polybutylenterephthalat (PBT/ Ultradur)

Ultradur wird mittels Heizelement- und Ultraschallschweißen sowie durch Rotations- und Vibrationsschweißen gefügt [62 S. 85]. Laserschweißen kann bei geringen mechanischen Bauteilbelastungen eingesetzt werden [58].

3.4.4.3 Schweißen von Polyethersulfon (PES/ Ultrason)

Ultrason muss vor dem Schweißen vorgetrocknet werden, da es sonst beim Aufschmelzen der Fügezone zum Aufschäumen kommt. Für kleinere Bauteile wird vor allem das Ultraschallschweißen ein-

gesetzt. Dabei werden Schweißfaktoren von 0,3 – 0,6 erreicht. Dieses Verfahren eignet sich prinzipiell auch für das Verschweißen von Ultrason mit anderen Materialien, etwa mit PBT. Für eine erfolgreich verschweißte Materialkombination von PES und PBT mit jeweils 30% Glasfasern wurde in der Literaturrecherche kein Beispiel gefunden. Für größere Bauteile hat sich das Heizelementschweißen bewährt. Auch mittels Laserschweißen lassen sich Bauteile aus Ultrason verbinden. Bei entsprechender Gestaltung der Bauteile lassen sich ähnlich hohe Schweißfaktoren wie beim Ultraschall- oder Rotationsschweißen erreichen. Das Warmgasschweißen wird zum Fügen von großen oder komplizierten Einzelteilen eingesetzt. Dabei können an unverstärkten Ultrason-Platten mit V-Nähten Schweißfaktoren bis zu 0,7 erreicht werden [53]. Potente et al. [79] untersuchte bereits 1993 die Schweißeigenschaften von PES mit 30% Glasfasern anhand der drei Schweißverfahren Heizelements-, Vibrations- und Heizstrahler-schweißen. Dabei wurde mittels Heizstrahlerschweißen ein Schweißfaktor von 83% erreicht. Mittels Heizelementschweißen wurde ein Schweißfaktor von 62% und beim Vibrationsschweißen von 65% erreicht. Der Grund für die hohen Werte beim Heizstrahlerschweißen liegt in der berührungslosen Erwärmung der Fügeflächen. Die Fasern in der Fügenaht werden somit erst in der Fügephase umorientiert. Abbildung 59 zeigt die Fügenahtbereiche der drei Schweißverfahren sowie die dazugehörigen Faserorientierungen in der Fügenaht.

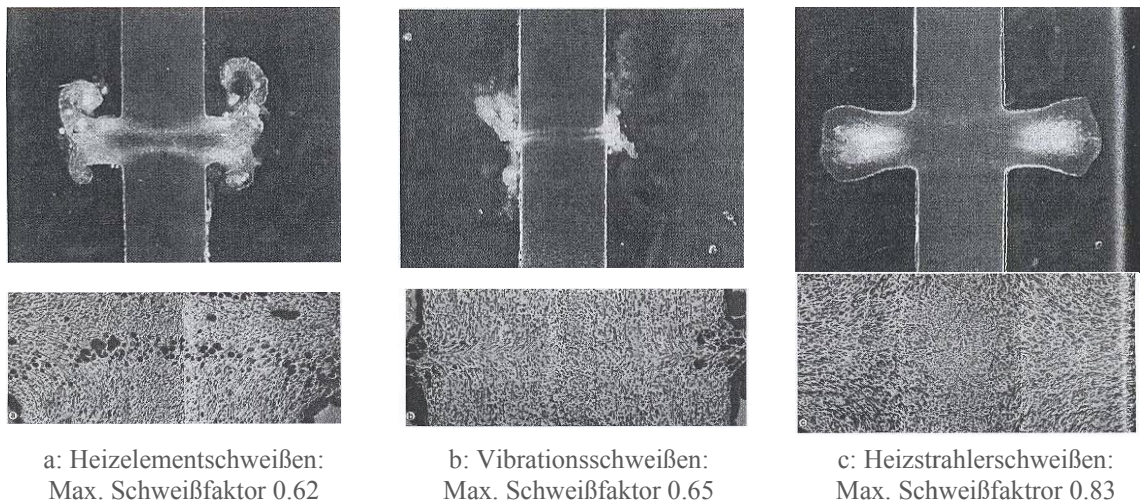


Abbildung 59:Fügenahtbereich und Glasfaserorientierung in den Fügenahtbereichen von faserverstärktem PES.
a) Heizelementschweißen, b) Vibrationsschweißen, c) Heizstrahlerschweißen[79]

Beim Heizelementschweißen lässt sich ganz deutlich die Umorientierung der Fasern in der Fügenaht erkennen. Durch das Erwärmen der Fügeflächen kommt es zum Fließen des Materials in die Wulst. Dieser Schmelzfluss führt zu einer Umorientierung der Fasern, was eine Festigkeitsabnahme zur Folge hat. Dazu tragen auch die Luftblasen in der Fügenaht bei, deren Entstehen Potente mit dem Anhaften des Materials an dem Heizelement erklärt.

Das Vibrationsschweißen von PES führt zu einer schmälere Fügezone. Die Fasern werden förmlich in Nahrichtung gebogen. Beim Heizelementschweißen hingegen werden die Fasern nicht so stark neu orientiert. Es ist zwar eine breite Schmelzschicht mit einem gewissen Maß an Faserfluss vorhanden, doch sind in Schweißnahtmitte einige Fasern vorhanden, welche ihre ursprüngliche Orientierung beibehalten haben.

Beim Heizstrahlerschweißen ist die Entwicklung der Fügeflächentemperatur während der Bestrahlungsphase problematisch. Wird die Zersetzungstemperatur des Polymers überschritten, kommt es zu einer thermischen Schädigung des Materials und zu einer starken Verminderung der Schweißnahtqualität [79 S. 26]. Hinzu kommt, dass unverhältnismäßig viel Grundmaterial in die Schweißnaht eingebracht werden muss, verbunden mit großer Wulstbildung, um hohe Festigkeitswerte zu erreichen.

Uebbing[77] verweist auf das blattartige Aussehen der aus der Fügezone gequetschten und sofort erstarrenden Schmelze (Abbildung 57, rechts). Als Erklärungsmodell bietet er die Vorstellung an,

dass bei geringen Schmelzschichtdicken im Reibschweißvorgang ein abrasiver Mahlprozess die Fasern zerstört und eine Mischreibung aus Scherung des Schmelzfilms und Wälzreibung auf den Faserbruchteilen auftritt. Die Haftung zwischen Schmelze und Feststoff wird dadurch gestört und es kommt zu einem Ausschleiben der Schmelze in den Wulst [77 S. 48].

3.4.4.4 Fügen von Ultramid, Ultradur und Ultrason mittels FSW

In der Literatur sind keine Angaben zum FSW von faserverstärktem Ultramid, Ultradur und Ultrason bekannt. Friction Stir Welding besitzt laut Yousefpour [3 S. 319] ein großes Potential zum Schweißen kurzfaserverstärkter Thermoplaste. Obwohl es in der Rührzone zum Faserbruch kommen kann, werden die Fasern mitverrührt. Somit besteht auch das Schweißgut in der Rührzone aus einem ein kurzfaserverstärkten Thermoplast und es sind theoretisch haltbare, zuverlässige Schweißungen möglich.

4 Experimenteller Teil

4.1 Anlagen am Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik

4.1.1 Rührreibschweißmaschine MTS ISTIR BR4

Für die Schweißversuche wurde eine hydraulikbetriebene 2D – FSW Portalanlage der Firma MTS Systems Corporation verwendet (Abbildung 60).



Technische Daten [10]

Arbeitsfläche:	2450 x 1250 mm
max. Schweißgeschwindigkeit:	6400 mm/min
Maximale Drehzahl:	3200 U/min
Maximale Z-Kraft:	35.6 kN
Maximales Spindeldrehmoment:	180 Nm

Abbildung 60: Friction-Stir-Welding-Anlage am IWS

Die Maschine kann mit zwei verschiedenen Schweißköpfen bestückt werden. Diese genügen den speziellen Anforderungen für das Aluminium- bzw. Stahlschweißen.

Der Stahlkopf (Abbildung 61) besitzt eine gekühlte Werkzeugaufnahme mit 19 mm Durchmesser, während beim Aluminiumkopf mittels eines Spannfutters mit Wellenmutter verschiedenste Werkzeug-Durchmesser eingespannt werden können (Abbildung 62).



Abbildung 61: Stahlkopf



Abbildung 62: Aluminiumkopf

4.1.2 Temperaturregelung und -messung

Zum Regeln der Temperatur von Heizplatte und Heizpatronen wurde ein Zwei-Punkt-Temperaturregler der Firma Joens verwendet (Abbildung 63). Dieser regelt die Temperatur ähnlich

einem Bimetall-Thermostat durch Ein- und Ausschalten der Heizung¹⁶. Die Temperatur an der Implant-Heizplatte wurde mittels eines angepunkteten Thermoelements gemessen und an den Joens-Temperaturregler übermittelt. Bei der Vorheizung mittels Heizpatrone wurde die Temperatur mittels eines an der Oberfläche angebrachten Klebthermoelements Typ K abgenommen (Daten: Kapitel 11.5).

Zum Messen der Temperatur am Bauteil selbst wurde ein Infrarot-Thermometer für die berührungslose Temperaturmessung mit Laser-Visierung verwendet (Abbildung 64) (Daten: Kapitel: 0). Bei den Vorversuchen wurde die Temperatur mittels eines Mantelthermoelements Typ K gemessen, welches mittels einer Bohrung 15 mm von der Fügenaht entfernt in den Kunststoffplatten platziert wurde (Daten: Kapitel 11.5.5).



Abbildung 63: Temperaturregler Joens



Abbildung 64: Berührungslose Temperaturmessung

4.1.3 Zugprüfmaschine

Für die Zugversuche wurde die Zugmaschine RMC100 von der Firma Zwick Roell verwendet. Mit dieser Maschine sind Zugprüfungen bis zu einer Maximalkraft von 100 kN möglich. Zu Beginn der Diplomarbeit waren die Klemmbacken mechanisch, ab April 2009 wurden hydraulische Klemmbacken verwendet (Abbildung 65).



Abbildung 65: Zugprüfmaschine RMC100 mit mechanischen (links) und hydraulischen Klemmbacken (rechts)

¹⁶ Gespräch mit Ing. Kerschbaumer K. am 10.01.2010

4.1.4 Mikroskope

Stereo-Mikroskop:

- Zeiss Discovery. V20

Auflichtmikroskope in inverser Bauweise:

- Zeiss Observer.Z1m,
- Reichert-Jung Mef3.

4.1.5 Rasterelektronenmikroskop

Die Untersuchungen der Bruchflächen wurden am IWS auf einem Rasterelektronenmikroskop Typ LEO Zeiss 1450 VP mit X-Flash Detektor von Bruker für die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) durchgeführt.

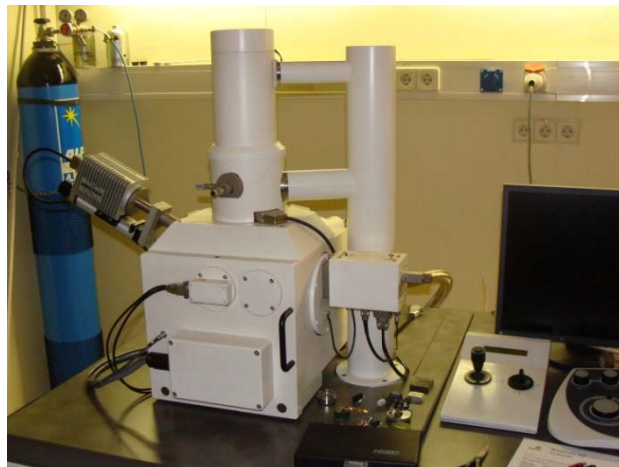


Abbildung 66: Rasterelektronenmikroskop am IWS

4.1.6 Elektrodenofen ESAB

Im Ofen ESAB TP80/460 wurden die Proben getrocknet und vorgewärmt.



Abbildung 67: Elektrodenofen

4.2 Ablauf der Diplomarbeit

Der Ablauf der Diplomarbeit kann in die Schritte Werkzeugentwicklung, Vorversuche und Parameteroptimierung unterteilt werden (Abbildung 68).

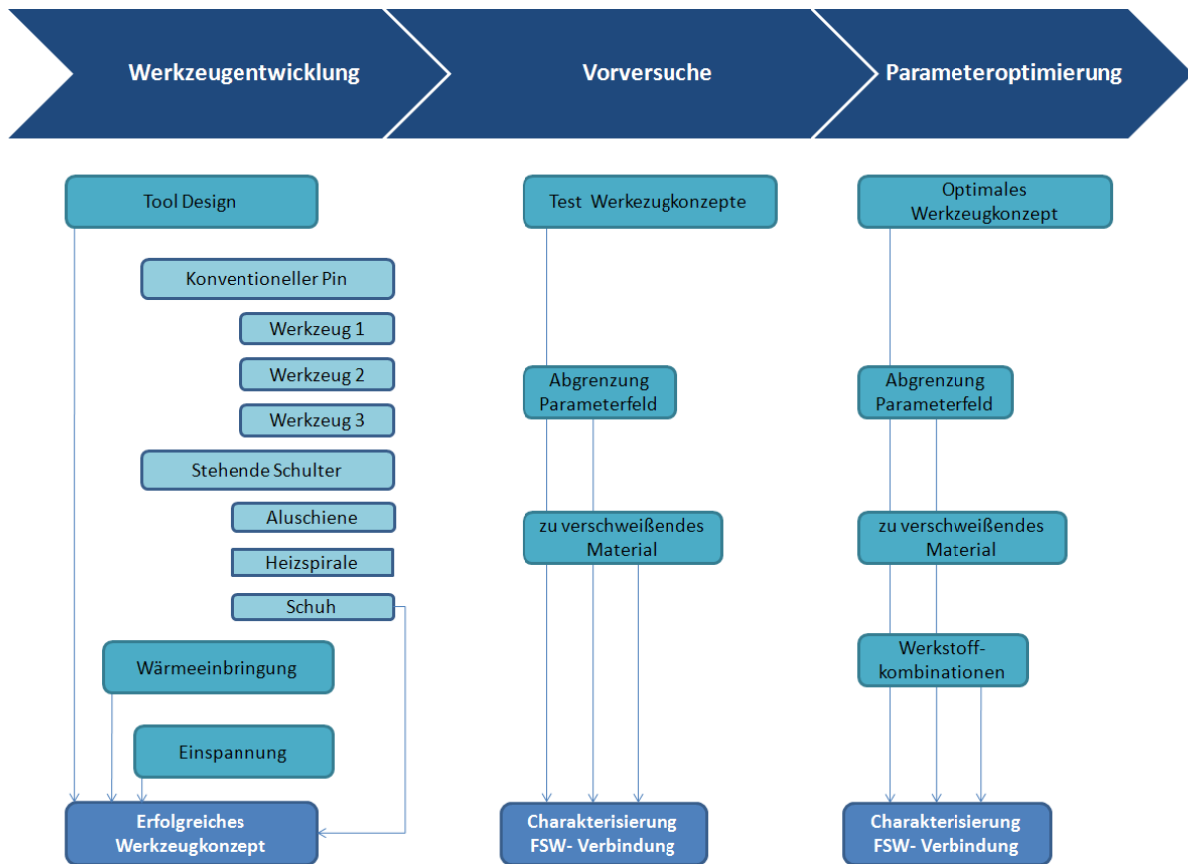


Abbildung 68: Ablauf der Diplomarbeit

Im folgenden Kapitel wird näher auf den Punkt Werkzeugentwicklung eingegangen werden, sowie auf die Verfahren der Wärmeeinbringung und die Einspannung der Proben, s. Kapitel 4.3.

Die Bewertungsmethoden (morphologische und mechanische Untersuchungen), mit denen die FSW-Verbindung charakterisiert wurde, werden ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt, s. Kapitel 4.5.

Die Resultate der Vorversuche und Parameteroptimierung werden hingegen im Kapitel 5 (Ergebnisse) dargestellt.

4.2.1 Probenherstellung

Schweißproben

Von BASF wurden spritzgegossene Proben in der Größe 109,2 x 111,7 mm mit einer Dicke von 4 mm zur Verfügung gestellt. Der Zuschnitt der Platten, und wie diese dann miteinander verschweißt werden sollten, wurde von BASF vorgeschlagen (Abbildung 69).

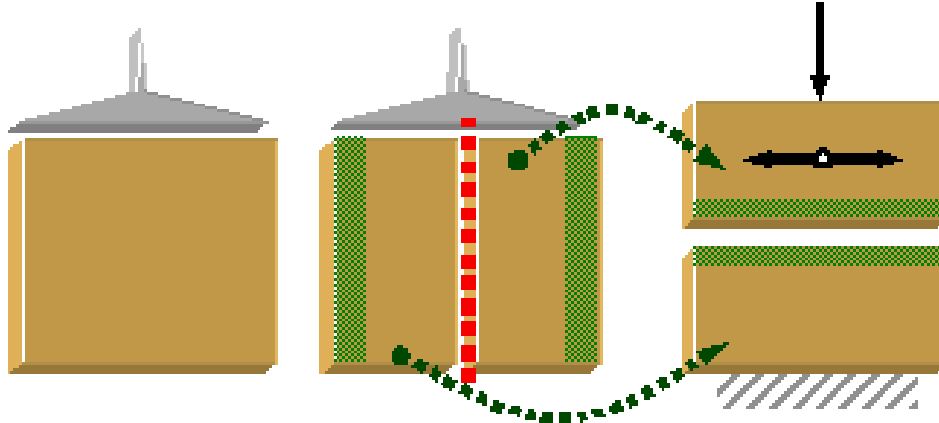


Abbildung 69: Schneiden der Proben und Verschweißen (Vibrationsschweißen)¹⁷

Die Platten wurden in der Mitte – in Spritzgießrichtung – mit einer Bandsäge zugeschnitten (rote punktierte Linie) und an den Außenkanten verschweißt (grüner Bereich). Dieser Bereich ist, bedingt durch den Spritzgießprozess, faserärmer als die anderen Bereiche (Kapitel 11.1).

Prüfkörper aus den fertig verschweißten Platten

Die Platten wurden dann mittels FSW verschweißt und Zugproben und Proben für die plastographischen Untersuchungen herausgearbeitet. Abbildung 70 zeigt schematisch die Entnahmestelle der Zugprobe relativ zur FSW-Fügenreht.

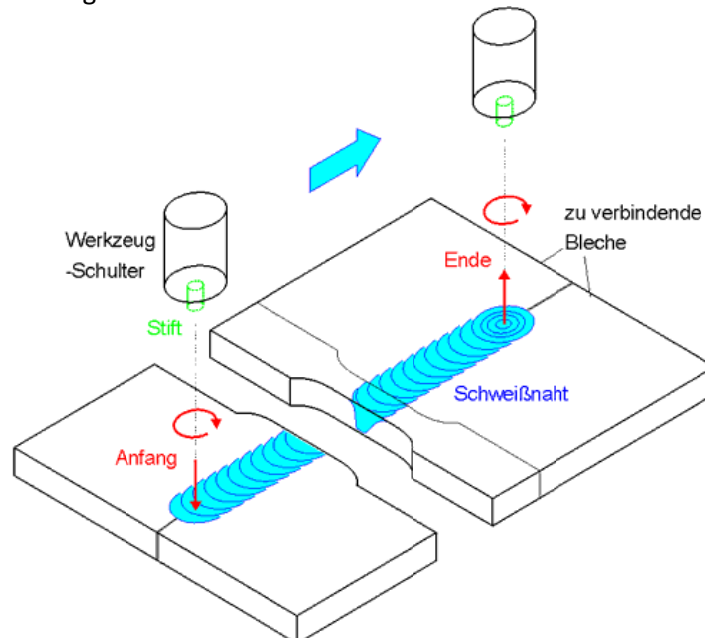


Abbildung 70: Rührreißschweißen- Entnahme der Zugprobe[80]

Der zu prüfende Bereich an den geschweißten Platten wurde von der Firma BASF vorgeschlagen (Abbildung 71).

¹⁷ Email von J. Kuriykov, Parts Development Engineering Plastics Europe BASF SE Ludwigshafen, 16.12.2008

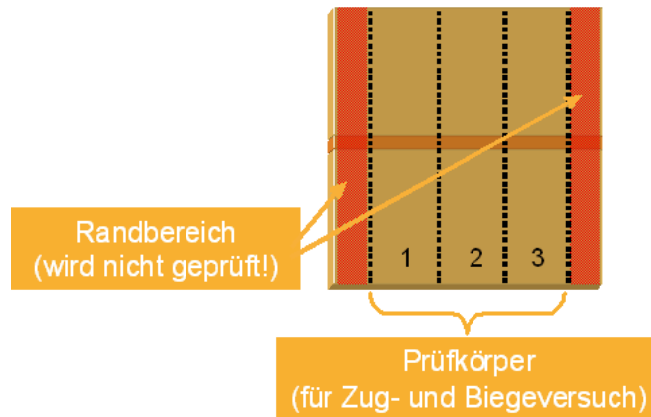


Abbildung 71: Zu prüfende Bereiche an den verschweißten Platten¹⁸

Der Elektrodenofen wurde teilweise dazu benützt, die bei Raumklima gelagerten Proben zu trocknen. Gemäß den Richtlinien des Herstellers BASF müssten die Platten aber für wenigstens einige Tage getrocknet werden¹⁹.

4.2.2 Schweißversuche

Untersuchte Parameter

Folgende Parameter wurden bei den FSW-Schweißversuchen variiert

- Drehzahl
- Vorschubgeschwindigkeit
- Werkzeugtemperatur
- Werkzeuggeometrie
- Pineindringtiefe
- Werkzeug-Winkel

Weitere wichtige Einflussgrößen auf ein optimales Schweißergebnis sind die Art der Wärmeeinbringung (Schulter FSW-Werkzeug, Heißluftfön, Heizplatte, beheizter Schuh) und die Art der Einspannung sowie der Konditionierungszustand der Proben.

Pineindringtiefe

In der Literatur wurde die Pinlänge 0,25mm kürzer als die Materialdicke gewählt, um eine optimale Durchschweißung zu gewähren [27 S. 1031]. Bei den Vorversuchen war es aufgrund des Prototypencharakters der meisten Werkzeuge und Vorrichtungen immer wieder zu Kollisionen gekommen. Daher wurde die Pineindringtiefe bewusst zu kurz gewählt, damit es sicher zu keiner Kollision mit der Unterlage kommen konnte. Dies führte aber dazu, dass ein Großteil der Proben nicht komplett durchgeschweißt wurde. Ein weiteres Problem ergab sich durch die Einspannung: Teilweise wurden die Platten während des Schweißens auseinandergedrückt, wodurch eine durchgehende Verschweißung über die Plattendicke nicht gegeben war (Abbildung 72).

¹⁸ Email von J. Kuriykov, Parts Development Engineering Plastics Europe BASF SE Ludwigshafen, 16.12.2008

¹⁹ Gespräch mit Herrn Kuriykov am 27.11.2009 am IWS, Graz

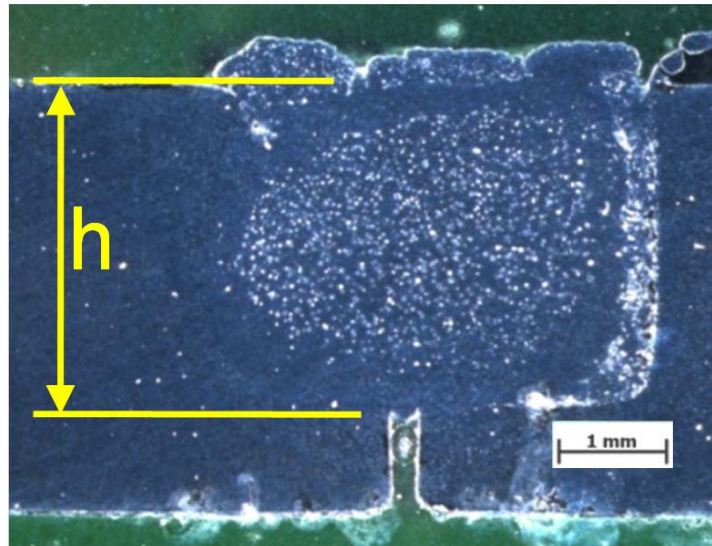


Abbildung 72: Fehlende Durchschweißung der Probe; deutlich erkennbar ist die verminderte Pineindringtiefe (hier: $h = 3 \text{ mm}$) und der Versatz der Platten.

Dies ergab folgende Modifikationen bei der Betrachtung der mechanischen Kennwerte: beim Zugversuch wurde der nicht verschweißte Bereich bei der Berechnung der Bruchspannung nicht berücksichtigt. Durch die Kerbe blieb jedoch als Unsicherheit der Einfluss der Kerbwirkung durch den nicht verschweißten Bereich im Schweißgrund. Es wurde bei den optimierten Schweißungen der Teil der Oberfläche bzw. der Bereich der Kerbe unten mittels mechanischer Bearbeitung abgetragen, um die reine Zug- und Biegefestigkeit der Verbindung berechnen zu können.

Beidseitig verschweißte Geometrien

Bei einer beidseitigen Schweißung kommt es zu einer zweimaligen Erwärmung des Werkstoffs. Laut Auskunft von Herrn Kuriykov von BASF ist somit die zweite Schweißung vergleichbar mit dem Versuch, ein recyceltes Polymer zu fügen. Es wird postuliert, dass die Molekülketten beim zweiten Verühren so kurz werden, dass die Verbindung nicht oder schlecht zustande kommt²⁰.

4.2.3 Untersuchungsmatrix

Kurze Beschreibung und Kombination mit diversen Konzepten

	Ultramid	Ultradur	Ultrason
Ultramid	X	X	
Ultradur		X	X
Ultrason			X

Tabelle 18: Verschweißte Kombinationen

4.3 Werkzeugentwicklung und Werkzeug-Design

Die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführte Werkzeugentwicklung kann in die Abschnitte Werkzeug-Design, Wärmeerbringung und Einspannung gegliedert werden. Das Werkzeug-Design kann in die beiden Konzepte

- konventioneller Pin
- stehende Schulter

unterteilt werden (Abbildung 73).

²⁰ Gespräch mit Herrn Kuriykov am 27.11.2009 am IWS, Graz

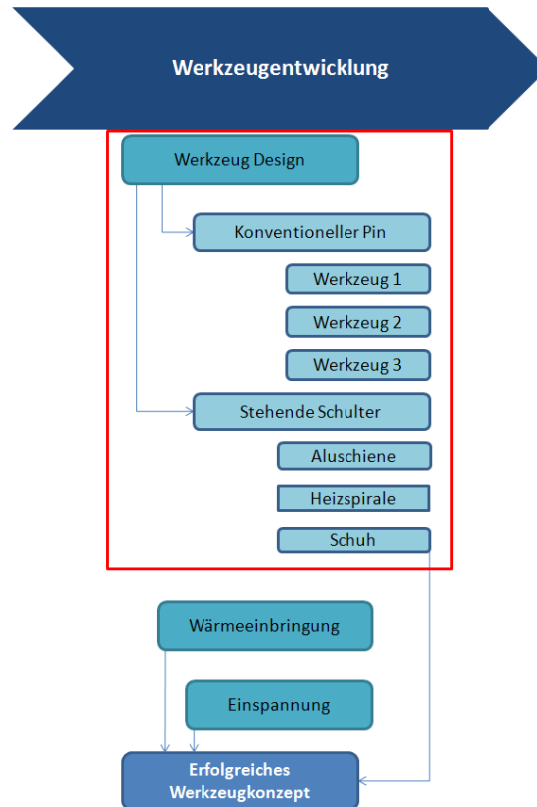


Abbildung 73: Ablauf der Werkzeugentwicklung, insbesondere des Werkzeug-Designs

Zunächst wurden Versuche mit konventionellen Rührreibschweißwerkzeugen (Kapitel 4.3.1) durchgeführt. Da diese Schweißversuche zu keinem befriedigenden Ergebnis führten, wurde ein Werkzeug mit stehender Schulter (Kapitel 4.3.2) entwickelt. In der vorliegenden Diplomarbeit wird folglich mit der Bezeichnung „Pin“ die Spitze des Werkzeugs (ohne Schulter) bezeichnet.

Werkzeugwerkstoff

Das Hauptkriterium für die Werkzeugwerkstoffwahl beim FSW ist die Festigkeit des Werkzeugwerkstoffs bei der Prozesstemperatur. Diese liegt beim FSW gewöhnlich knapp unter der Schmelztemperatur der zu verschweißenden Bauteile. Je näher Werkstoffe ihrem Schmelzpunkt kommen, desto weicher werden sie. Die Festigkeit sowie der Widerstand gegen Verschleiß sollte bei Prozesstemperatur möglichst hoch sein. Somit müssen Werkstoffe gefunden werden, welche eine Schmelztemperatur besitzen, die deutlich über der Prozesstemperatur liegt. Bei Aluminium (Schmelztemperatur= 660°C) wird beispielsweise Warmarbeitsstahl (Schmelztemperatur 1400°C) eingesetzt; Stahl selbst wird am IWS mit Werkzeugen aus Wolfram-Legierungen verschweißt. Wolfram hat einen Schmelzpunkt von 3420°C, und besitzt so bei dem Schmelzpunkt von Stahl eine noch ausreichende Festigkeit. Verwendet werden vielfach Legierungen aus Wolfram-Lanthan und Wolfram-Karbid-Kobalt²¹. Im vorliegenden Fall liegen die Schmelztemperaturen der zu verschweißenden Bauteile etwa bei 220°C.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden die FSW-Werkzeuge aus BÖHLER N335²²Stahl gefertigt.

²¹ Gespräch mit Di Gunter Figner, IWS, Sommer 2009

²² Nichtrostender und hitzebeständiger Stahl; EN: 1.4122; DIN: X39CrMo17-1; [112 S. 12f]

4.3.1 Konventionelles Rührreibschweißwerkzeug

Die Vorversuche wurden mit konventionellen FSW-Werkzeugen mit Schulter und Pin durchgeführt. Die Geometrie ist angelehnt an FSW-Werkzeuge für das Verschweißen von Aluminium. Abbildung 74 zeigt einen Überblick über die Geometrie der verwendeten Werkzeuge (Anhang, Kapitel 11.4.1).



Abbildung 74: Übersicht über die verwendeten Werkzeuge

Werkzeug 1

Die ersten Versuche wurden mit einem Werkzeug aus H13-BÖHLER N335 durchgeführt (Abbildung 75). Die Pinlänge betrug 3mm. Die relativ breite Ausführung (10 mm Schulterdurchmesser und 3,5 mm Durchmesser an der Pin Spitze) erwies sich ungünstig im Bezug auf den Auswurf von Material aus der Fügezone.

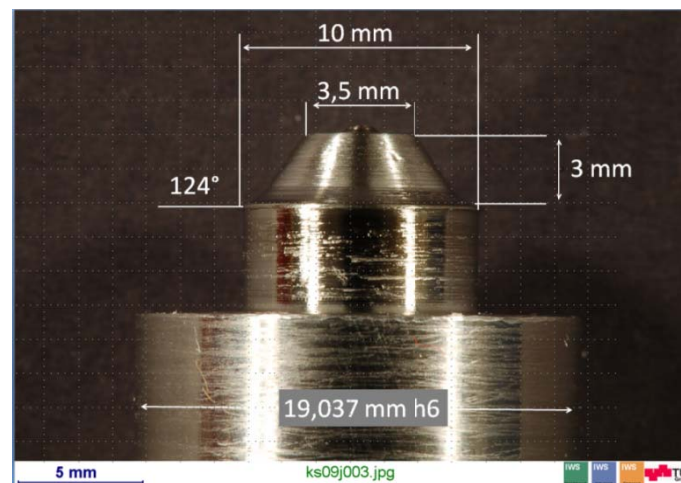


Abbildung 75: Werkzeug 1

Werkzeug 2

Die besten Ergebnisse wurden mit Werkzeug 2 erreicht, da durch die kegelförmige Form des Pins eine Schmiedewirkung auf das verrührte Material ausgeübt wurde (Abbildung 76). Die Pinlänge beträgt 3,8mm, der Durchmesser der leicht konischen Schulter 12mm.

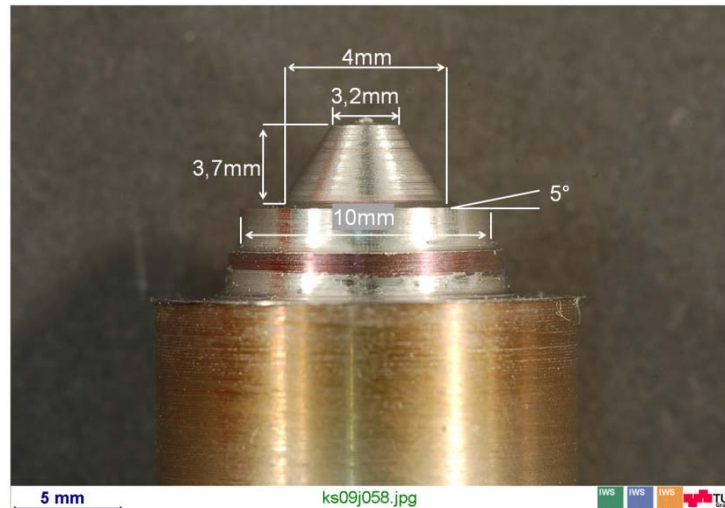


Abbildung 76: Werkzeug 2

Werkzeug 3

Werkzeug 3 besitzt eine Pinspitze mit einer beinahe zylindrischen Form (Abbildung 77). Es wurde vermutet, dass durch die im Vergleich zu Werkzeug 1 und 2 weniger breite Form des Pins weniger Material aus der Fuge herausgedrückt wird. Dies konnte jedoch experimentell nicht nachgewiesen werden.



Abbildung 77: Werkzeug 3

Allen drei Werkzeugen war gemeinsam, dass beim Schweißen relativ viel Material aus der Fügenaht herausgedrückt wurde, was zu porösem Gefüge und einer Querschnittsminderung im Bereich der Schweißnaht führte. Diesem Problem wurde versucht mit dem Werkzeugkonzept „stehende Schulter“ zu begegnen.

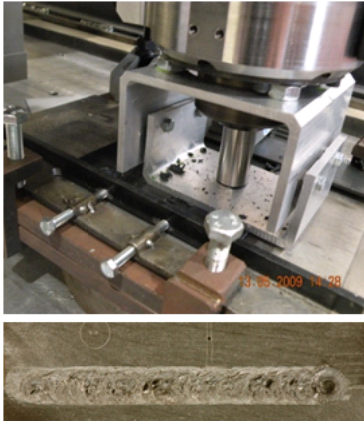
4.3.2 Werkzeug mit stehender Schulter

Laut Literatur (Kapitel 3.1) werden beim FSW von Polymeren die besten Ergebnisse mittels eines Werkzeugs mit stehender, beheizter Schulter erreicht. Genau genommen handelt es sich somit um eine Kombination der Schweißverfahren durch Wärmekontakt, bei denen Wärme durch direkten Kontakt in den Kunststoff geleitet wird (wie etwa Heizelementschweißen), und jener Verfahren, deren Prinzip auf der Erwärmung der Schweißkontaktflächen durch Reibung beruht (Rotationsreibschweißen).

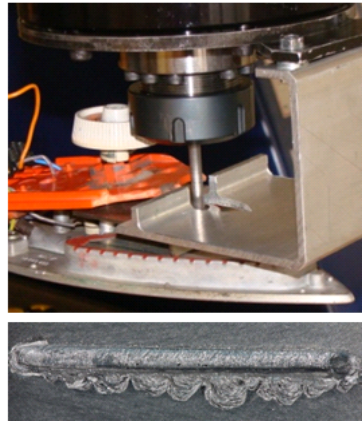
Werkzeugkonzepte

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden drei verschiedene Werkzeugkonzepte entwickelt und getestet (Abbildung 78): zunächst wurde ein konventioneller Pin mit einer stehenden Schulter aus Aluminium kombiniert. Dies führte bereits zu einer glatteren Schweißnahtoberfläche. Durch den großen Spalt und die ungenügende Wärmeeinbringung wurde das Material jedoch porös und nach oben durch den Spalt Schulter/Pin gedrückt.

Stehende Schulter



Prototyp Heizplatte oben



Beheizte, stehende Schulter

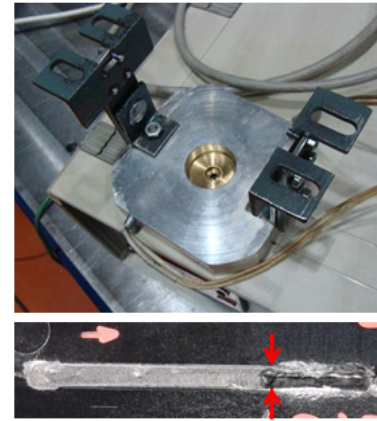


Abbildung 78: Vergleich der Werkzeugkonzepte mit stehender Schulter; Schweißnahtaussehen

Um dem Problem der ungenügenden Wärmeeinbringung zu begegnen, wurde ein Prototyp mit einer beheizten Schulter aus einem Bügeleisen gebaut. Die Fügepartner zeigten hier durch die Wärmeeinbringung eine gute Durchmischung, allerdings auch hier eine nicht optimale Schweißnahtoberfläche und viele Poren. Die Temperatur war schwer einzustellen und in der Regelung sehr träge. Außerdem war dieses Werkzeug sehr unhandlich und schwer zu positionieren. Als Pin wurde ein so genannter „Adjustable Pin“ für den Aluminiumkopf verwendet (Abbildung 79).



Abbildung 79: Adjustable Pin für Prototyp Heizplatte oben, Pinspitze mit Gewinde (rechts) (M4)

Bei diesem Werkzeug kann die Pineindringtiefe mittels der Pin-Steuerung der FSW-Maschine separat eingegeben werden. An der Spitze des Werkzeuges mit einem Durchmesser von 4mm wurde ein Gewinde angebracht (Zeichnung: Kapitel 11.4.2).

Eine Versuchsreihe (KS_0907) wurde mit einem Pin mit Durchmesser 5,2mm durchgeführt (Abbildung 141, Kapitel 5.2.5).

Das endgültige Konzept besteht aus einer fixen Schulter aus Aluminium, in der der Pin beweglich gelagert eingebaut ist (Abbildung 80). In der fixen Schulter befinden sich zwei Heizpatronen (Datenblatt: Kapitel 11.5.2), die mittels eines auf der Schulter aufgeklebten Thermoelements und eines Temperaturregelgeräts gesteuert werden. Es können Schweißnähte mit hohen Festigkeiten reproduzierbar hergestellt werden.

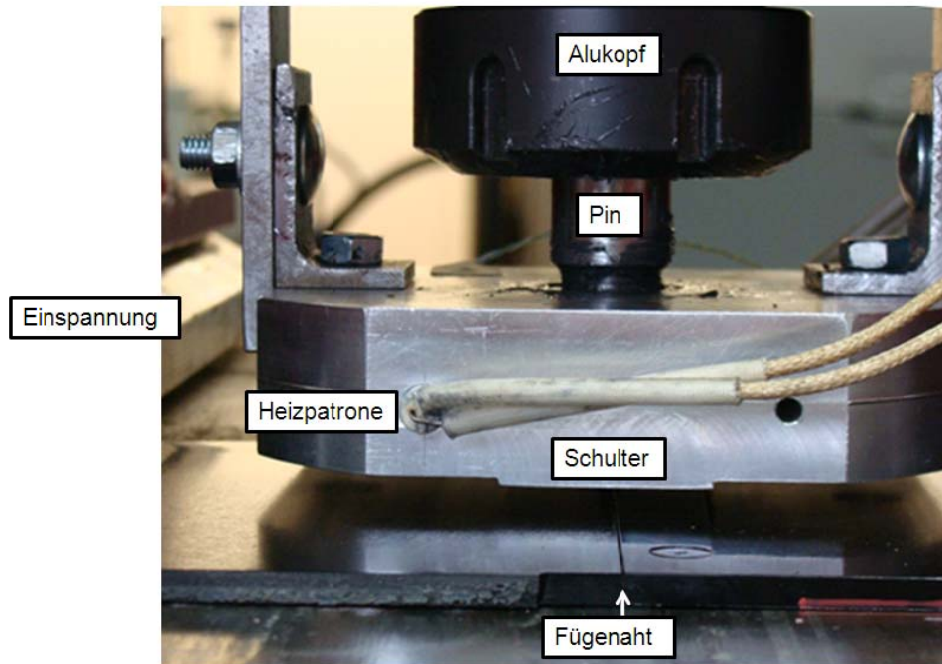


Abbildung 80: Werkzeug mit stehender beheizter Schulter

Der große Vorteil dieser Vorrichtung besteht in der hohen Positionier-Genauigkeit und im modularen Aufbau. Es wurden zwei Varianten von Pins in die Vorrichtung eingebaut (Abbildung 81); Pin 1 mit einer zylindrischen Spitze und einem Linksgewinde, und Pin 2 mit einer konischen Spitze und einem Linksgewinde. Die Pins weisen jeweils einen Durchmesser von 4 mm auf, die genauen Abmessungen finden sich im Kapitel 11.4.6.

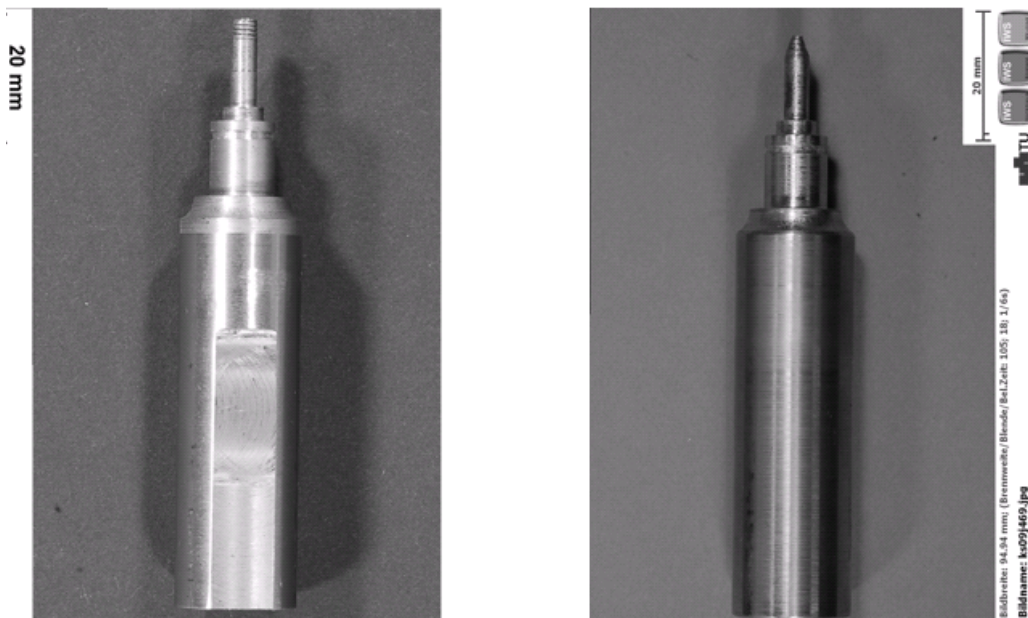


Abbildung 81: Pin 1 (links) und Pin 2 (rechts) des Werkzeugs mit stehender, beheizter Schulter

Design der Pinspitze

Higashiyama et al. [81] stellten in Versuchen zum Materialfluss beim FSW fest, dass beim Schweißen von PVC die Lage der fehlerhaften Schweißstellen durch eine Änderung des Werkzeugsdesigns (Rechtsgewinde oder Linksgewinde) beeinflusst werden kann. Beim rechtsgängigen Pin zeigten sich die Fehlerstellen in der Schweißnaht gleichmäßig verteilt. Beim linksgängigen Werkzeug hingegen lagerten sich die fehlerhaften Schweißstellen knapp hinter dem sich drehenden Pin an und wanderten mit dem Vorschub des Werkzeugs weiter[81] (Abbildung 82).

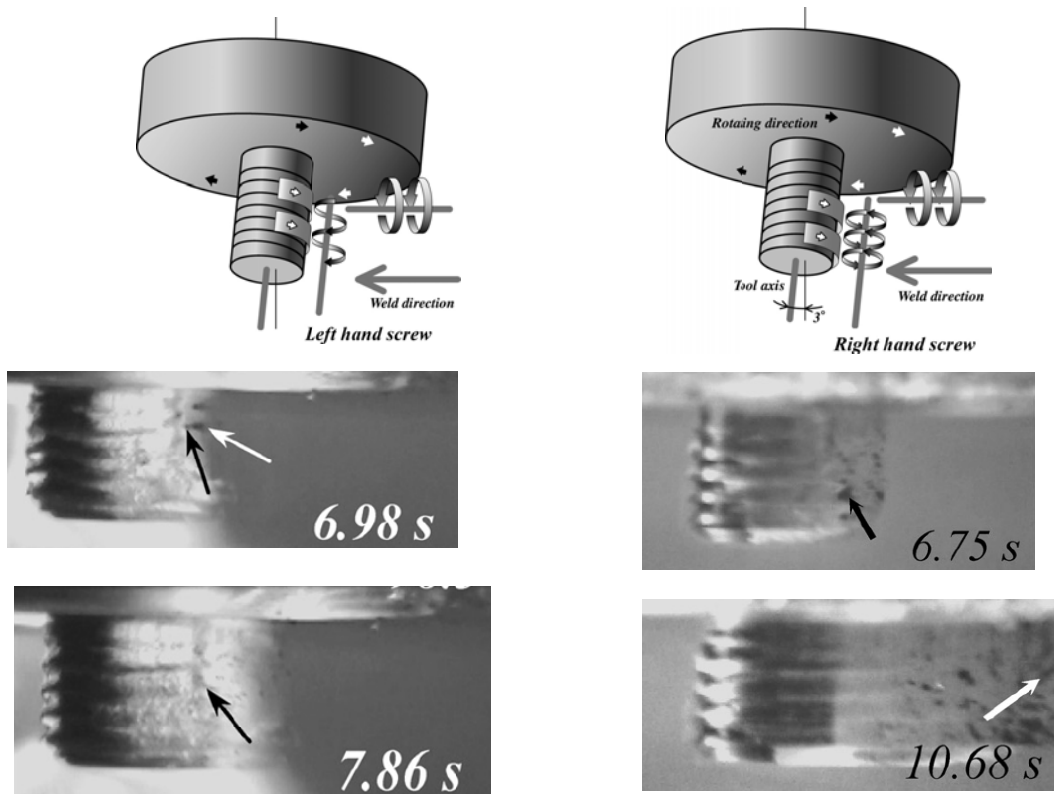


Abbildung 82: Pin mit Linksgewinde (links) und Pin mit Rechtsgewinde (rechts)[81]: Verteilung der Schweißfehler nach 6,98 bzw.7,86 Sekunden Schweißzeit (Linksgewinde) / 6,75 bzw. 10,86 Sekunden Schweißzeit (Rechtsgewinde)

4.4 Versuchsaufbau

4.4.1 Konzepte der Wärmeeinbringung

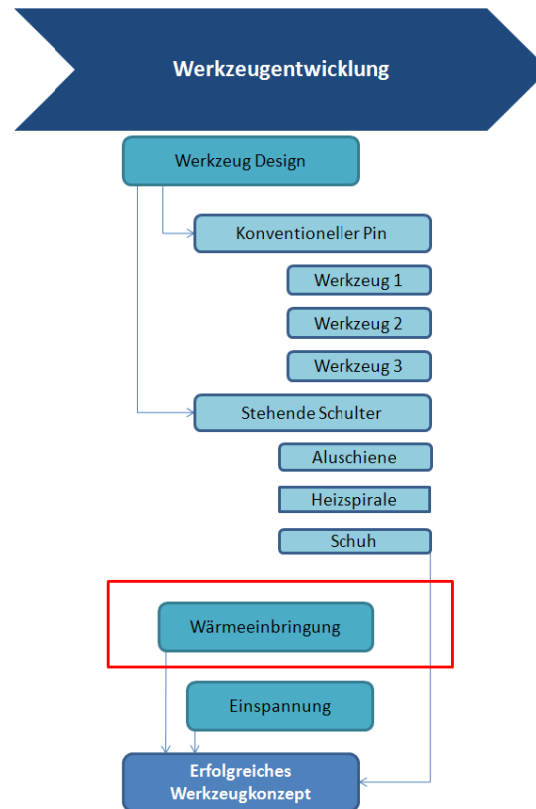


Abbildung 83: Werkzeugentwicklung: Wärmeeinbringung

Die Versuche mit den konventionellen Rührreibschweißwerkzeugen zeigten, dass durch die Reibung des Pins und der Schulter zu wenig Wärme in den Werkstoff eingebracht wurde.

Viele Polymere neigen jedoch bei erhöhten Temperaturen zur Selbstschmierung, was die Reibung verringert, und es nötig macht, Zusatzhitze einzubringen [22 S. 324f].

Da aber eine teigige Phase für den Prozess notwendig ist, wurden die folgenden alternativen Konzepte für eine zusätzliche Wärmeeinbringung in die Fügezone entwickelt:

- Heizplatte: zusätzliche Wärmeeinbringung von unten
- Heißluftfön
- Trockenofen; die Platten wurden vorgeheizt
- Konzept beheizte Schulter
- Konzept stehende, beheizte Schulter

Die beiden letzten Konzepte sind Teil des Werkzeugdesigns und wurden bereits in Kapitel 4.3.2 beschrieben.

Die Heizplatte ist eine mit der Joens-Temperaturregleinheit elektrisch beheizbare Metallplatte, auf der ein dünnes Stahlblech mit einem punktgeschweißten Thermoelement zur Temperaturregelung angebracht wurde. Die Heizplatte wurde mit Hilfe von Spannpratzen am FSW-Maschinentisch fixiert (Abbildung 84). Die Soll-Temperatur der Platte wird an der Regeleinheit fix eingestellt.

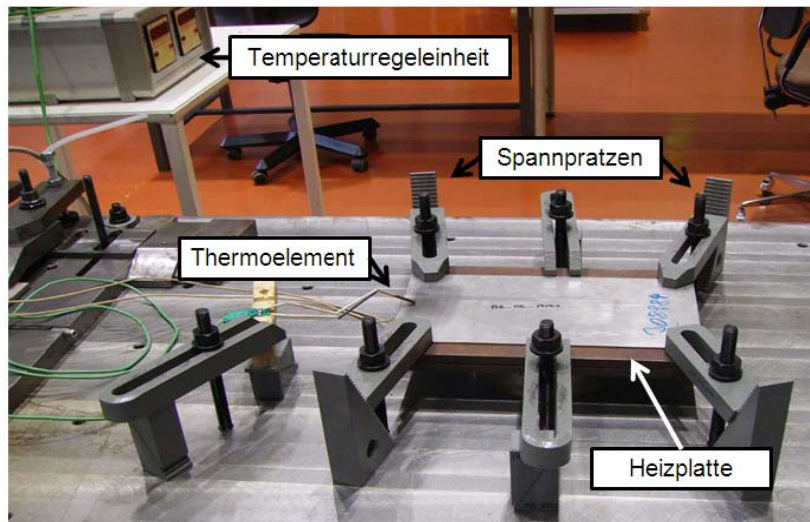


Abbildung 84: Heizplatte mit Temperaturregeleinheit

Eine andere Möglichkeit zur Wärmeeinbringung in die Schweißnaht ist die Erhitzung der Plattenoberfläche während des FSW-Vorgangs mittels Heißluftfön (Datenblatt: Kapitel 11.5.3). Dies führte bei einigen Versuchen lokal zum thermischen Abbau des Werkstoffs (Abbildung 85).



Abbildung 85: Wärmeeinbringung mittels Heißluftfön / Thermische Schädigung des Werkstoffs

Als weitere Möglichkeit Wärme in den Werkstoff einzubringen wurden die Werkstoffplatten mittels Ofen (Kapitel 4.1.6) auf eine bestimmte Temperatur erwärmt (200°C/ 240°C), und dann heiß direkt aus dem Ofen verschweißt. Dabei war es sehr schwer, die jeweils aktuelle Ist-Temperatur der Platten zu bestimmen. Die Platten kühlten durch den Kontakt mit der Einspannung schnell aus. Damit verbunden war eine Längenänderung (Verkürzung) durch die hohen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Polymere.

4.4.2 Einspannung

Aufgrund der hohen Momente und Kräfte, die beim Rührreibschweißen auftreten, müssen die Fügepartner sehr gut fixiert werden, um ein Verrutschen zu verhindern. Ohne feste Einspannung ist eine Schweißung von Polymeren mit Rührreibschweißen nicht möglich.

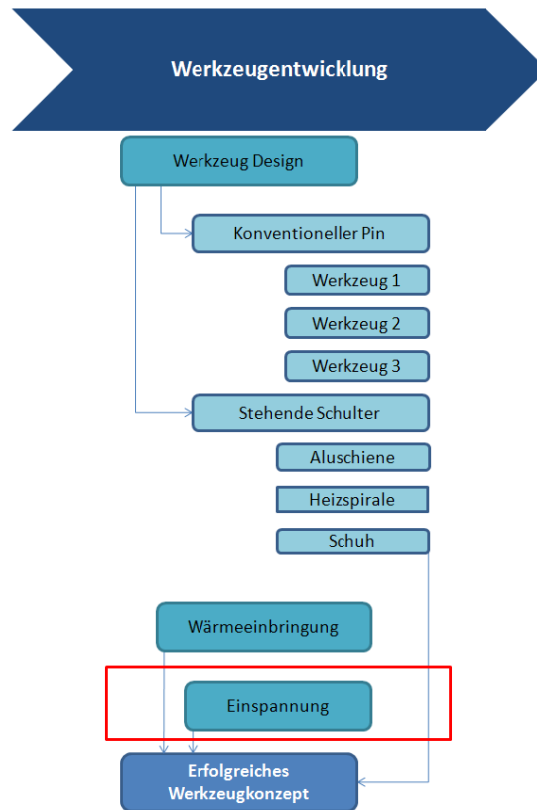


Abbildung 86: Werkzeugentwicklung: Einspannung

Es wurden zwei verschiedene Einspannungen verwendet: eine Einspannplatte für die Versuche mit der beheizten Platte (Abbildung 87), und eine pneumatische Spannvorrichtung (Abbildung 88). Die rahmenförmige Einspannplatte hat den Vorteil, dass die Platten sehr genau zueinander positioniert werden könnten. Durch den mit Schrauben gesicherten Anschlag wird eine Verschiebung der Platten während des Schweißprozesses weitgehend verhindert. Mit Spannpratzen werden die Platten nach unten gespannt. Der Kontakt zu der unterhalb liegenden Heizplatte wird durch die feste Einspannung gewährleistet.

Die pneumatische Spannvorrichtung besteht aus zwei, in y-Richtung des FSW-Tisches verschiebbaren, parallelen Spannteilen, die mittels Pneumatikzylindern gespannt werden (Abbildung 88); eine zusätzliche Beheizung ist hierbei nicht vorgesehen.

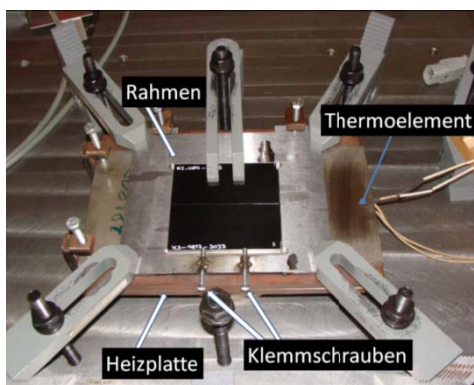


Abbildung 87: Einspannung Heizplatte

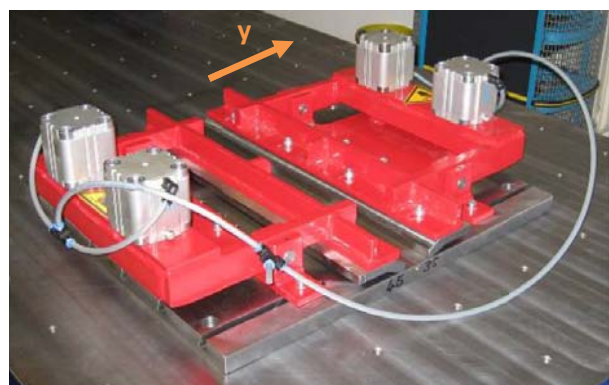


Abbildung 88: Pneumatische Spannvorrichtung

Die Platten wurden während der Versuche mit den konventionellen Rührreibschweißwerkzeugen und der fixen Schulter mittels des Rahmens (Einspannung Heizplatte) geklemmt. Bei den nachfolgenden Versuchen wurde nur mehr die pneumatische Spannvorrichtung verwendet. Hierbei wurden die Proben nicht mehr geschnitten (Kapitel 4.2.1), sondern im Ganzen miteinander verschweißt.

Zwei Platten mit den Abmessungen 109mmx111mm wurden stumpf aneinandergelegt und an der faserarmen Außenschicht miteinander verschweißt (siehe auch Abbildung 131, Kapitel 5.2.3.2).

4.5 Untersuchungsmethodik

Die Im Rahmen dieser Diplomarbeit durchgeführten Untersuchungen lassen sich in zwei Hauptgruppen unterteilen:

- Morphologische Untersuchungen
- Mechanische Untersuchungen

Die morphologischen Untersuchungen wurden makroskopisch mit freiem Auge, Kamera, mittels Lichtmikroskop und REM durchgeführt. Die mechanischen Untersuchungen wurden mittels Zugversuch und Vierpunktbiegeversuch durchgeführt.

4.5.1 Plastographie

Der Ablauf bei der plastographischen Probenpräparation ist der metallographischen ähnlich und gliedert sich in die folgenden Schritte:

- Probenentnahme,
- Einfassen,
- Schleifen,
- Polieren,
- Ätzen
- Reinigen.

Probenentnahme

Im ersten Schritt wurden die Proben mittels Bandsäge auf die richtige Größe gebracht.

Einbetten

Das Probeneinbetten erfolgt im kaltaushärtenden Einbettmittel VariDur 3000; wichtig dabei ist, dass die Aushärtungstemperatur unterhalb der Erweichungstemperatur des zu untersuchenden Polymers liegt. Bei glasfaserverstärkten Polymeren ist es zusätzlich erforderlich, einen Härteangleicher zu verwenden. Durch stufenweises Einbetten kleiner Mengen und Zwischenkühlung kann die Wärmeentwicklung gehemmt werden.

	Vicat-Erweichungstemp. (50°C/h 50N) ISO 306 [tr./cond.] [82]	Formbeständigkeitstemperatur (1.8 MPa) [°C] ISO 75-1/-2 [tr./cond.]	Einbettmittel VariDur 3000 Aushärtungstemperatur
Ultramid® B3WG6	220°C / -	210°C	120°
Ultradur® B4300G6	k. A.	215°C	120°
Ultrason® E 2010 G6	217°C / -	220°C	120°

Tabelle 19: Vergleich der Erweichungstemperaturen der untersuchten Werkstoffe mit den Aushärtungstemperaturen des Einbettmittels [83],[Datenblatt VariDur, Labor IWS]

Schleifen

Anschließend werden die eingebetteten Proben mit verschiedenen Körnungen geschliffen. Das Schleifen und Polieren erfolgte am IWS mit der halbautomatischen Schleif- und Polierstation Struers TegraPol 3.1 mit Maschinenkopf Tegraforce S.

Bei weichen Kunststoffen muss auf Verschmierungen geachtet werden; laut Petzow [84] wird mit SiC-Papieren mit Körnung 320-1200²³ unter fließendem Wasser geschliffen.

Beginnend mit der größten Körnung (320) wurden die Proben schrittweise bis Körnung 1200 geschliffen. Im Feinschleifprozess wurde dann bis auf eine Rauigkeit von ca. 4 Mikrometer geschliffen (Körnung 4000). Ein optimaler Schliff sollte die folgenden Anforderungen erfüllen:

- ebene Fläche (Randschärfe)
- Reproduzierbarkeit
- Vermeiden von Kratzern, Ausbrüchen, Verschmierungen
- zuverlässige Aussage über das Gefüge [85 S. 70]

Polieren

Als letzter Schritt bei der Probenherstellung wird die Oberfläche poliert. Das Polieren ist ein Läppprozess, bei dem die Oberflächenrauhtiefe auf 1µm geglättet wird. Laut Petzow [84] werden Kunststoffe mit harten Poliertüchern mit Diamant als Schneidmittel poliert. Dabei ist zu beachten, dass das Schmiermittel den Kunststoff nicht anlässt. Bei glasfaserverstärkten Polymeren besteht zusätzlich die Gefahr, dass Fasern ausreißen und dadurch das härtere Faserbruchstück ein Relief in Matrix erzeugt wird. Dies kann durch eine halbautomatische Präparation mit geringem Andruck verhindert werden. Die Endpolitur sollte mit Tonerde, Siliciumdioxid (SiO₂) oder Dichromtrioxid (Cr₂O₃) auf kurzflorigem, weichem Tuch erfolgen. In unserem Fall erfolgte die Politur mit einem weichem NAP-Poliertuch von Struers und Buehler „polykristalline Diamantdispersion“ 3µm.

Ätzen

Durch Ätzen von polymeren Schweißnähten können amorphe und teilkristalline Bereiche sichtbar gemacht werden[19]. Bei Ultramid können etwa kristalline Bereiche durch Ätzen mit Kaliumpermanganat (KMnO₄) dargestellt werden²⁴.

Reinigen

Am Ende wird der Schliff mit Ethanol gereinigt und unter Heißluft getrocknet. Ultramid und Ultrason werden durch Aceton angegriffen; somit kann dieses nicht zur Reinigung verwendet werden[65].

Die wesentlichen Einflüsse auf den Schleif- und Polierprozess sind:

- Druck, Zeit und Geschwindigkeit
- Schleif- und Poliermittel (Diamant, SiC)
- umgebendes Medium (Nass- oder Trockenschleife)
- Schleif- und Polierunterlage (Papier, Tücher)
- Schleif- und Polierrichtung (Gleich-, Gegenlauf)
- Erfahrung und Geschick des Plastographen

Der Mikroschliff der Schweißnaht wurde mit einem NAP-Tuch mit einer 1 µm-Polierscheibe bei 150 U/min bei einer Kraft von 40N zwei Minuten lang poliert. Eine polierte Oberfläche zeigt im Normalfall unter dem Lichtmikroskop kein Gefüge, da das auftreffende Licht gleichmäßig reflektiert wird. Poren, Risse, Lunken und Einschlüsse lassen sich trotzdem sehr gut erkennen [84].

²³ Die Körnung wird mit der Maßeinheit Mesh (Anzahl der Maschen eines Siebes pro Zoll (24,5mm))

²⁴ Gespräch mit DI Kuriykov am 22.11.2009; [84], S. 229

4.5.2 Visuelle Bewertung der Schweißverbindung

Zur besseren Charakterisierung einer FSW-Verbindung von Kunststoffen werden nach Strand die folgenden Zonen unterschieden:

- Advancing interface,
- Retreating interface,
- Bottom disturbance,
- und Central Zone (Abbildung 89) .

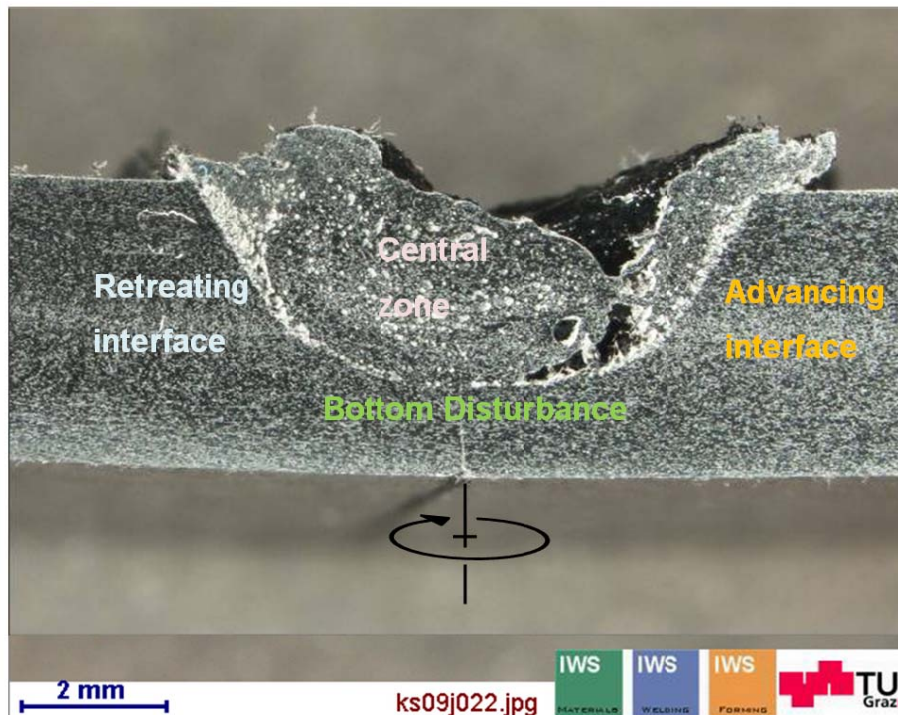


Abbildung 89: Charakterisierung der Schweißnaht nach Strand (Kapitel 3.1.5)

Die makroskopische Bewertung der Schweißverbindungen erfolgte nach dem DVS-Merkblatt 2201-1 „Fehler an Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen – Merkmale, Beschreibung, Bewertung“ [86]. Die Bewertung wurde analog zu den Beschreibungen der Bewertungsgruppen von Warmgaszieh- und Warmgasfächelschweißnähten (WZ, WF) bzw. Warmgasextrusionsschweißnähten (WE) durchgeführt. Diese Analogie ergab sich aus dem ähnlichen Nahtquerschnitt und den entsprechenden Merkmalen für Schweißnahtfehler. Bewertet wurden die Makroquerschliffe der Schweißnähte.

Zunächst erfolgt ein äußerer Befund der FSW-Schweißverbindung durch Sichtprüfung. Anfangs wurde die optische Qualität der Schweißnaht überprüft, in Anlehnung an das DVS-Merkblatt 2201-1 „Äußerer Befund“ (Tabelle 20). Festgestellt wurde, ob eine sichtbare thermische Schädigung vorliegt und ob die Nahtoberfläche Unregelmäßigkeiten (rau oder wellig) aufweist. Weiter wurde untersucht, ob eine Schweißnahtunterwölbung oder ein unvollständig geschweißter Querschnitt vorliegt. Bei der vorliegenden Arbeit kam es bei fast allen Schweißnähten zu einer prozessbedingten Unterwölbung, erst am Ende der Versuche konnte dieses Phänomen durch die Prozesstabilisierung vermieden werden. Der unvollständig geschweißte Querschnitt trat bei fast allen Schweißungen auf, da aufgrund der Einspannsituation kein längerer Pin gewählt werden konnte. In den meisten Fällen wurde ca. 1/4 der Plattendicke nicht mitverschweißt. Bei der Bewertung der Zugfestigkeit wurde der untere, unverschweißt gebliebene Teil nicht berücksichtigt.

DVS 2201-1		
Äußerer Befund der Oberfläche von Nähten		
unvollständig geschweißter Querschnitt		durch z.B. -mangelhafte Schweißnahtvorbereitung -ungenügenden Schweißdruck -zu geringe Vorwärmung
Schweißnahtunterwölbung/ Nahtquerschnitt unvollständig gefüllt		Nahtquerschnitt wird nicht erreicht, durch z.B.: Schrumpfung des Schweißzusatzes überhöhte Schweißgeschwindigkeit fehlerhafter Schweißschuh
thermische Schädigung	Verfärbung, Knötchenbildung, glänzende Schweißnahtoberfläche und dergleichen	
Raue Nahtoberfläche	Feine, offenen Bläschen, Schlieren, Knötchen	Feuchtigkeit im Schweißzusatz falsche Temperatur
Wellige Nahtoberfläche		durch z.B.: ungleichmäßig aufgebrauchte Schweißkraft, ungleichförmige Schweißgeschwindigkeit

Tabelle 20: Bewertung von Schweißverbindungen nach DVS-Merkblatt 2201-1; Äußerer Befund - Bewertungsgruppen für Warmgaszieh- und Warmgasfächelschweißnähte (WZ, WF) bzw. Warmgasextrusionsschweißnähte (WE)[86]

Nach der Bewertung des äußeren Befunds der Oberflächen wurde der innere Befund der Nähte bewertet (Tabelle 21).

Die geschweißten Proben wiesen fast alle leichte Winkelabweichungen auf, vor allem jene, welche mittels Heißluftfön während des Fügens zusätzlich erwärmt wurden. Durch die ungleichmäßige, einseitige Wärmeeinbringung kam es beim Abkühlen zu Verzug. Dieser Fehler wirkte sich vor allem bei den Zugversuchen nachteilig auf den Schweißfaktor aus, da diese Proben oftmals schon bei der Einspannung in das Zugprüfgerät brachen oder angebrochen wurden.

Poren bildeten sich in allen Schweißnähten, jedoch mit sehr unterschiedlichen Ausprägungen. Bei den festigkeitsmäßig schlechteren Verbindungen kam es vor allem auf der Retreating Interface und – wie Strand es nennt – der Bottom Disturbance zu sehr starker Porenbildung. Arbegast [12 S. 47] beschreibt das Auftreten von Schlauchporen als Folge einer ungenügenden Schmiedekraft unter der Schulter, die auf das abkühlende Material ausgeübt wird. Die parameteroptimierten Schweißnähte zeigten nur mehr wenige Poren in diesen Bereichen. Neben Poren wurden sehr häufig auch Bindefehler beobachtet, meist bei jenen Verbindungen, bei denen die Prozessempiratur zu gering war.

DVS 2201-1		
Innerer Befund		
Winkelabweichungen		
Poren und Vakuolen		einzelne, zahlreich verstreute oder örtlich gehäufte Poren bzw. Einschlüsse, durch z.B.:Dampfbildung während des Schweißens (Wasser) durch schnelle, ungleichmäßige Abkühlung (Vakuolenbildung)
Bindefehler		horizontal oder Vertikal verlaufende Bindefehler an den Schweißflanken zu niedrige Schweißtemperatur Keine oder unvollständige Bindung an die Gegenlage oder Nahtflanken, durch z.B.: Verschmutzte Fügefläche zu geringe Schweißkraft ungenügende Erwärmung

Tabelle 21: Bewertung von Schweißverbindungen nach DVS-Merkblatt 2201-1; Innerer Befund - Bewertungsgruppen für Warmgaszieh- und Warmgasfächelschweißnähte (WZ, WF) bzw. Warmgasextrusionsschweißnähte (WE)[86]

4.5.3 Zugversuch

Die Zugversuche wurden auf der Zugprüfmaschine des IWS (Kapitel 4.1.3) durchgeführt. Die Prüfung erfolgte nach DIN EN ISO 527-1 [87] bei einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min. Die Proben wurden quer zur Schweißnaht entnommen. Aus einer Schweißprobe mit einer Länge von etwa 70mm wurden zwei bis drei Zugproben entnommen, mit einer Breite von ca. 15 mm. Durch den von BASF vorgegebenen Probenquerschnitt konnte die erforderliche Probenlänge von größer 170mm nicht eingehalten werden; die Einspannlänge L_0 betrug zumeist 80 mm (Abbildung 91). Die Dehnungen wurden mittels eines Dehnungsaufnehmers an der Probe bestimmt. Die Errechnung der mechanischen Kennwerte erfolgte aus den Formeln in Abbildung 90.

Zu beachten ist, dass bei glasfaserverstärkten, spritzgegossenen Bauteilen die Zugfestigkeiten parallel zur Fließrichtung höher sind als senkrecht dazu (Kapitel 11.2).

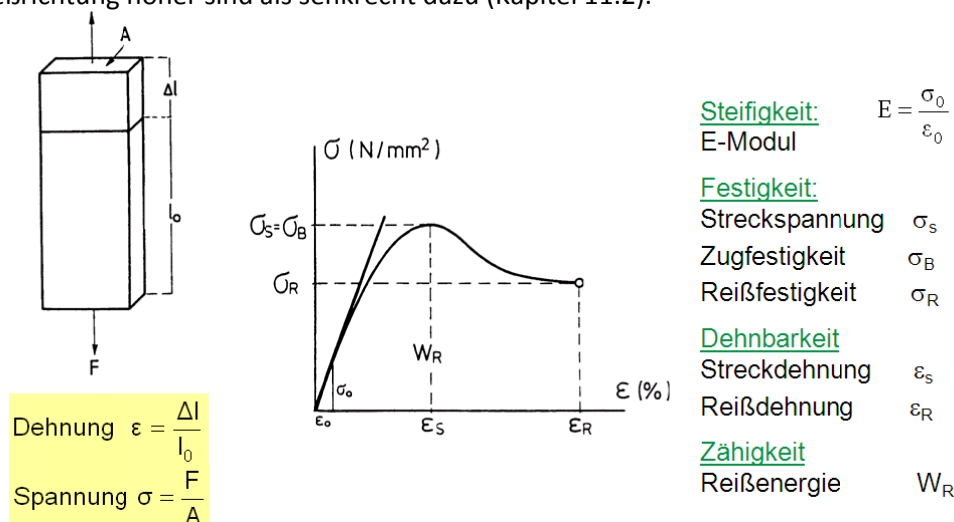
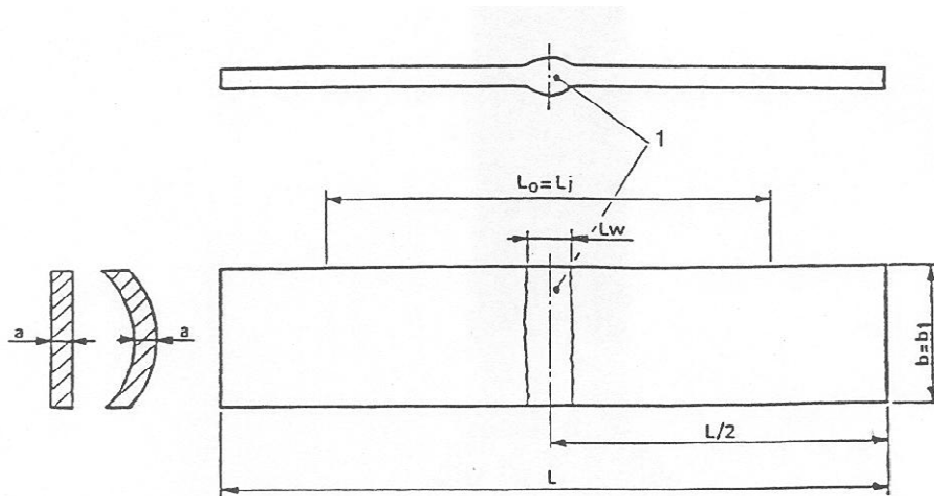


Abbildung 90: Spannungs-Dehnungsverhalten von Kunststoffen im uniaxialen Zugversuch bei konstanter Ziehgeschwindigkeit v_0 [88]

Die Prüfung der geschweißten Proben erfolgte in Anlehnung an DIN EN ISO 12814 [89] (Abbildung 91).



Legende			
1 Schweißnaht	b	L_0	L
$a < 10 \text{ mm}$	15	120	≥ 170

Abbildung 91: Probenform für flache Schweißverbindungen; Abmaße der Probe DIN EN 12814-2

4.5.4 Biegeversuch

Der technologische Biegeversuch ist ein wichtiges Mittel für die Kennwertermittlung an Kunststoffen und Faserverbundwerkstoffen. Die Biegebeanspruchung ist jene Beanspruchung, die in der Praxis am häufigsten auftritt. Der Biegewinkel (Biegeweg) und das Aussehen der Bruchstelle dienen als Maß für die Dehnbarkeit einer Schweißverbindung. Wie schon beim Zugversuch sind die beim Biegeversuch ermittelten Kennwerte stark von der Verformung, der Dehngeschwindigkeit, der Belastung (Spannung), der Temperatur und dem inneren Zustand des Prüfkörpers abhängig. In Abbildung 92 sind die derzeit prüftechnisch eingesetzten Prüfanordnungen dargestellt. Dabei wird zwischen Dreipunkt- und Vierpunktbiegeprüfeinrichtung unterschieden.

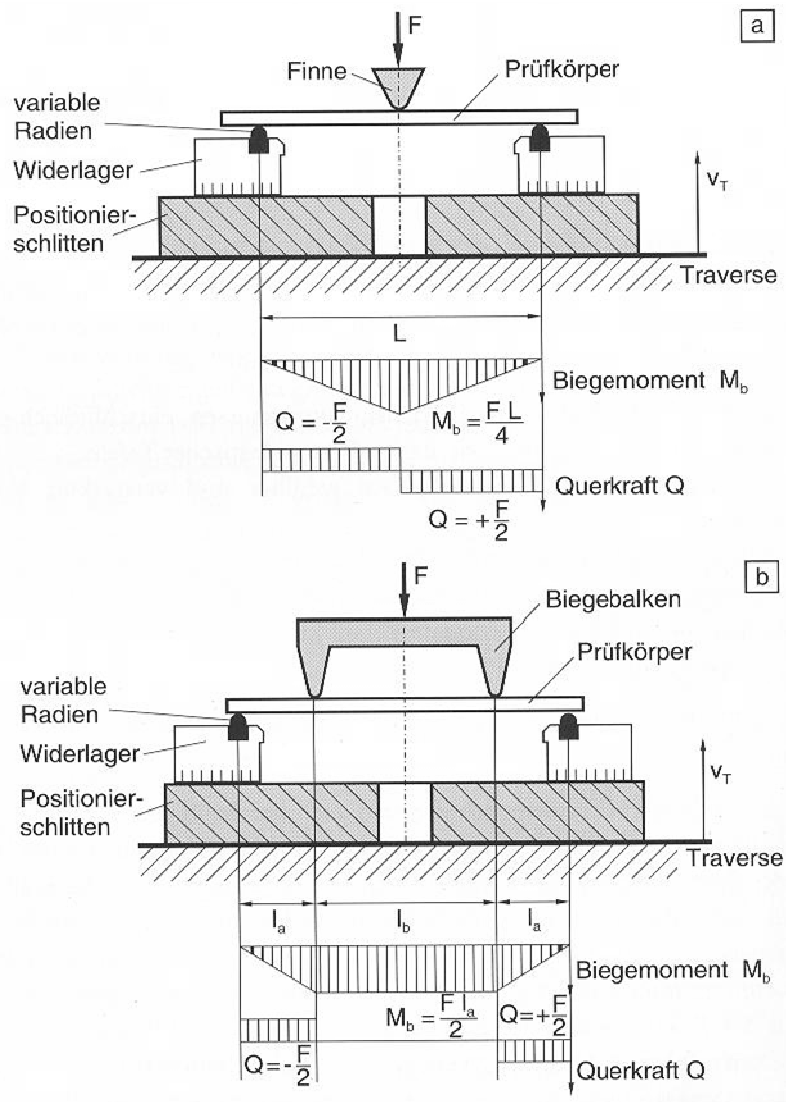


Abbildung 92: Schematischer Aufbau der Dreipunkt-(a) und der Vierpunktbiegeprüfeinrichtung (b) mit Biegemomenten und Querkraftverlauf [90 S. 146]

Beim Vierpunktbiegeversuch wird die Prüfbelastung mittels Biegebalken aufgebracht, was zu einer Absenz der Querkraft und zu einem konstanten Biegemomentverlauf an der Prüfstelle führt und somit zu präziseren und reproduzierbareren Resultaten als der Dreipunktbiegeversuch. Trotzdem wurde die Dreipunktbiegeprüfung als Standardprüfverfahren für Kunststoffe in der DIN EN ISO 178 [91] genormt, da der Aufbau weniger kompliziert ist und keine hochgenaue Durchbiegungsmesseinrichtung wie beim Vierpunktbiegeversuch notwendig ist [90 S. 145ff].

Zum Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen gibt es eine eigene Norm, die DIN EN ISO 12814. Diese gilt allerdings nicht für faserverstärkte Kunststoffe. Unterschieden wird zwischen oberseitigem Biegeversuch und wurzelseitigem Biegeversuch, je nachdem welche Seite der Schweißnaht während des Versuchs auf Zug beansprucht wird.

Die Probe wird während der Prüfung durch Biegen mit konstanter Geschwindigkeit verformt, ohne die Biegerichtung umzukehren. Die Bestimmung des Biegewinkels und des Bieegeweges erfolgte entsprechend DIN EN ISO 12814-1 [92] (Abbildung 93).

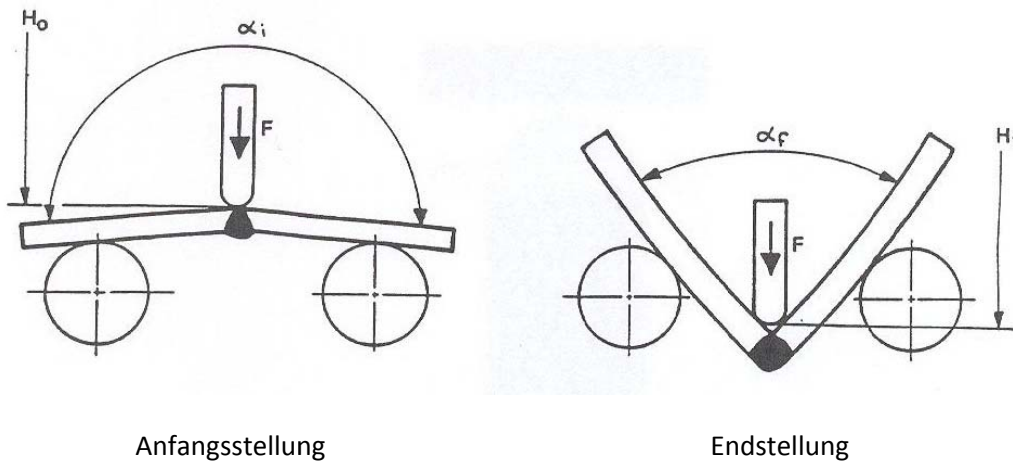


Abbildung 93: DIN EN ISO 12814-1 Ermittlung des Biegewinkels α bzw. des Biegeweges H ;
 H : Biegeweg; H_0 : Anfangsstellung des Biegestempels, H_f : Endstellung des Biegestempels;
 α : Biegewinkel, α_i : Anfangswinkel, α_f : Endwinkel

4.5.5 Rasterelektronenmikroskopie

Rasterelektronenmikroskopie beruht auf dem Prinzip, dass ein gerasterter Elektronenstrahl auf die zu untersuchende Fläche gerichtet wird. Die sekundären und rückstreuenden Elektronen werden dann wieder von Elektronenkollektoren erfasst. Die so gewonnenen Signale dienen dazu, ein Bild der Oberfläche in einer Bildröhre aufzubauen (Abbildung 94).

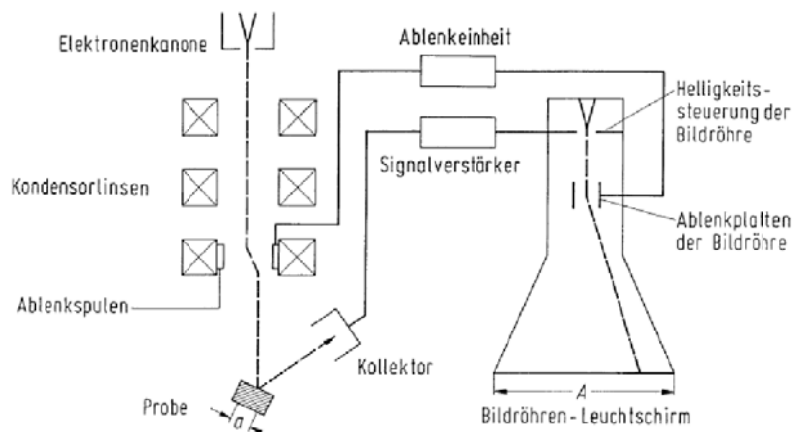


Abbildung 94: Blockschaubild eines Rasterelektronenmikroskops [93]

Bei polymeren Schweißungen ist es meist nötig, die Oberflächen mit einer elektrisch leitenden Schicht zu beschichten, um Oberflächenveränderungen oder gar den Abbau des Werkstoffs zu verhindern [19 S. 45]. Hierzu wird bei faserverstärkten Polymeren mit Gold bedampft[93].

Die Betrachtung der Bruchflächen mit dem REM dient dazu, mehr über die Morphologie und die Mikromechanik von faserverstärkten Polymeren zu erfahren.

Das Aussehen der Bruchflächen hängt vom Grad der Adhäsion zwischen Fasern und Matrix und der Orientierung der Fasern bezüglich der angreifenden Kraft ab. Abbildung 95 verdeutlicht den Einfluss des Haftungsgrads zwischen Fasern und Matrix: Abbildung 95-a zeigt eine Bruchfläche mit einer fehlenden oder schlechten Anbindung der Fasern an die PP-Matrix, während in Abbildung 95-b selbst die Fasern quer zur Bruchoberfläche eine gute Anhaftung der polymeren Matrix zeigen. Diese gut definierte Grenzfläche zwischen dem Polymer und der Faser verbessert die mechanischen Eigenschaften des Polymers; die Zugfestigkeit steigt an.

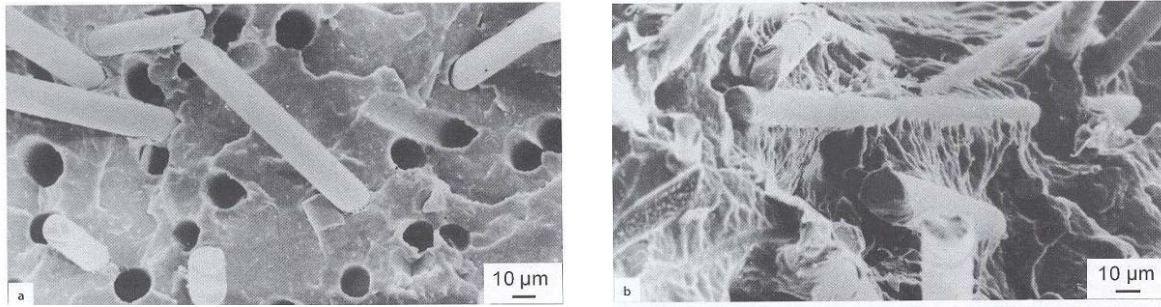


Abbildung 95: Bruchflächen von glasfaserverstärktem PP im Rasterelektronenmikroskop: a) zeigt eine schlechte Haftwirkung der Phase, b) gute Adhäsion der Phase[94]

Ein weiteres Kriterium zur Bewertung von Bruchflächen von faserverstärkten Polymeren bildet die Orientierung der Fasern bezüglich der angreifenden Kraft, wie in Abbildung 96 gezeigt. Sind die Fasern parallel zur angreifenden Kraft orientiert, können drei verschiedene Phänomene beobachtet werden, siehe Abbildung 96-I.

Zum ersten kann es nach dem mikromechanischen Verformungsprozess zum Ablösen an der Faser-Matrix-Grenzfläche kommen, wie es etwa durch das Herausziehen (Pull-Out) von Fasern aus der Matrix geschieht. Abbildung 96-I-a zeigt diesen Vorgang bei einer schlechten Grenzflächenadhäsion. Bei einer partiell vorhandenen Grenzflächenadhäsion kommt es zu einem Herausgleiten der Fasern (I-b) oder zum Faserbruch (I-c), wenn die Grenzflächenadhäsion stark genug ist. Hierbei kommt es zu Ausbildung einer zickzack-förmigen Bruchfläche beim Risswachstum.

Sind die Fasern hingegen senkrecht oder in einem gewissen Winkel zur Richtung der Lasteinwirkung angeordnet, wie in Abbildung 96-II, folgt der Bruchmechanismus, abhängig vom Grad der Adhäsion den folgenden mikromechanischen Deformationsprozessen:

Ist die Grenzflächenhaftung schlecht, bilden sich winzige Hohlräume an der Fasergrenzfläche oder in der Matrix zwischen den Fasern, welches sowohl positive als auch negative Effekte auf die Bruchfähigkeit hat. Zum einen beginnt das Matrixmaterial leichter zu fließen oder es kommt zur Bildung von Haarrissen (Crazes), vgl. Abbildung 96-II-a. Fasern, die in einem bestimmten Winkel zur Matrix angeordnet sind, werden von der Matrix getrennt oder brechen mit steigender Last, II-b.

Ist die Adhäsion zwischen Fasern und Matrix gut, verbreitet sich der Riss entlang der Grenzfläche an den Fasern entlang oder im Matrixmaterial. Hierbei kann die Ausbildung einer relativ glatten Bruchfläche beobachtet werden, Abbildung 96-II-c [94 S. 414ff].

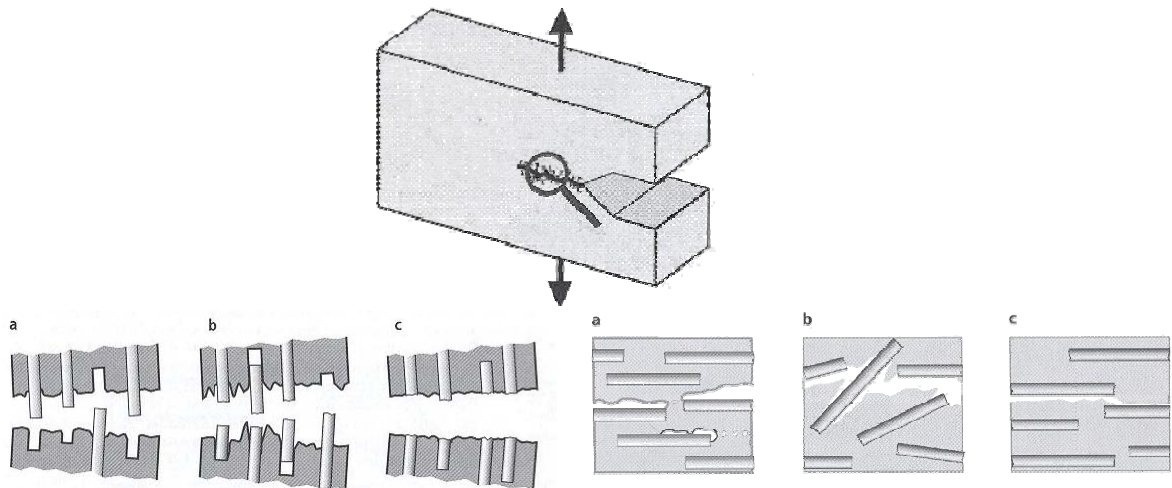


Abbildung 96: mögliche Verformungsvorgänge in faserverstärkten Verbundwerkstoffen

I: Fasern parallel zur Richtung der auferlegten Last a) Ablösung der Fasern, Gleiten und Herausziehen der Fasern („Pull-Out“) b) teilweiser Pull-Out der Fasern, Faserbruch c) Faserbruch bei guter Adhäsion der Phase

II: Fasern senkrecht in Richtung der Lasteinwirkung: a) Schlechte Haftung der Fasern, Ablösung der Fasern mit Bildung von Hohlräumen, interfibrillärer Bruch mit Vereinigung der Risse am Ende der Fasern b) Ablösung der Fasern oder Bruch der geneigten Fasern c) Bruch der Matrix entlang der Faser-Grenzfläche oder in der Matrix, bei guter Adhäsion der Phase [94]

Im Rahmen der Diplomarbeit wurde angenommen, dass es beim Friction Stir Welding durch die Krafteinwirkung auf die Fasern während des Rührvorganges zu verstärktem Faserbruch kommt.

Die erreichbaren Zugfestigkeitswerte faserverstärkter Polymere hängen vom Zusammenspiel der drei Einflussgrößen Matrix, Fasern und Interface zwischen Matrix und Fasern ab. Hierbei sind das Verhältnis von Faserlänge zu Faserdurchmesser („aspect ratio“) und die kritische Faserlänge wichtig. Laut Schmitt-Thomas bezeichnet die kritische Faserlänge jene Faserlänge, ab welcher eine optimale Kraftübertragung zwischen Faser und Matrix möglich ist (Abbildung 97) [93 S. 195].

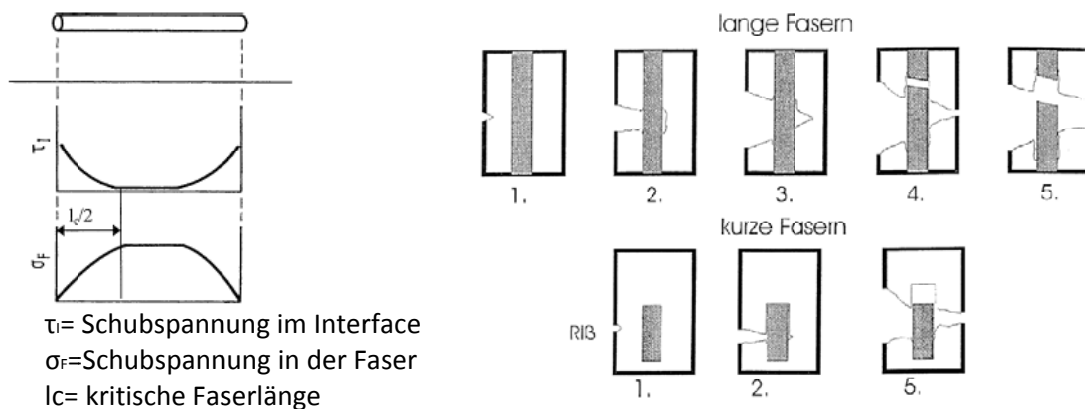


Abbildung 97: Schematische Spannungsverteilung entlang einer Verstärkungsfaser (links) und Versagensmechanismen bei unterschiedlichen Faserlängen: lange Fasern: Faserlänge $> l_c$; kurze Fasern: Faserlänge $< l_c$ [93 S. 196]

Durch den FSW-Prozess verrührte Fasern brechen zum Teil, und somit unterschreiten viele Fasern die kritische Faserlänge. Das hat zur Folge, dass die beim Zugversuch in der Matrix vorherrschende Spannung nicht mehr vollständig auf die Faser übertragen werden kann. Die Fasern werden in ihrer ganzen Länge aus der Matrix herausgezogen. Im umgekehrten Fall, wenn die Fasern länger als die kritische Faserlänge sind, brechen diese bei höheren Bruchspannungswerten [93].

4.5.6 BSC-Back Scattered Electrons

Die Untersuchung der rückgestreuten Elektronen (Back Scattered Electrons) gibt einen schnellen Aufschluss über die Dichteverteilung in einer Probe und somit werden Bereiche unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung aufgezeigt.

Bei Beschuss mit dem Elektronenstrahl streuen schwere Elemente (mit einer hohen Atomzahl) mehr Elektronen zurück als leichtere Elemente mit einer niedrigeren Ordnungszahl [95]. Diese werden in einem Vierquadranten-Halbleitungs-Detektor detektiert. Somit kann ein Materialkontrast abgebildet werden, in dem Bereiche hoher Dichte hell, Bereiche niedriger Dichte dunkel erscheinen²⁵.

4.5.7 Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)

Die energiedispersive Röntgenanalyse ist eine schnelle Analysemethode für die Elementanalyse oder die grobe chemische Charakterisierung einer Probe.

Der Elektronenstrahl trifft in der Probe auf die dort enthaltenen Atome, und schlägt dank der Energie der Anregungsspannung Elektronen aus den Atomschalen heraus. Der frei gewordene Platz in der Atomschale wird sofort mit einem Elektron, welches aus einem höheren Niveau in die freie Schale zurückfällt, gefüllt. Dieses Zurückfallen geschieht unter Abgabe von Röntgenstrahlung. Das Impulsspektrum zeigt Linien verschiedenen Energieniveaus, je nachdem, aus welcher Schale das Atom herausgeschlagen wird (K-, L-, M-Schale (Abbildung 98)).

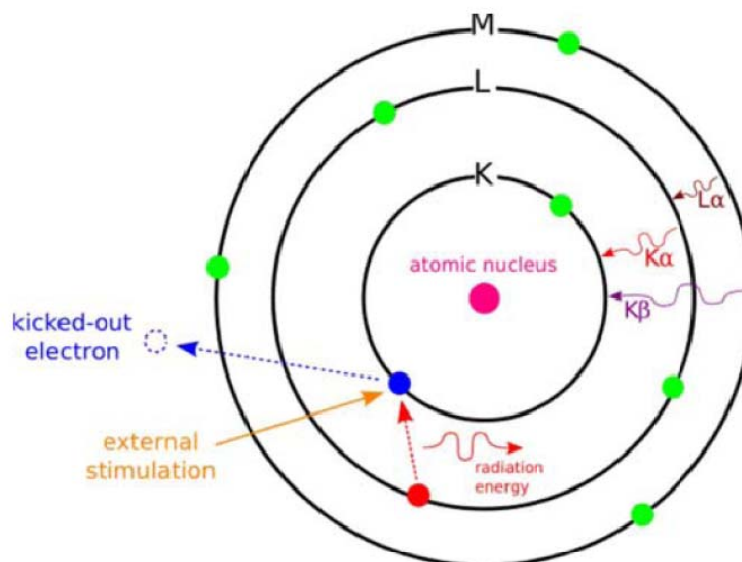


Abbildung 98: Funktionsprinzip der energiedispersiven Röntgenanalyse EDX: Durch externe Anregung wird ein Elektron aus einer Atomschale eines Elements herausgeschlagen. Der frei gewordenen Platz in der Atomschale wird sofort mit einem Elektron aus einer Schale mit weniger stark gebundenen Elektronen nachbesetzt. Dieser Vorgang geschieht unter Emittierung einer charakteristischen Röntgenstrahlung [95]

Die energiereichsten Linien zeigt das K-Niveau, da dort die Elektronen am stärksten gebunden sind. Je schwerer ein Atom ist, und je mehr Elektronen es besitzt, desto höher fällt die Energie von Linien mit dem gleichem Buchstaben aus.

Die Energieschalen werden nur angeregt, wenn die Anregungsspannung mindestens 1,5-fach über der höchsten anzuregenden Energie des Elements liegt.

Die Atome in der Probe werden angeregt, und Röntgenstrahlung wird freigesetzt. Diese emittierten Röntgenimpulse werden in einem Zählrohr erfasst, und anhand des daraus gewonnenen Impulsspektrums können die in der Probe enthaltenen Elemente mit großer Sicherheit bestimmt werden [96].

²⁵ Auskunft Stöfan G., Labor IWS

5 Ergebnisse

5.1 Zugversuche Grundmaterial

Die von BASF vorgegebene Abmessung des Grundwerkstoffs (Platten mit 110 x 110 x 4 mm) schränkte die Geometrie der Zugproben nach DIN EN ISO 527-1/-2 [87] ein. Als Probenform wurde daher der Probenkörpertyp 1BA klein gewählt. Die Zugproben wurden aus den spitzgegesenen Platten herausgefräst (Abbildung 99).

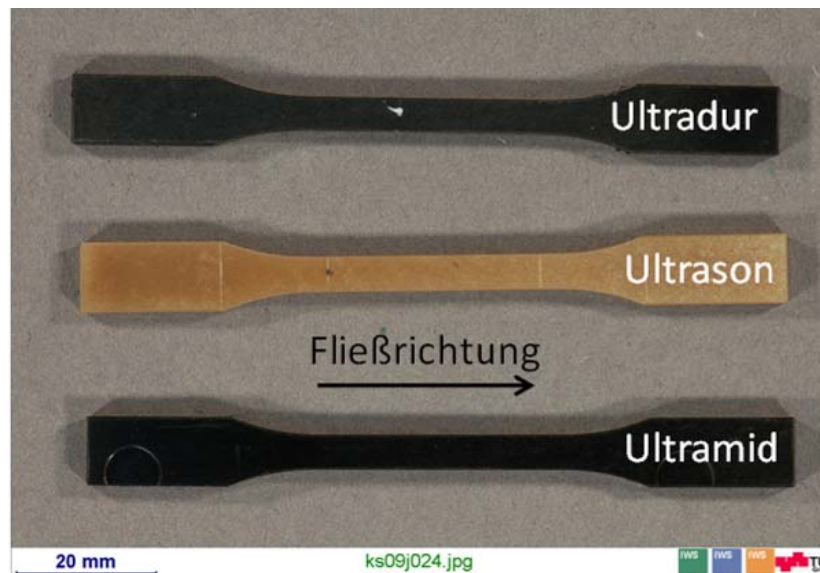


Abbildung 99: Zugproben der unverschweißten Grundwerkstoffe; Die Proben wurden in Fließrichtung entnommen. Geometrie nach DIN EN ISO 572: Probenkörpertyp 1BA klein

Die Prüfgeschwindigkeit wurde mit 1mm/min festgelegt [87]. Die Proben wurden längere Zeit bei Raumtemperatur offen gelagert, sodass die Proben Feuchtigkeit aus der Umgebung aufnehmen konnten. Geprüft wurde bei einer Umgebungstemperatur von 20°C; die Werte aus Tabelle 22 sind Durchschnittswerte aus je 3 durchgeführten Zugversuchen pro Werkstoff (Tabelle 22).

	R_m [N/mm ²]	$\Delta\sigma$ [N/mm ²]	Dehnung [%]	$\Delta\sigma$ [%]
Ultramid	125,9	16,1	4,36	0.63%
Ultrason	122,5	6,0	2,18	0.50%
Ultradur	107,6	6,5	3,1	0.23%

Tabelle 22: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen der Werkstoffe

Die in Tabelle 22 angeführten Werte wurden in der vorliegenden Arbeit als Vergleichswerte und zur Bestimmung der Schweißfaktoren herangezogen. Die Spannungs-Dehnungsdiagramme sind in Kapitel 11.1 angeführt.

5.2 Durchgeführte FSW-Versuche

Es wurden nicht nur artgleiche Verbindungen hergestellt, sondern auch artfremde. Tabelle 23 gibt einen Überblick über alle geschweißten Werkstoffkombinationen.

	Ultramid	Ultradur	Ultrason
Ultramid	X	X	
Ultradur		X	X
Ultrason			X

Tabelle 23: Verschweißte Kombinationen

5.2.1 Ultramid-Konventionelles Rührreibschweißwerkzeug

Die ersten Versuche wurden mit konventionellen Rührreibschweißwerkzeugen an Ultramid durchgeführt. Hier konnten grob die wichtigsten Parameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl und Temperatur abgesteckt werden. Die Entwicklungsschritte von der stehenden Schulter bis hin zur stehenden, beheizten Schulter mittels des Werkstoff Ultradur durchgeführt.

5.2.1.1 Versuche Werkzeug 1

Die ersten Versuche wurden mit den in Tabelle 24 angegebenen Parametern mit Werkzeug 1 (Kapitel 4.3.1) durchgeführt.

Proben_Nr.	Bruchkraft [N]	Winkel ²⁶ [°]	Drehzahl [U/min]	Vorschubgeschw. [mm/min]	Eindringtiefe [mm]	Vorwärmtemp. [°C]
KS_0901_S001	gebr.	2,5	600	200	1,7	168
KS_0901_S002	gebr.	2,5	1200	200	1,7	168
KS_0901_S003	/	2,5	1200	200	1,8	168
KS_0901_S004	/	2,5	3000	200	1,8	168
KS_0901_S005	/	2,5	3000	100	1,8	168
KS_0901_S006	685,4	2,5	3200	50	1,8	168
KS_0901_S007	/	2,5	3200	25	1,9	194

Tabelle 24: Ergebnisse der ersten Schweißversuche mit Ultramid

Die anfangs gewählten Vorschubgeschwindigkeiten von 200 mm/min bzw. 100mm/min erwiesen sich als zu hoch. Das Material wurde aus der Fügezone herausgeschleudert. Auch der langsamste Vorschub- 25mm/min- zeigte kein optimales Nahtaussehen, da sich das Material zu stark in der Fügezone unter Bildung eines porösen Schweißguts auftürmte (Abbildung 100). Als optimal erwies sich die Vorschubgeschwindigkeit von 50 mm/min; diese wurde in weiterer Folge für alle FSW-Schweißungen als fixer Parameter gewählt.

²⁶ Der Winkel zwischen FSW- Werkzeug und Plattenoberfläche beträgt 90° +2,5°

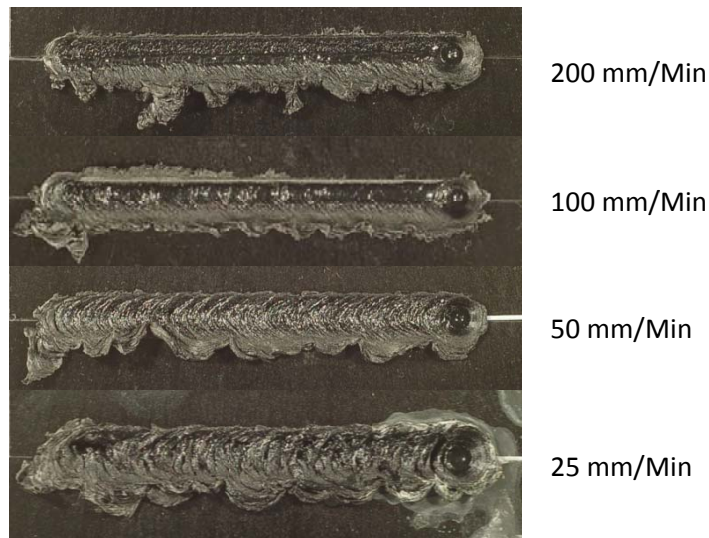


Abbildung 100: Vergleich der unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten (Schweißnahtlänge ca. 70 mm)

Von den Proben wurde nur die Schweißung KS_0901_S006 einer mechanischen Prüfung unterzogen. Die anderen Proben brachen entweder bei der Entnahme aus der Schweißvorrichtung, beim Zugschnitt der Zugproben in der Bandsäge oder wurden schon bei der Sichtprüfung als nicht prüfrelevant eingestuft. Die Stelle der Probenentnahme für den Zugversuch ist in Abbildung 101 dargestellt.

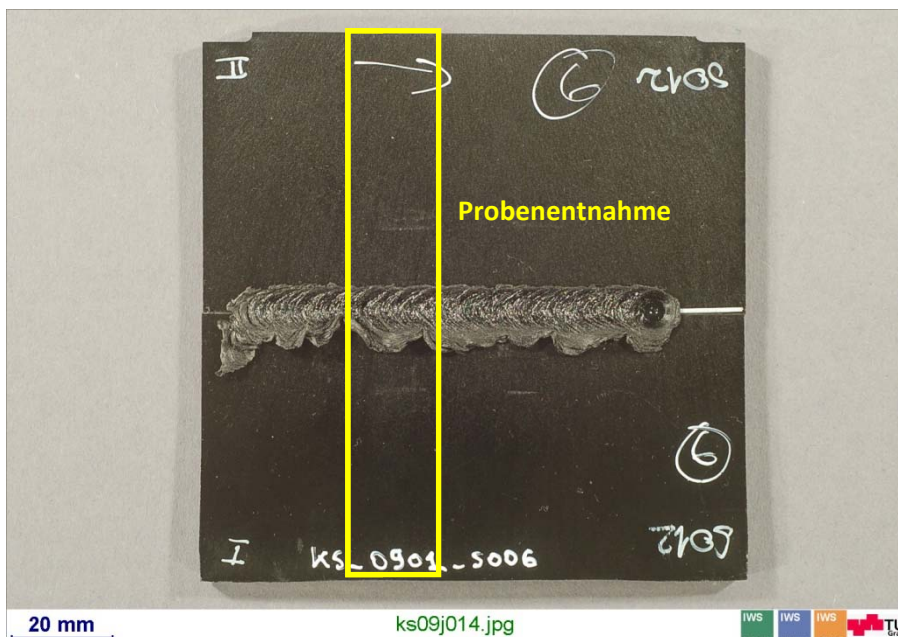


Abbildung 101: Probenentnahme aus der verschweißten Platte und Durchführung Zugversuch

Die Zugprüfung ergab bei einer Bruchkraft von 685,4 N eine Bruchspannung von 11,1 N/mm², das einem Schweißfaktor von 0.086 entspricht²⁷. Die ersten Versuche zeigten, dass Werkzeug 1 eine viel zu breite Pinspitze besitzt, um das Material optimal verrühren zu können. Weiters ist der Pin mit 3mm zu kurz. Außerdem wurde durch die Schulter das Material aus der Fügezone heraus transportiert (Abbildung 102).

²⁷ Festigkeit des Grundwerkstoffes Ultramid B3WG6 : 125,9 N/mm² (IWS)



Abbildung 102: Schweißnahtaussehen Werkzeug 1

5.2.1.2 Werkzeug 2

Die nächsten Versuche wurden mit dem optimierten Werkzeug 2 (Kapitel 4.3.1) ausgeführt. Die Parameter sind in Tabelle 25 dargestellt. Die Temperatur wurde an der Probenoberfläche mittels der Infrarot-Temperaturmessung (Kapitel 4.1.2) vor Beginn der FSW-Schweißung bestimmt.

Proben_Nr.	Drehzahl [U/min]	Eindringtiefe [mm]	Vorwärm-Temp. [°C]	Temperatur oben ²⁸ [°C]
KS_0902_S001	3000	-1.8	21	21
KS_0902_S002	3200	-2,3	21	21
KS_0902_S003	3200	-2,9	21	21
KS_0902_S004	3200	-3,6	21	21
KS_0902_S005	2500/2000	-3,3	126	111
KS_0902_S006	3200	-3,25	126	111
KS_0902_S007	3200	-3,25	126	107
KS_0902_S008	3200	-3,25	160	131
KS_0902_S009	3200	-3	164	127
KS_0902_S010	3200	-2,7	165	146
KS_0902_S011	3200	-2,7	161	130

Tabelle 25: Parameter der Versuche KS_0902 mit Ultramid und Werkzeug 2; Winkel 2,8°; Vorschub 50 mm/min

Auch bei diesen Versuchen wurde das Material durch die Drehung des Pins aus der Schweißzone hinausbefördert. Die Proben KS_0902_S001 bis S004, S006 und S001 sind nach der Schweißung oder beim Zuschneiden der Proben gebrochen. Von den restlichen Proben wurden jeweils zwei Stück einer Zugprüfung unterzogen. Die Ergebnisse der Zugprüfung sind in Tabelle 26 dargestellt.

²⁸ Bei Versuchsbeginn, gemessen mit dem berührungslosen Infrarot-Temperaturfühler Fluke 61

Proben Auswertung:	Bruchkraft N	R _m N/mm ²	% GW	Mittelwerte der Proben	Naht-Dicke [mm]
KS_0902_S005_L	1974	28,9	23 %	19,6 N/mm ²	3,8
KS_0902_S005_R	713	10,2	8 %		4,0
KS_0902_S007_L	954	13,4	11 %	14,4 N/mm ²	3,8
KS_0902_S007_R	1010	15,3	12 %		3,7
KS_0902_S008_L	1563	43,4	34 %	35,8 N/mm ²	2,0
KS_0902_S008_R	1573	28,1	22 %		3,2
KS_0902_S009_L	1119	13,3	11 %	17,5 N/mm ²	4,7
KS_0902_S009_R	1495	21,6	17 %		3,9
KS_0902_S010_L	963	21,2	17 %	23,9 N/mm ²	2,6
KS_0902_S010_R	1500	26,5	21 %		3,4

Tabelle 26: Ergebnisse der Zugprüfung der Serie KS_0902

Die besten Werte wurden bei der Probe KS_0902_S008_L erreicht, allerdings wurde die Zugfestigkeit auf einen stark reduzierten Nahtquerschnitt bezogen. Abbildung 103 zeigt die Mittelwerte der geschweißten Proben (2 Stück pro Schweißnaht).

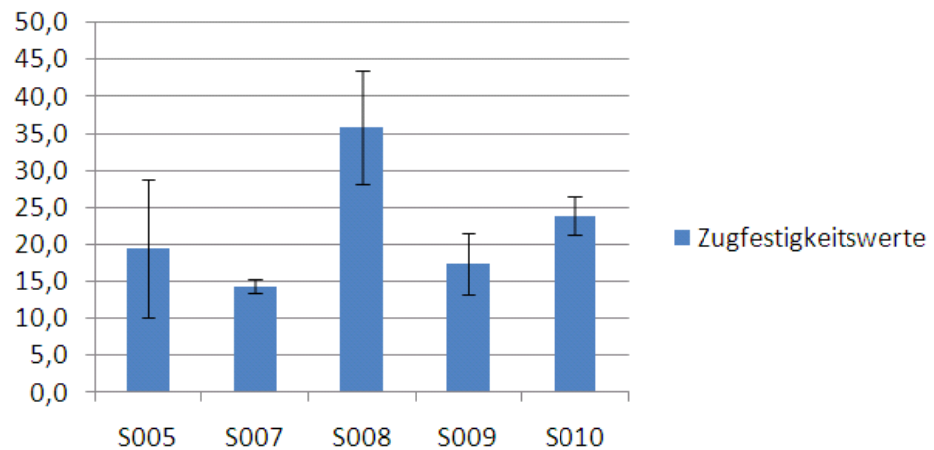


Abbildung 103: Zugfestigkeitswerte der Serie KS_0902

Trotz der teilweise vielversprechend hohen Werte von >20% der Grundmaterialfestigkeit wiesen die Schweißungen einige Fehler auf.

Hierzu wurde die Probe KS_0902_S009A plastographisch untersucht. Neben der Anbindung Grundmaterial-Stirzone und der Wurzelzone wurde auch die Stirzone und das Grundmaterial plastographisch dargestellt (Abbildung 104).

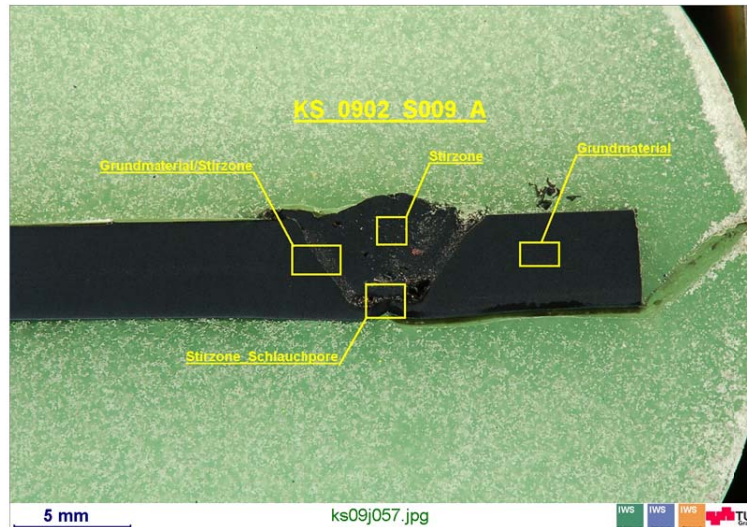


Abbildung 104: Untersuchte Bereiche

Zu den Fehlern gehören Poren im verrührten Schweißgut, Porennester an der Anbindung zum Grundwerkstoff und die Schlauchporen an der Wurzel. Die Entstehung dieser Fehlstellen ist teilweise prozessbedingt durch den ungenügenden Materialfluss aufgrund falscher Parameter. Auch durch die nicht ausreichende Vortrocknung der Platten kann es bei Einwirkung der Prozesswärme und ungenügenden Fügedruck zur Entstehung von Dampfblasen kommen (Kapitel 3.3.7) (Abbildung 105).

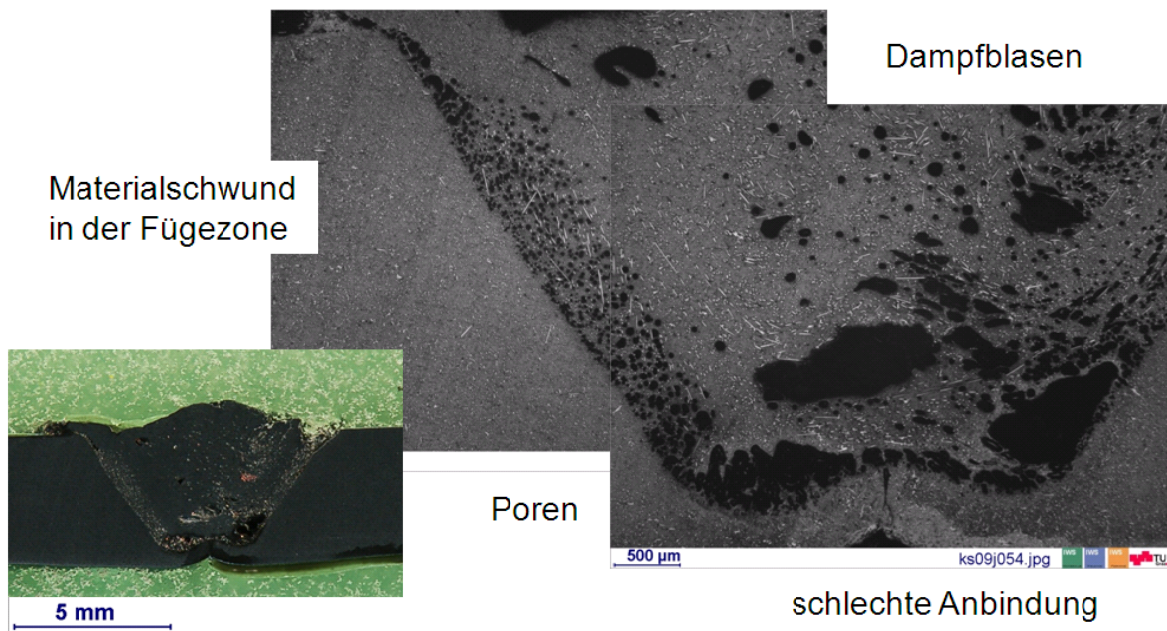


Abbildung 105: Lunker und Bindefehler in einer FSW-Naht. Hier: KS0902_S009A, Polyamid 6 gelagert bei Raumklima, geschweißt auf einer beheizten Platte bei einer Temperatur von 160°C

Trotz der Anbindungsfehler weist das Material in der Stirzone ein sehr homogenes Gefüge auf. Sehr deutlich ist dies in der Gegenüberstellung von Grundmaterial und verrührtem Material in Abbildung 106 ersichtlich. Das Gefügebild der Stirzone zeigt eine ähnliche Struktur, mit umorientierten Fasern und einigen kleineren Poren.

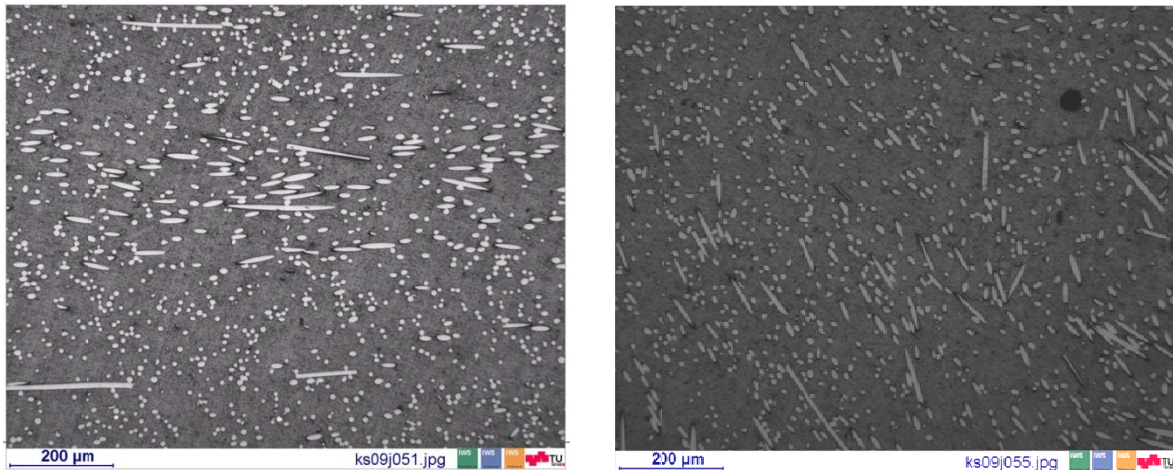


Abbildung 106: Gegenüberstellung Grundmaterial-Stirzone

Das größte Problem bei dem FSW-Prozess bildet die ungenügende Anbindung der Schweißzone an das Grundmaterial. Um diesen Problem zu begegnen, wurde Werkzeug 3 (Kapitel 4.3.1) entwickelt und weitere Versuche im Vergleich mit Werkzeug 2 durchgeführt.

5.2.1.3 Weitere Versuche mit Polyamid; Vergleich von Werkzeug 2 und 3

Die Versuchsreihe KS_0903 wurde mit verschiedensten Wärmeparametern verschweißt, um anhand der Fülle an Parametern und Werten einen Trend feststellen zu können. Fixe Parameter waren die Drehzahl, der Vorschub und die Eindringtiefe (Tabelle 27). Geschweißt wurde mit den Werkzeugen 2 und 3. Die maximale Temperatur oben wurde mittels der berührungslosen Temperaturmesseinheit (Kapitel 4.1.2) gemessen.

Proben_Nr.	WKZ	max. Temp. oben [°C] ²⁹	Wärme
0903_S001	2	29	RT (20°)
0903_S002	2	162	Heißluftfön Stufe 4
0903_S003	2	84	aus Ofen ³⁰ , 200°-> 64° bei Beginn
0903_S004	3	/	RT
0903_S005	3	95	aus Ofen, 200°-> 53° bei Beginn
0903_S006	3	/	Heißluftfön Stufe 4
0903_S007	3	/	Start: 126° Heizplatte: 200°C; gebrochen
0903_S008	2	/	Heizplatte: 200°C

Tabelle 27: Variation der Wärmeparameter bei Ultramid; Winkel: 2,8°, Drehzahl: 2500U/min; Vorschub 50 mm/min
Eindringtiefe Werkzeug: 3,3 mm

Die Festigkeitswerte sind in Tabelle 28 dargestellt. Die Temperatur wurde aus den berührungslosen Messungen auf der Probenoberfläche ermittelt; bei den Proben ohne Temperaturmessung wurde die Temperatur der Heizplatte herangezogen bzw. eine Abschätzung des Temperaturbereiches anhand der vorangegangenen Versuche durchgeführt (KS_0903_S006).

²⁹ Bei Versuchsende, gemessen mit dem berührungslosen Infrarot-Temperaturfühler Fluke 61

³⁰ Der Heißluftofen wurde auf 200°C vorgeheizt. Die gemessene Temperatur auf der Oberfläche der Platte war bei Schweißbeginn 64°C.

Probe	WKZ	Temperatur [°C]	R _m [N/mm ²]	% GW
0903_S004	3	20	16,9	13,4
0903_S001	2	29	24,8	19,7
0903_S003	2	84	16,5	13,1
0903_S005	3	95	11,6	9,3
0903_S006	3	150	10,8	8,6
0903_S002	2	162	12,9	10,2
0903_S008	2	200	19,4	15,4

Tabelle 28: Festigkeitswerte der Variation der Wärmeparameter

Werkzeug 2 und Werkzeug 3 erreichten beide ihre höchsten Festigkeitswerte bei tiefen Temperaturen; erst bei sehr hohen Temperaturen kam es wieder zu einem Anstieg der Schweißnahtfestigkeit (Abbildung 107).

Ultramid: Festigkeit über Temperatur

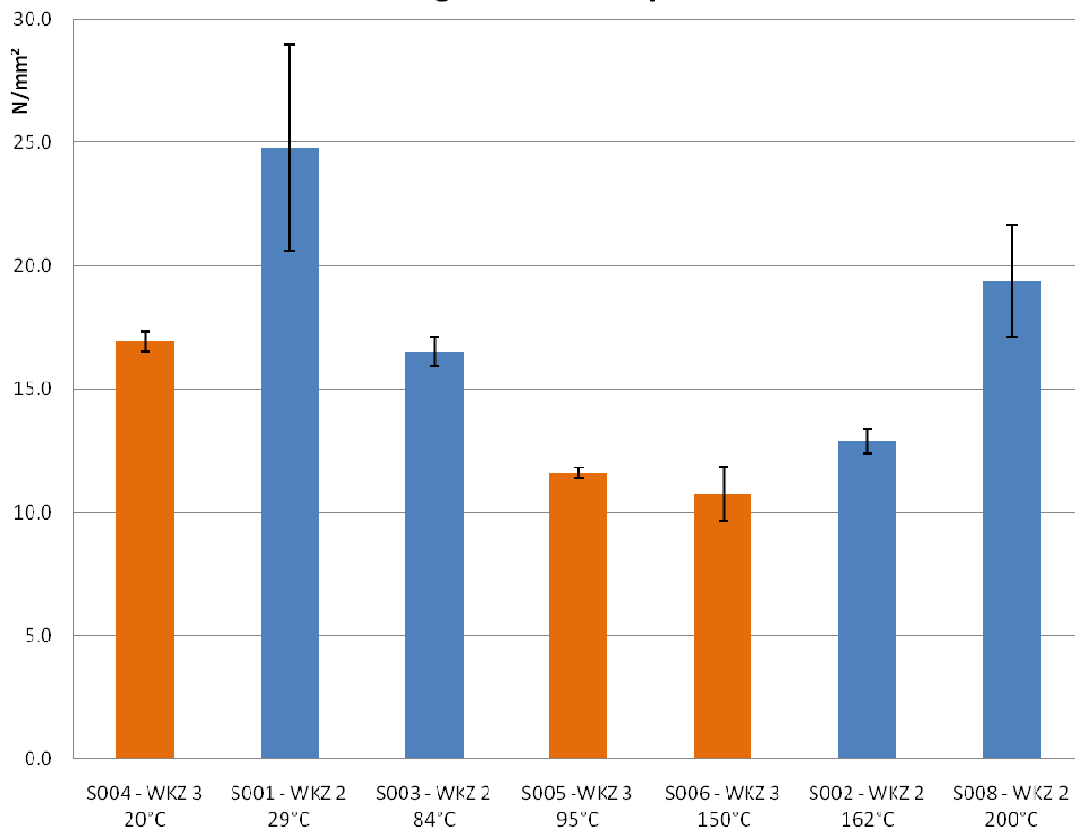


Abbildung 107: Darstellung der Festigkeitswerte von Ultramid über die Temperatur bei verschiedenen Werkzeugen (2&3)

Leider geht die hohe Festigkeit von S001 mit einer sehr starken Schweißnahtunterwölbung einher. Berücksichtigt man diese Schweißung wegen der ungenügenden Optik nicht, so erweist sich für Werkzeug 2 die Schweißung bei sehr hohen Temperaturen (S008) als jene mit den besten Festigkeitswerten. Tabelle 29 zeigt eine Gegenüberstellung der Schweißnaht-Makrobilder der Werkzeuge 2 und 3, geordnet nach ansteigender Schweißnahtfestigkeit.

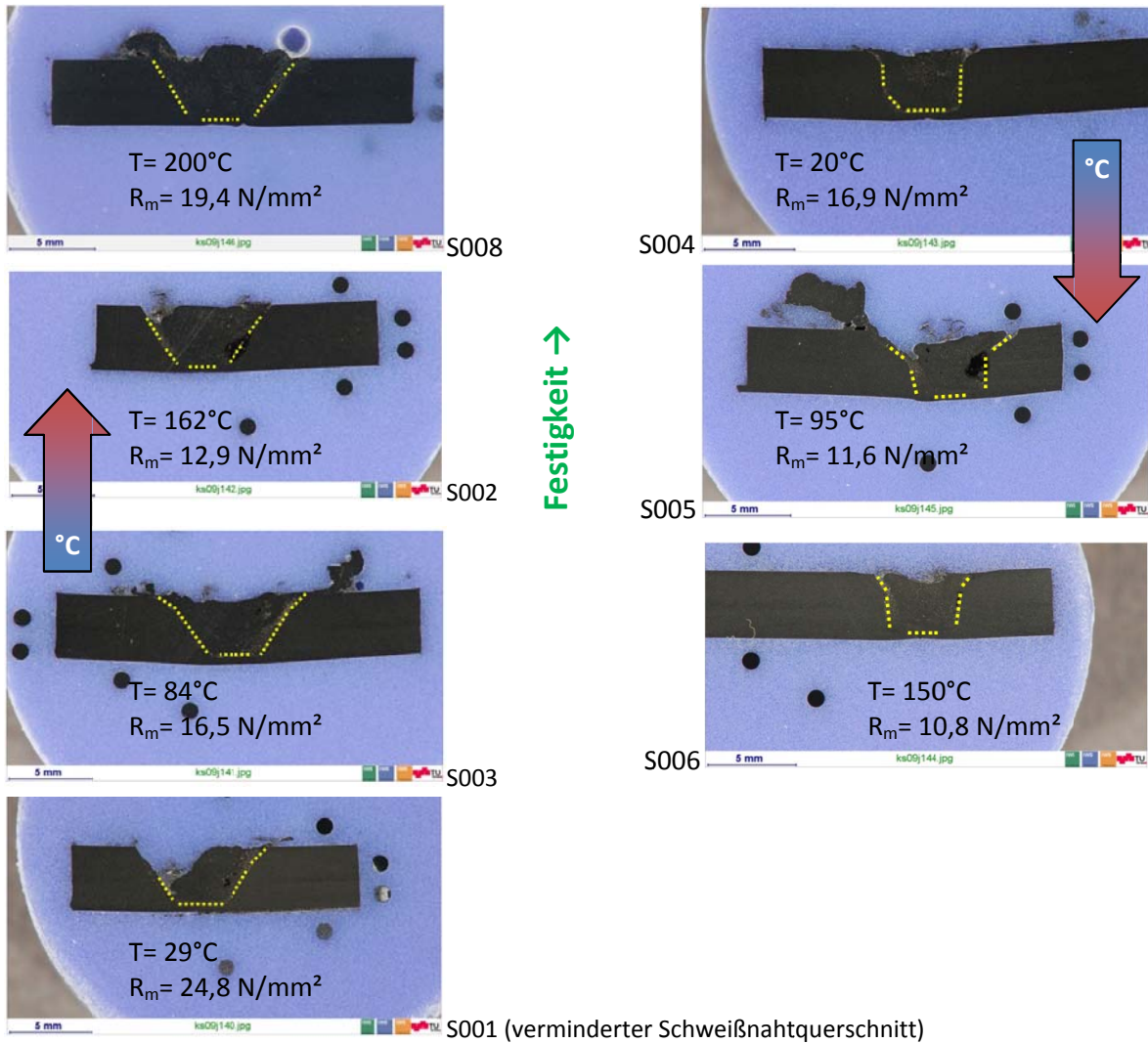


Tabelle 29: Gegenüberstellung der Schweißnahtgeometrie WKZ 2 (links) und WKZ 3 (rechts); gelb-Rührzone

Im Anschluss wurden die Schweißnähte S002 (WKZ 2) und S004 (WKZ 3) plastographisch miteinander verglichen (Abbildung 108-Abbildung 110). Dabei zeigen sich deutlich die Vorteile von Werkzeug 2.

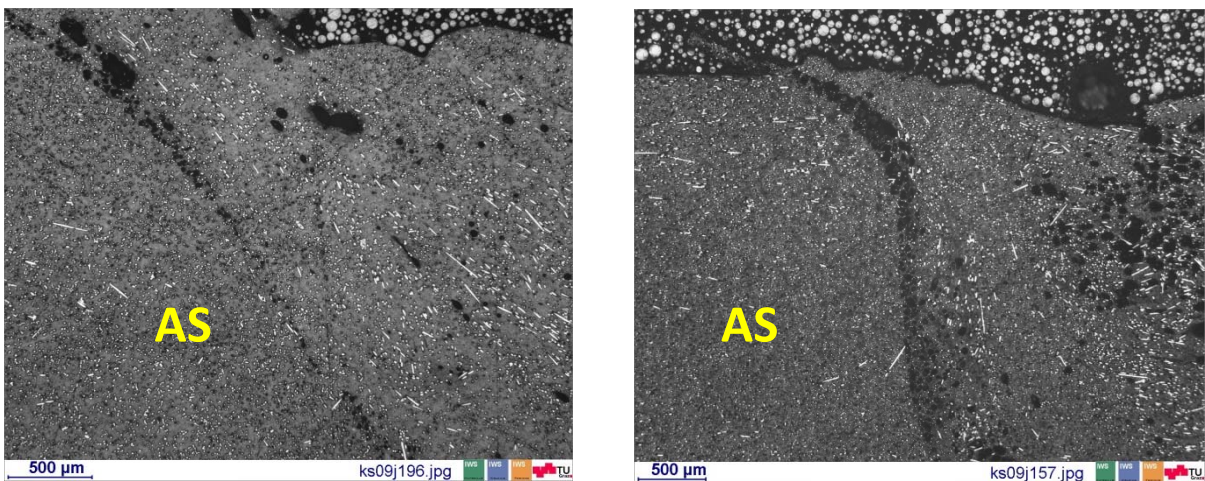


Abbildung 108: Vergleich Anbindung an der Advancing Side-KS_0903_S002 (Wkz2) mit KS_0903_S004 (Wkz3)

An der Advancing Side zeigen sich ebenso wie an der Bottom Disturbance bei Verwendung von Werkzeug 2 weniger Poren sowie eine bessere Anbindung.

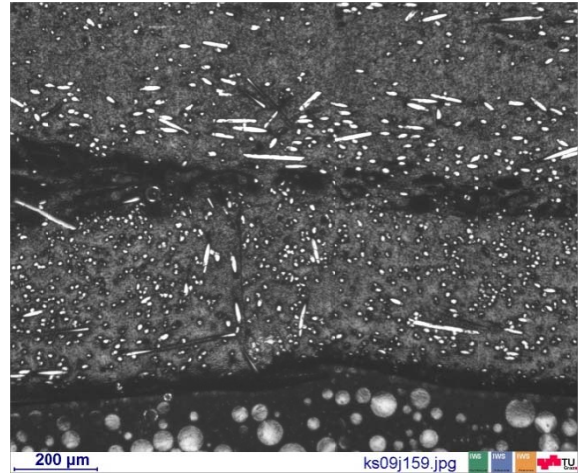


Abbildung 109: Vergleich Anbindung an der Bottom Disturbance-KS_0903_S002 (Wkz2) mit KS_0903_S004 (Wkz3)

An der Retreating Side treten generell verstärkt Bindefehler und Poren auf, doch auch hier zeigt Werkzeug 2 eine stellenweise bessere Anbindung an das Grundmaterial (Abbildung 110).

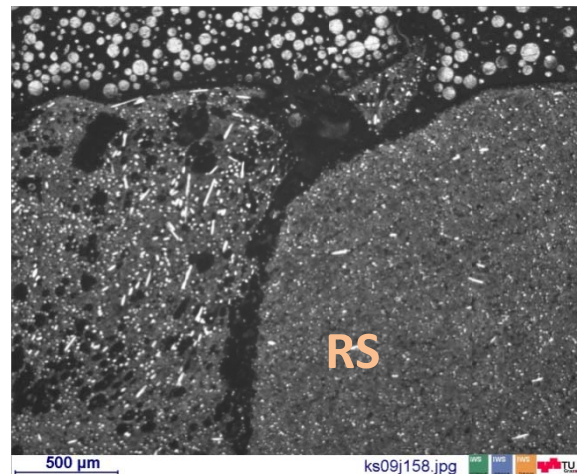
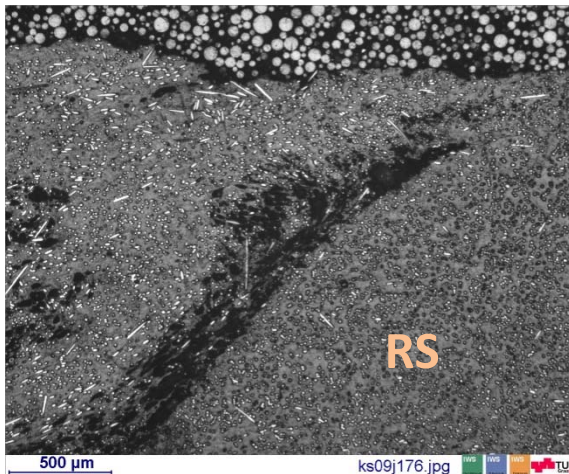


Abbildung 110: Anbindung an der Retreating Side-KS_0903_S002 (Wkz2, rechts) mit KS_0903_S004 (Wkz3, links)

Im Anschluss wurden weitere Versuche bei hohen Temperaturen durchgeführt, wobei die Wärme mittels Heißluftfön eingebracht wurde. Die Drehzahlen wurden während des Versuchs stark variiert (Tabelle 30). Der Vorschub wurde mit 50 mm/min für alle Versuche gleich gewählt, ebenso wie die Eindringtiefe mit 3,3mm.

Proben_Nr	WKZ	Drehzahl [U/min]	Temp Ofen [°C]	Vorwärm-Temp. [°C]	gem. Temp. oben [°C] ³¹	Anmerkung
0903_S009	2	3200/2500	/	/	81	HLF Stufe 10
0903_S010	2	3200/2500/2000	200°C	200	210	HLF Stufe 5
0903_S011	2	1900/1500/2100/600	200°C	200	211	HLF Stufe 5
0903_S012	2	3200/2500	200°C	200	239	HLF Stufe 7/5
0903_S014	2	3200/2500/1800	/	100	266	HLF Stufe 10
0903_S016	3	3200/2500/1800	/	90°C	/	HLF Stufe 10

Tabelle 30: Parameter der Versuche mit Werkzeug 2 und 3/ Ultramid; Winkel: 2,5°, v= 50mm/min, Eindringtiefe 3,3mm

³¹ Gemessen mithilfe des berührungslosen Infrarot- Temperaturmessgerätes

Für die Zugversuche wurde die für den jeweiligen Bereich der Schweißnaht wirkende Drehzahl ermittelt sowie die mittlere herrschende Temperatur³² (Tabelle 31).

Probennr.	WKZ	Drehzahl U/min	Temperatur [°C]	R _m [N/mm ²]	% GW
S010A	2	3200	210	20.0	15.9%
S009A	2	3200	81	16.8	13.4%
S014A	2	3200	266	15.8	12.6%
S010B	2	2000	210	14.8	11.8%
S016A	3	3200	250	14.6	11.6%
S011B	2	600	211	14.2	11.3%
S011A	2	1900	211	13.5	10.8%
S012B	2	2500	239	12.7	10.1%
S014B	2	1800	266	9.4	7.5%
S009B	2	2500	81	7.5	6.0%
S016B	3	1800	250	6.0	4.7%
S012A	2	3200	239	3.6	2.8%

Tabelle 31: Ergebnisse der Zugversuche KS_0903_S009-S016 (Ultradur)

Um die Daten besser graphisch darstellen zu können, wurden die Werte für Werkzeug 2 im Programm Minitab als Konturdiagramm ausgewertet (Abbildung 111; die gemessenen Werte sind als schwarze Datenpunkte dargestellt).

Mit Werkzeug 2 konnte bei einer Drehzahl von 3200 U/min und einer Temperatur von 210°C eine maximale Schweißnahtfestigkeit von knapp 20 N/mm² erreicht werden, das entspricht 16% des Grundwerkstoffs. Die besten Ergebnisse wurden bei einer hohen Drehzahl (3200 U/min) und einer moderaten Wärmeeinbringung mittels Heißluftfön (Stufe 5) erzielt.

Konturdiagramm von Festigkeit vs Drehzahl; Temperatur

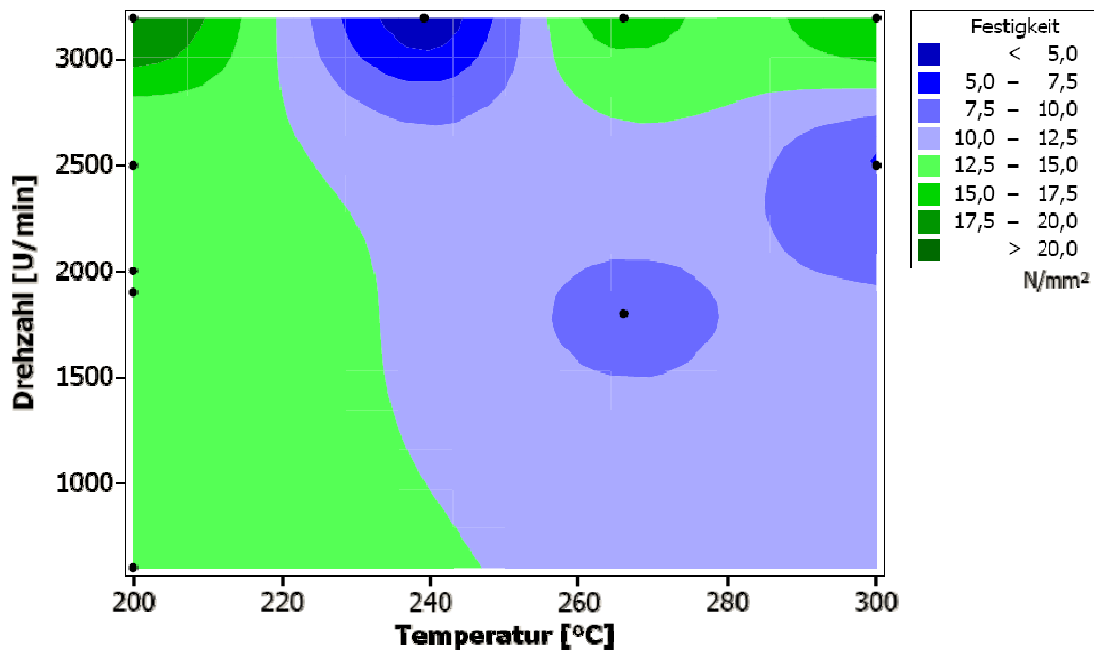


Abbildung 111: Konturdiagramm der Reihe KS_0903 (Werkzeug 2) von Festigkeit vs. Drehzahl; Temperatur – Minitab

³² Gemessen mithilfe des berührungslosen Infrarot- Temperaturmessgerätes, bzw. geschätzt (0903_S016)

Mit Werkzeug 3 konnte eine Festigkeit von 14,6 N/mm² erreicht werden, welches einem Schweißfaktor von knapp 0,12 entspricht. Mit WKZ 3 wurde jedoch nur eine Probe verschweißt, bei niedriger Temperatur der Heizplatte, jedoch unter hoher Wärmeeinbringung mittels Fön.

Da die Versuche trotz der zahlreichen Variation der unterschiedlichsten Parameter keine Verbesserung des Ergebnisses aus KS_0902_S005 lieferten, wurden zum Vergleich zwei andere, am IWS bereits vorhandene Pingeometrien mit den Parametern des erfolgreichen Versuchs getestet (Abbildung 112).

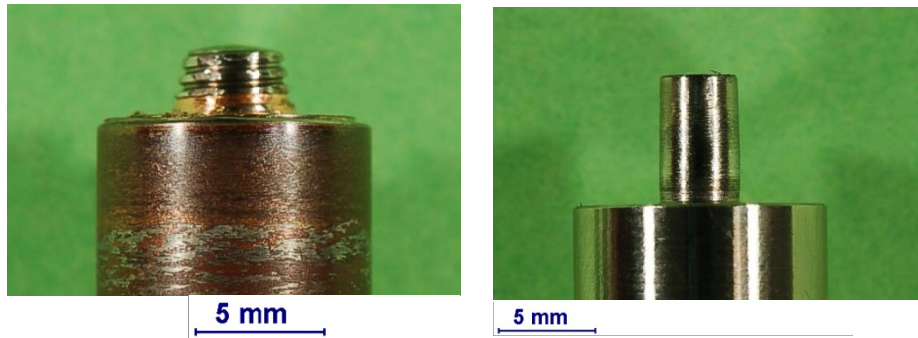


Abbildung 112: Pingeometrie mit Gewinde G (links), Pingeometrie glatt P (rechts)

Einzig die Temperatur der Heizplatte wurde variiert (20°C-120°C). Die restlichen Parameter finden sich in Tabelle 32.

Proben_Nr.	WKZ	Eindringtiefe [mm]	Temperatur Heizpl.[°C]
KS_0904_S002	G	-3	20
KS_0904_S003	P	-3	20
KS_0904_S004	G	-2,3	120
KS_0904_S005	2	-3,3	120

Tabelle 32: Parameter der Versuchsreihe KS_0904; Winkel 2,5°; Drehzahl: 2500 U/min; Vorschub 50 mm/min

Das Nahtaussehen der Versuche (Abbildung 113) ließ erkennen, dass auch mit diesem Werkzeug in einer langwierigen Parameterstudie akzeptable Festigkeiten erreicht werden könnten. Doch es ist fraglich, ob es je möglich sein wird, optisch ansprechende Nähte ohne oder mit geringem Austrag von Material aus der Fügezone zu schweißen.



Abbildung 113: Nahtaussehen_KS_0904-S002, S003 und S004 (von oben)

Die Naht KS_0904_S002 (Abbildung 113, Oben) zeigt einen anfänglich guten Zusammenhalt an der Nahtoberfläche; dann aber staut sich das Material unter der Schulter und wird an der Advancing Side aus der Fügezone hinausgedrängt. Während das Material an der Oberfläche durch den Reibungseinfluss der Schulter fließt, reißt das Material im Schweißgrund, besonders an der Retreating Side, förmlich aus. Dies ist auf die geringe Wärmeeinbringung im Schweißgrund und auf die Pingeometrie G (Abbildung 112) zurückzuführen. KS_0904_S004 (Abbildung 113, Unten) wurde mit dem gleichen Werkzeug wie S002 verschweißt, jedoch mit einer geringeren Eindringtiefe und Wärmeeinbringung (120°C) durch die Heizplatte von unten. Auch hier wird durch die Pingeometrie kaum ein Zusammenhalt der Fügepartner erreicht. Durch die Wärmeeinbringung von unten wird das Schweißgut flüssiger und durch die Drehung des Pins aus der Naht verdrängt.

KS_0904_S003 (Abbildung 113, Mitte) wurde mit der glatten Pingeometrie P verschweißt (Abbildung 112). Die beiden Fügepartner mischen sich besser und es kommt zu einem optimaleren Fließen des Werkstoffs, was zu einer besseren Nahtoptik führt. Durch das Ausreißen des Materials unter der Werkzeugschulter findet sich in dieser Naht auch Stellen fehlerhafter Anbindung der Fügepartner.

5.2.1.4 Versuche mit stehender Schulter (Aluminium)

Die nächsten Versuche wurden mit Werkzeug 3, eingebaut in die stehende Aluminiumschulter, durchgeführt (Abbildung 114). Diese zusätzliche Vorrichtung sollte das Auswerfen des Materials aus der Fügezone verhindern, und zu einer Verfestigung des Schweißguts in der Fügenaht führen.



Abbildung 114: Stehende Schulter aus Aluminium und Werkzeug 3

Erste Versuche wurden sowohl mit Ultramid und Ultradur durchgeführt; die Ergebnisse der Versuche mit dem Werkstoff Ultradur finden sich in Kapitel 5.2.2.3, die Parameter der Schweißung des Werkstoffs Ultramid sind im Folgenden in Tabelle 33 aufgelistet.

Proben_Nr.	Drehzahl [U/min]	Eindringtiefe [mm]	Temp. HZPI [°C]	Temp. Ofen [°C]	R _m [N/mm ²]	% GW
0905_S002	3200	-3,1	RT	/	15,0	12,0
0905_S003	3200	-3,22	130	/	6,7	5,3
0905_S004	2000	-3,22	130	200	10,5	8,3

Tabelle 33: Parameter der Schweißversuche KS_0905 und Ergebnisse der Zugprüfung; Winkel: 2,8°; Vorschub 50 mm/min

Die besten Ergebnisse lieferten die Versuche bei hoher Drehzahl und Raumtemperatur. Trotz der stehenden Schulter zeigte sich keine Verbesserung der Festigkeit im Vergleich zu den Versuchen mit dem konventionellen Rührreißschweißwerkzeugen.

Unter der stehenden Schulter staute sich das herausgescherte Material. Ein Teil des verrührten Materials riss ab und wurde zwischen Pin und feststehender Schulter herausgedrückt. Aufgrund des Materialverlusts entstanden Hohlräume; außerdem fließt der Werkstoff aufgrund der zu niedrigen Prozesstemperatur nicht richtig. Bei der oberflächlichen Betrachtung der Schweißnaht weisen wenige Bereiche eine gleichmäßige Nahtform auf (Abbildung 115, vgl. auch Abbildung 117, Kapitel 5.2.2.3, Ultradur).



Abbildung 115: Schweißnahtaussehen der besten Schweißung KS_0905_S002 (Ultradur)

Die stehende Schulter eignet sich gut dazu die sonst vorkommenden Materialwülste an der Schweißnaht abzutragen. Keineswegs aber führte diese Vorrichtung zu einer besseren Nahtoptik und auch nicht zu einer Verfestigung des Materials. Auch die zusätzliche Wärmeeinbringung durch Ofen und Heizplatte führte nicht zu einer Verbesserung der Festigkeitswerte (Tabelle 33).

5.2.2 Ultradur-Werkzeugentwicklung

5.2.2.1 Vorversuche

Die ersten Versuche wurden kalt mit Ultradur ($R_m = 107,6 \text{ N/mm}^2$) mit dem konventionellen Rührreißschweißwerkzeug 1 (Kapitel 4.3.1) ohne extra Einspannung durchgeführt. Die Proben erreichten dabei keinen Zusammenhalt. Die Sichtprüfung ergab, dass durch die ungenügend feste Einspannung Material in den Fügeseit gedrückt wurde (Tabelle 34).

Drehzahl [U/min]	600	600	1400
Eindringtiefe [mm]	-1,55	-1,6	-1,7

Tabelle 34 Versuche – kalt mit Ultradur; Vorschub 2000 mm/min

5.2.2.2 Versuche mit konventionellen Rührreißschweißwerkzeugen

Neben den in Kapitel 5.2.1.3 mit Ultramid durchgeführten Versuchen wurden auch zwei Platten aus Ultradur mit den Werkzeugen 2 und 3 verschweißt. Dies geschah bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 50mm/min und einer Eindringtiefe von 3,3 mm. Die restlichen Parameter finden sich in Tabelle 35.

Proben_Nr.	WKZ	Winkel [°]	Drehzahl [U/min]	Temp. Ofen [°C]	Temp. Impl. [°C]	Temp. oben [°C]	Anmerkung
0903_S013	2	2,5	3200/2500/1800	200°C	110	297	Heißluftfön
0903_S017	3	2,5	3200/2500/1800	/	90°C	keine T-Messung	Heißluftfön

Tabelle 35: Parameter der Versuche mit konventionellen Rührreibschweißwerkzeugen; Vorschub: 50 mm/min; Eindringtiefe 3,3mm

Die maximal erreichte Festigkeit der Schweißverbindung betrug dabei 10 N/mm², dies entspricht einem Schweißfaktor von ca. 0,09.

Probe	WKZ	Drehzahl [U/min]	R _m [N/mm ²]	% GW
S013A	2	3200	3.9	3.6%
S013B	2	1800	7.4	6.9%
S017A	3	3200	10.0	9.3%

Tabelle 36: Ergebnisse der Zugversuche KS_0903 (Ultradur)

Dabei wurde das beste Ergebnis mit Werkzeug 3 erreicht. Dies ist durch die deutlich bessere Anbindung des Schweißgutes an das Grundmaterial zu erklären (Abbildung 116). Durch den Heißluftfön kommt es zu einem starken Verzug der Platten. In der Zugprüfeinrichtung biegt sich die Probe und es kommt teilweise bereits beim Einspannen zum Bruch oder zu verminderter Festigkeitswerten. In den beiden Schlitzen ist auf der Retreating Side ein verstärktes Hinausfließen des Materials aus der Schweißnaht zu erkennen, welches durch die Wärmeeinbringung mittels Heißluftfön verursacht wurde.

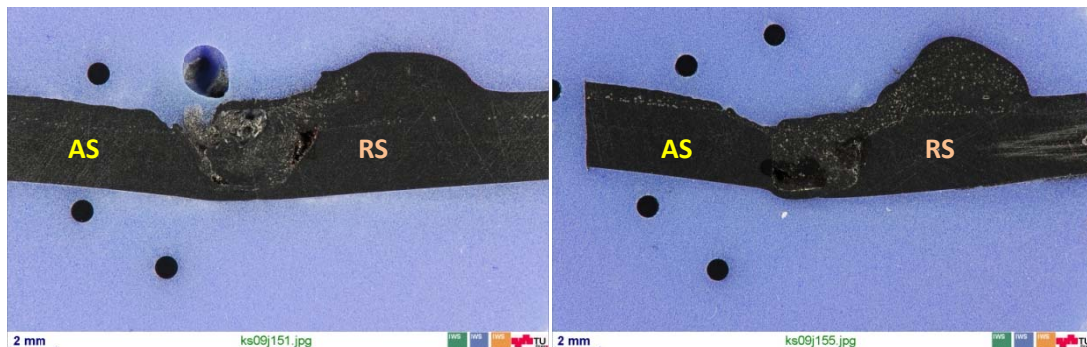


Abbildung 116: Ultradur-Makroschliff konventionelle FSW-Werkzeuge: WKZ 2 (links) und WKZ 3 (rechts)

5.2.2.3 Versuche mit stehender Schulter

Weitere Versuche wurden mit Werkzeug 3 eingebaut in die stehende Aluminiumschulter, durchgeführt (Kapitel 5.2.1.4, Abbildung 114). Die Platten wurden im Ofen auf eine Temperatur von 200°C vorgewärmt (Kapitel 4.1.6). Zu Beginn der FSW-Schweißung betrug die Plattentemperatur 130°C. Die Schweißparameter für Ultramid finden sich in Tabelle 37.

Proben_Nr.	Drehzahl [U/min]	Eindringtiefe [mm]	Vorwärm-Temp [°C]	Temp Ofen
0905_S001	2500	-3.1	RT	RT
0905_S005	2000	-3,22	130	200
0905_S007	1200	-3,22	130	200
0905_S009	800	-3,22	130	200

Tabelle 37: Parameter der Versuchsreihe KS_0905 für Ultradur; Winkel 2,8°; Vorschub 50 mm/min

Aus den geschweißten Platten wurden Zug- und Makroschliffproben hergestellt (Abbildung 117).

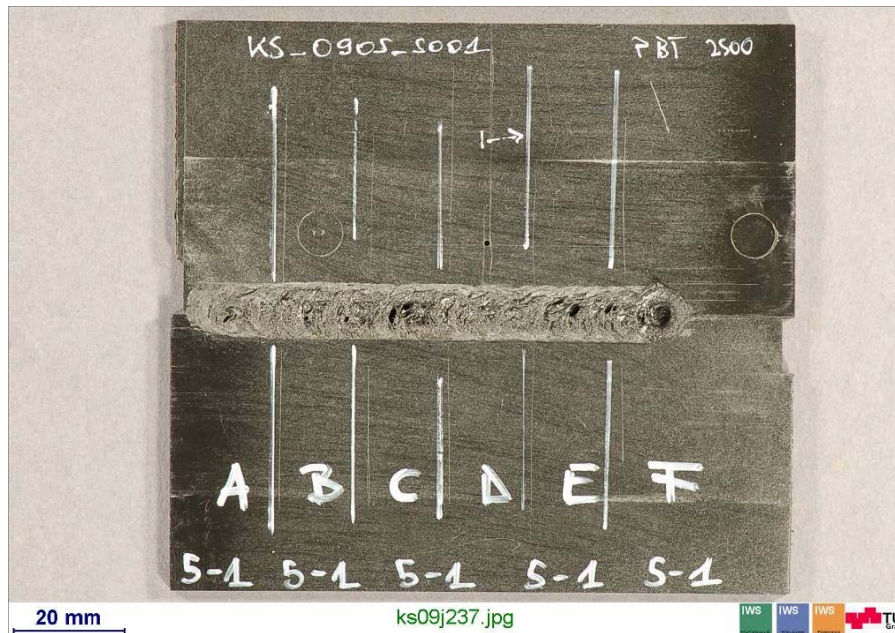


Abbildung 117: Herausnehmen der Proben aus den geschweißten Platten (B, C, E Zugproben; D Makro)

Die Resultate der Zugversuche sind in Tabelle 38 dargestellt. Die besten Ergebnisse lieferten die Versuche bei Raumtemperatur und hoher Drehzahl (2500 U/min) und bei einer Temperatur von 130° und sehr niedriger Drehzahl (800 U/min). Es wurde ein Schweißfaktor von 0,082 erreicht. Dieser Wert entspricht knapp den Werten der Schweißung, die mittels konventionellem FSW-Werkzeug (0,093) erreicht wurden.

Probe	R _m [N/mm ²]	% GW
KS_0905_S001e	8.9	8.2 %
KS_0905_S009c	7.9	7.4 %
KS_0905_S001c	5.4	5.0 %
KS_0905_S009b	4.6	4.2 %
KS_0905_S005c	3.1	2.9 %
KS_0905_S005b	1.2	1.1 %

Tabelle 38: Ergebnisse der Zugprüfung KS_0905 (Ultradur)

5.2.2.4 Prototyp der Heizplatte

Der Prototyp der Heizplatte (umgebautes Bügeleisen) wurde mittels eines Pinstiftes mit 5,2mm Durchmesser getestet (Kapitel 5.2.5, Abbildung 141). Durch die nicht präzise regelbare Temperatur wurde die Vorrichtung viel zu warm, und das verflüssigte Material wurde durch das Loch ins Innere der Vorrichtung hineingedrückt. Ein großes Problem war die Einstellung der Pinnlänge; durch die Federung der Vorrichtung war der Pin meistens zu lang. Abbildung 118 zeigt beispielhaft die Optik und die Untersuchung einer Schweißnaht, die mit Hilfe dieses Verfahrens hergestellt wurde.

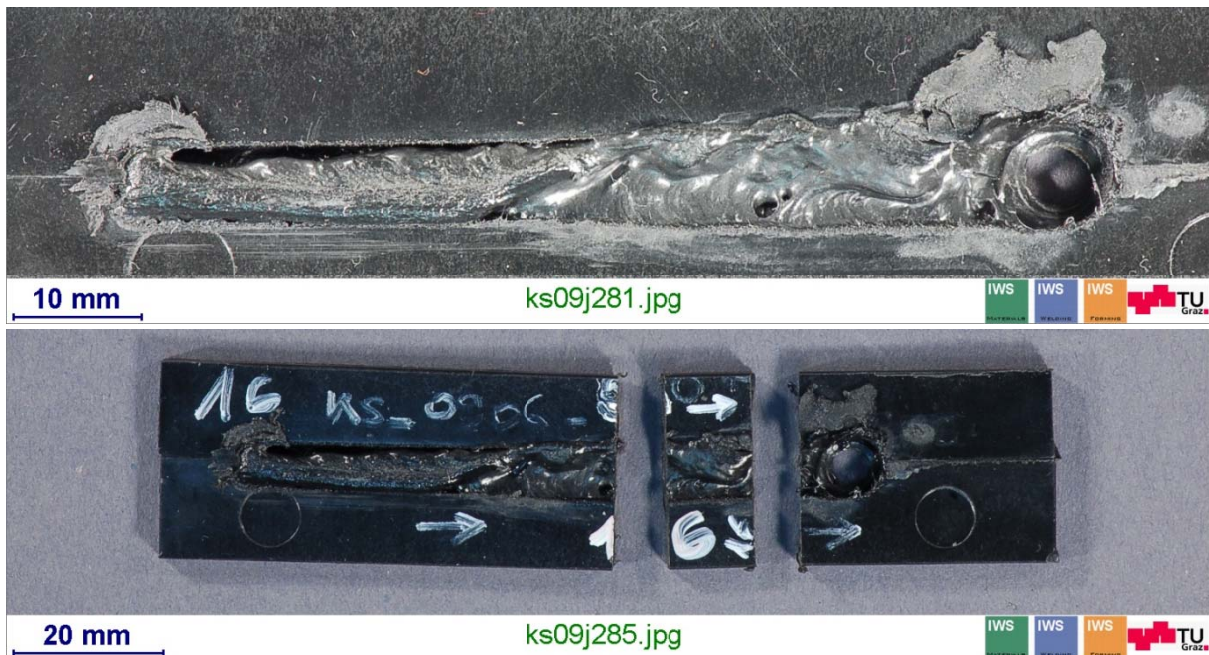


Abbildung 118: Schweißnahtaussehen KS_0906_S016 (oben) und Entnahme des plastographischen Anschliffs (unten)

Durch den Kontakt des Pinstifts mit der beheizten Platte wurde der Stift bereits erwärmt und es konnte mehr Wärme in die Fügezone eingebracht werden. Dadurch wurde der Materialfluss verbessert (Abbildung 119).

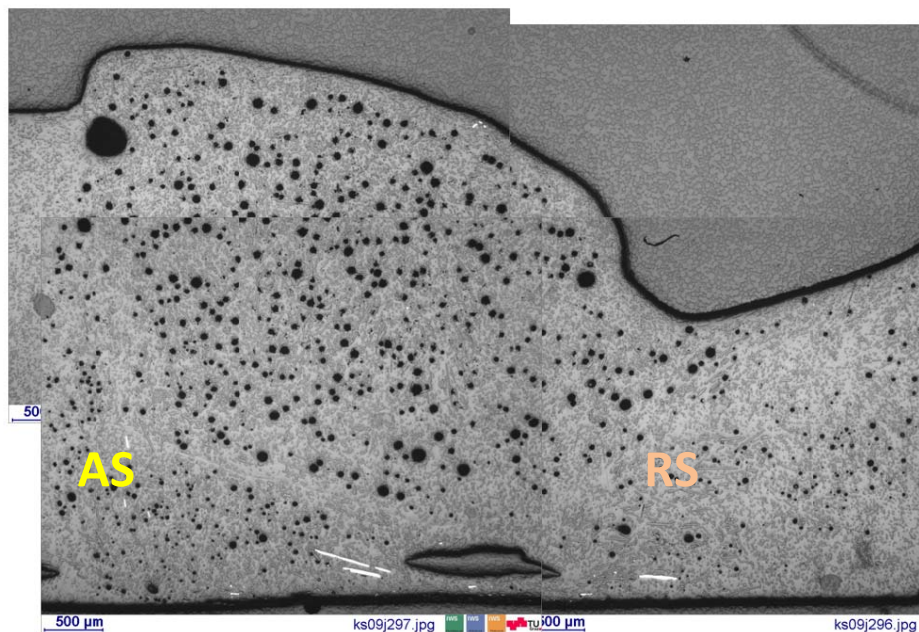


Abbildung 119: Schweißnahtquerschnitt beheizter Pinstift KS_0906_S016

Es erfolgte sowohl an der Advancing Side, als auch an der Retreating Side eine optimale Anbindung des geschmolzenen Materials. Die zusätzliche Wärmeeinbringung der stehenden Schulter führt zu einer deutlich verbesserten Anbindung im Allgemeinen und die Rührzone ist als solche nicht mehr klar abgegrenzt erkennbar. Die schlechte Anbindung an der Retreating Side war beim größten Teil der vorangehenden FSW-Zugproben die Ursache für den vorzeitigen Bruch.

Somit weist die Entwicklung dieses Werkzeugs bereits in die richtige Richtung. Die starke Schweißnahtunterwölbung und die nicht reproduzierbaren Ergebnisse führten jedoch dazu, dass die Versuche nicht mit diesem Konzept fortgeführt wurden.

5.2.2.5 Feststehende beheizte Schulter

Nach der Entwicklung wurden schließlich die ersten Versuche mit der feststehenden, beheizten Schulter durchgeführt. Die Versuche mit Ultradur wurden mit Pin 1 (Kapitel 4.3.2, Abbildung 81) durchgeführt. Abbildung 120 zeigt den Pin eingebaut in die Vorrichtung der beheizten Schulter und dem FSW-Stahlkopf.

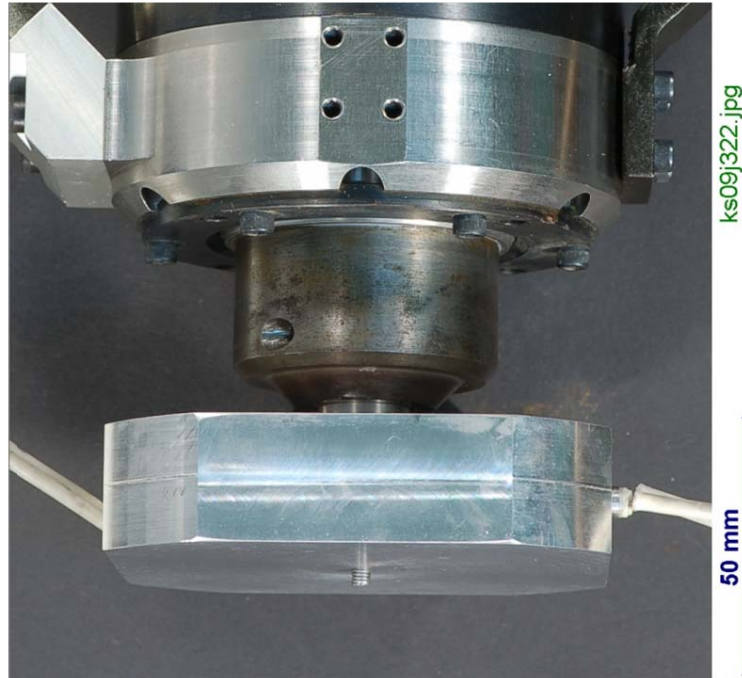


Abbildung 120: Pin 1 -eingebaut in die feststehende, beheizte Schulter und FSW-Stahlkopf

Die Ultradur-Platten wurden nach Angabe des Herstellers (Kapitel 3.3.7.3) im Heißluftofen mehrere Stunden mit Ausnahme von S001 getrocknet. Tabelle 39 gibt einen Überblick über die bei den ersten Schweißversuchen mit der stehenden, beheizten Schulter verwendeten Parameter.

Proben_Nr.	Drehzahl [U/min]	Eindringtiefe [mm]	Temp. Heizpatrone[°C]
KS_0908_S001	2500	2,5	- / (RT: 20°C)
KS_0908_S002	2500	2,7	80
KS_0908_S003	2500	2,85	120
KS_0908_S004	-2500/ 2500	2,85	80
KS_0908_S005	-2500	2,9	80
Ks_0908_S006	-2500	3	120

Tabelle 39: Parameter der Versuche mit beheizter, stehender Schulter und Pin 1; Vorschub: 50mm/min; Winkel 0°;

Es zeigte sich bereits bei den Vorversuchen ein schönes, gleichmäßiges Schweißnahtaussehen (Abbildung 121).



Abbildung 121: Schweißnaht KS_0908_S005

Auch der Querschliff der Schweißnaht aus Abbildung 121 zeigt eine gute Anbindung an der Advancing Side, jedoch eine nicht so optimale Anbindung an der Retreating Side sowie eine Schlauchpore in der Wurzel (Abbildung 122).

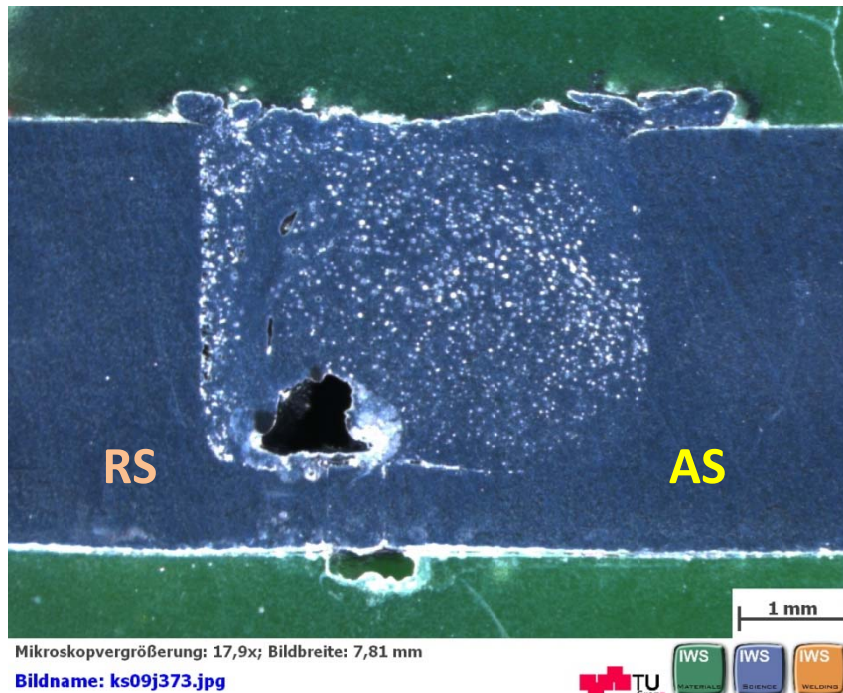


Abbildung 122: Querschliff KS_0908_S005

Die Ergebnisse der Zugprüfung zeigten, dass die höchsten Festigkeiten bei einer Temperatur von 80°C erreicht wurden. Es konnte ein Schweißfaktor von 0.17 erreicht werden.

Vergleichende Auswertung:	R _m N/mm ²	% GW	Temp.
KS_0908_S004B	18.2	16.9	80
KS_0908_S005B	16.9	15.7	80
KS_0908_S002B	17.0	15.8	80
KS_0908_S002A	14.6	13.6	80
KS_0908_S003B	14.6	13.5	120
KS_0908_S006B	13.0	12.0	120
KS_0908_S001A	10.9	10.1	20
KS_0908_S006A	10.3	9.6	120
KS_0908_S001B	10.0	9.3	20
KS_0908_S005A	8.2	7.6	80
KS_0908_S004A	7.2	6.7	80
KS_0908_S003A	5.3	4.9	120

Tabelle 40: Ergebnisse der Zugprüfung stehende beheizte Schulter Ultradur

Abbildung 123 zeigt den Querschliff der Probe KS_0908_S004. Bei dieser Probe wurde die höchste Festigkeit von dieser Versuchsreihe gemessen. Die Anbindung an der Advancing Side ist gut, während die Anbindung an der Retreating Side schlechter scheint. Auffallend ist das vermehrte Auftreten von Poren im mittleren Bereich der Rührzone.

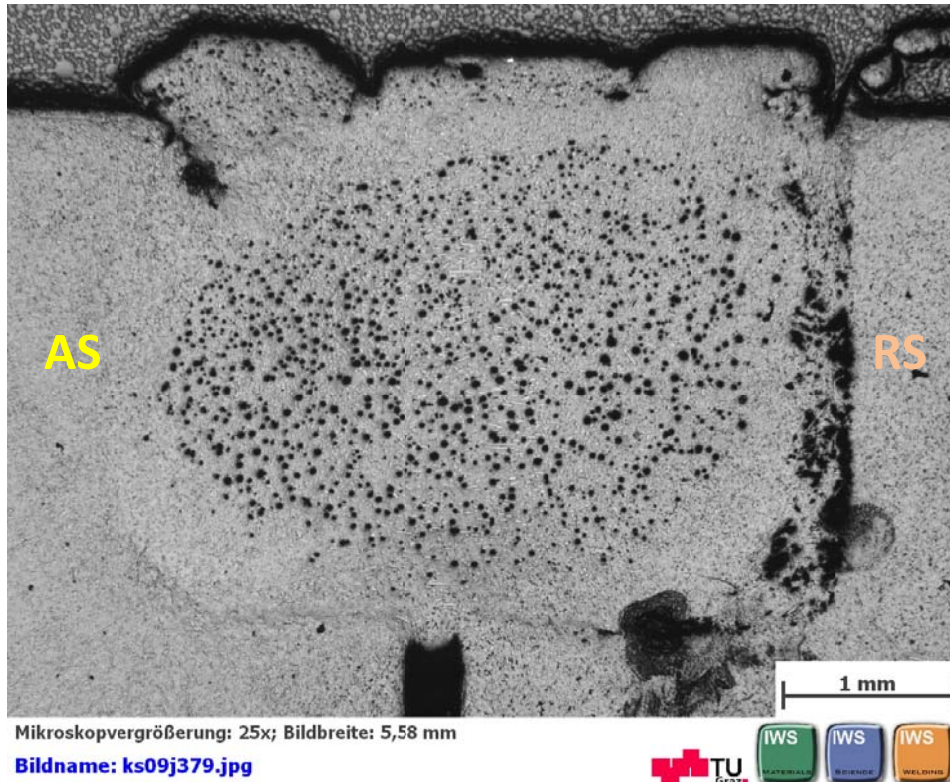


Abbildung 123: Querschliff der Probe KS_0908_S004

Abbildung 124 zeigt die gute Anbindung des Schweißgutes an das Grundmaterial an der Bottom Disturbance und die Anbindung an der Retreating Side.

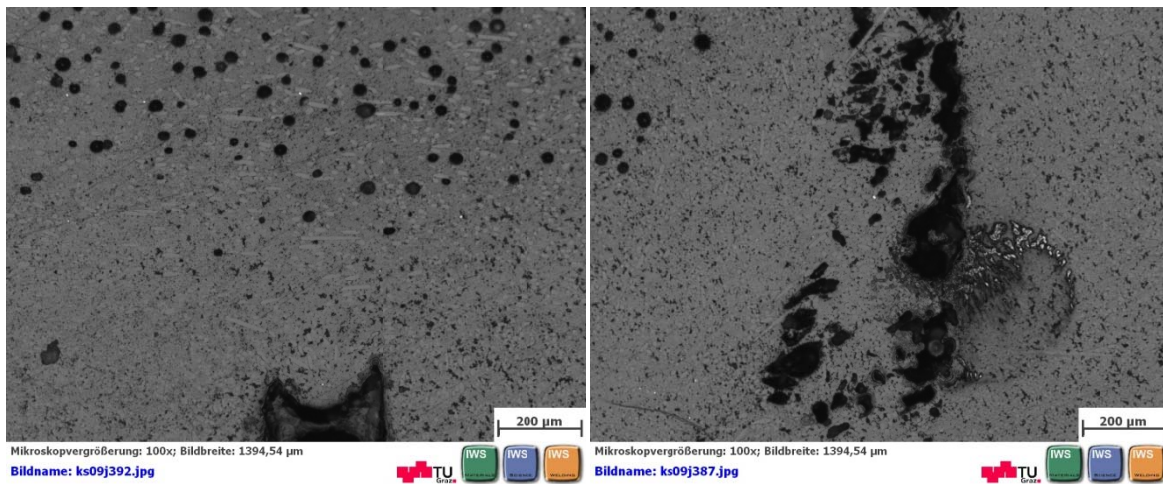


Abbildung 124: Vergrößerung aus Abbildung 123: Schweißwurzel (links) und Anbindung Retreating Side (rechts)

Weitere Versuche wurden bei höheren Temperaturen bzw. unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt (Tabelle 41). Diesmal wurden die Platten nicht im Trockenofen vorgetrocknet.

Proben_Nr.	Drehzahl [U/min]	Eindringtiefe ORG [mm]	Temp. Heizpatrone[°C]
KS_0908_S009	1500	3/3.05	80
KS_0908_S010	1500	3,05	100
KS_0908_S011	2500	3,05	160
KS_0908_S012	1500	3,05	160
KS_0908_S013	3200	3,05	160
KS_0908_S014	3200	3,05	120

Tabelle 41: Parameter der weiterführenden Versuche mit der stehenden, beheizten Schulter und Pin 1/Ultradur; Werkzeug Pin 1; Winkel. 0°; Vorschub 50 mm/min

Die hohen Festigkeiten wie in den ersten Versuchen konnten diesmal nicht erreicht werden. Die besten Ergebnisse wurden bei Temperaturen $\leq 100^{\circ}\text{C}$ erreicht. Hierbei muss beachtet werden, dass die Proben bei einer niedrigeren Drehzahl (1500 U/min) verschweißt wurden als bei den optimalen Schweißungen bei 2500 U/min (Tabelle 42).

Probe	R _m [N/mm ²]	% GW	Temp. [°C]	Drehzahl [U/min]
S010	9.5	8.8%	100	1500
S009	8.6	8.0%	80	1500
S013	7.8	7.3%	160	3200
S014	7.1	6.6%	120	3200
S011	4.9	4.5%	160	2500
S012	2.0	1.9%	160	1500

Tabelle 42: Ergebnisse der Zugprüfung Ultradur/stehende beheizte Schulter

Abbildung 125 zeigt die Ergebnisse der Zugprüfung sowie die jeweiligen Standardabweichungen. Es wurden jeweils 2 Zugproben je Schweißnaht geprüft.

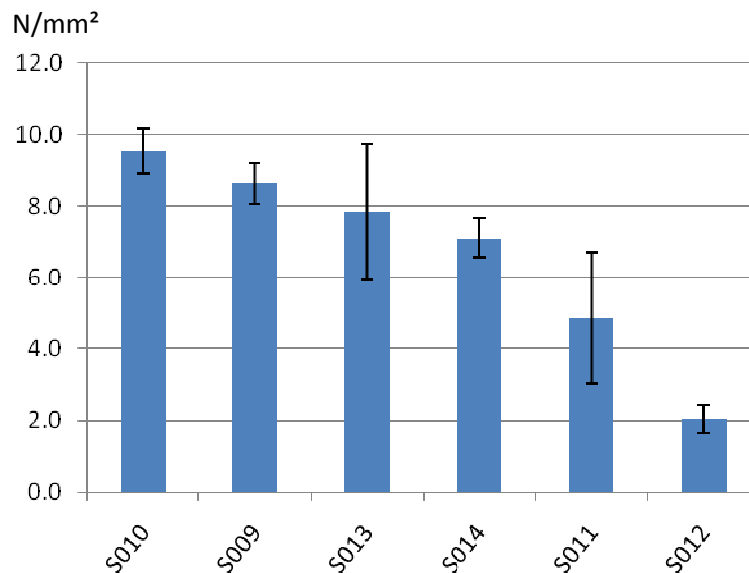


Abbildung 125: Graphische Darstellung der Ergebnisse aus den Zugversuchen KS_0908_S009-S014

5.2.2.6 Vergleich der Werkzeugkonzepte

Ein Vergleich der jeweils besten Schweißnähte von Ultradur, einmal mit dem konventionellen Pin verschweißt, und einmal mit der feststehenden, beheizten Schulter, zeigt deutlich die Vorteile des neuen Werkzeugkonzepts (Abbildung 126).

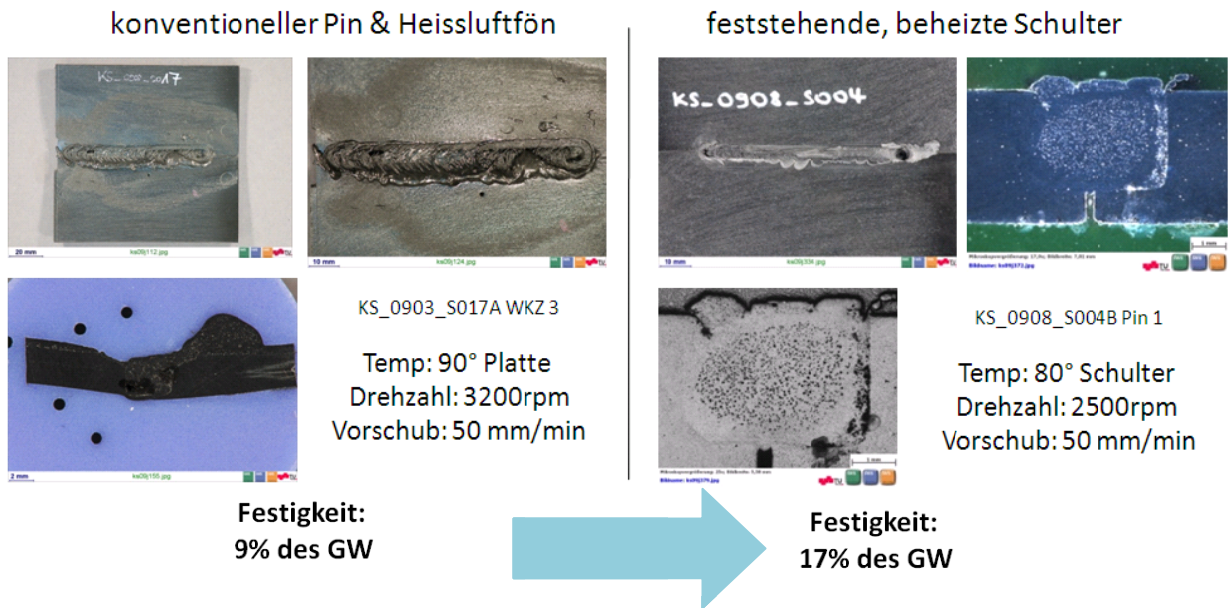


Abbildung 126: Verbesserung der Festigkeit anhand stehender, beheizter Schulter

Es konnte eine Festigkeitssteigerung um 80 % erreicht werden, von 10 N/mm² auf 18,2 N/mm². Diese Ergebnisse ließen die Vermutung zu, dass durch die Anwendung der stehenden, beheizten Schulter auch bei dem Werkstoff Ultradur eine vergleichbare Festigkeitssteigerung zu erreichen wäre.

5.2.3 Ultradur-Stehende, beheizte Schulter

5.2.3.1 Vorversuch

Nachdem bei Ultradur dank des Werkzeugs mit der stehenden, beheizten Schulter die Festigkeit der Schweißverbindung auf ein beinahe doppelt so hohes Niveau gesteigert werden konnte ($f_{z3}=9,3\%^{33}$; $f_{zp1}=16,9\%^{34}$), wurden nun Versuche mit Ultradur durchgeführt.

Als Werkzeug wurde die Vorrichtung mit der stehenden, beheizten Schulter sowie Pin 2 verwendet (Kapitel 4.3.2). Zunächst wurden zwei Vorversuche durchgeführt, um das Parameterfenster abstecken zu können. Statt des kleinen Lagers wurde zwischen Pin und stehender Schulter ein Gleitlager aus Messing eingesetzt, um zu testen, ob eventuell auch diese Lagerart den auftretenden Kräften gewachsen wäre. Leider kam es nach ca. 120mm geschweißter Nahtlänge zu einem „Verreiber“ zwischen Pin und Gleitlager (Abbildung 127).

³³ Schweißfaktor Ultradur Konventionelles Werkzeug 3 und Heißluftfön

³⁴ Schweißfaktor Ultradur Stehende beheizte Schulter mit Pin 1

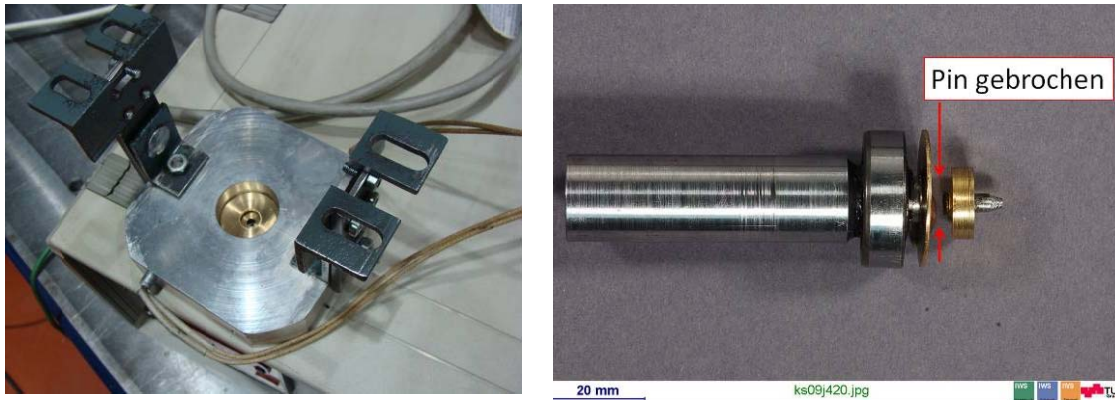


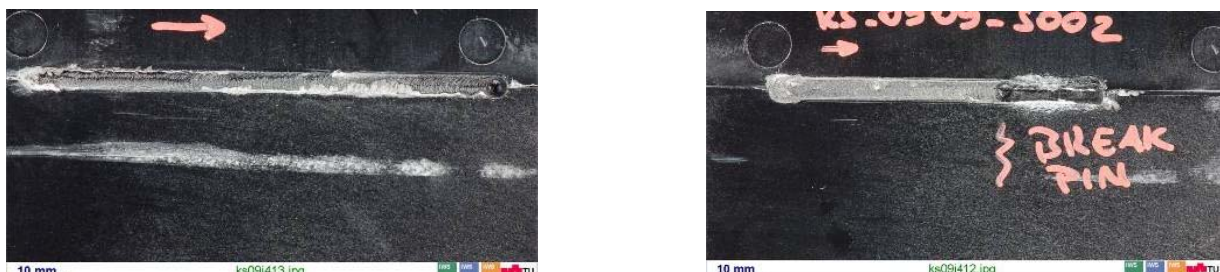
Abbildung 127: Vorrichtung mit Messing-Gleitlager (vorher) und gebrochenen/verriebebenen Pin (nachher)

In der zweiten Versuchsreihe mit Ultramid wurde wieder ein Kugellager verwendet. Die Platten aus Ultramid wurde vor den Versuchen mehrere Stunden bei einer Temperatur von 120°C im Elektroden-Trockenofen vorgetrocknet, um den Wassergehalt im Werkstoff zu minimieren. Der erste Versuch erfolgte bei einer Schweißschuhtemperatur von 80°C, der zweite bei 100°C.

Proben_Nr.	Winkel [°]	Drehzahl [rpm]	Vorschub [mm/min]	Temp [°C]
KS_0909_S001	0	1500	50	80
KS_0909_S002	0	-2500	50	100

Tabelle 43: Parameter der Vorversuche mit Ultramid

Die Proben zeichnen sich durch eine optisch gute Schweißnahtoberfläche aus, es wurde wenig Material aus der Fügenaht verdrängt (Abbildung 128).



Probe	R _m N/mm ²	% GW
KS_0909_S001A	15.7	12.0
KS_0908_S001B	8.2	6.2

Probe	R _m N/mm ²	% GW
KS_0909_S002A	15.1	11.5
KS_0909_S002B	15.0	11.4

Abbildung 128: Schweißnahtaussehen und erreichte Festigkeiten bei Ultramid; Vorversuche stehende, beheizte Schulter

Der Bruch der Zugproben erfolgte immer auf der Retreating Side. Die Ursache hierfür ist deutlich in den Schlibfbildern zu erkennen (Abbildung 129). Deutlich ist die unvollständige Anbindung an die Retreating Side zu erkennen, im Schlibfbild als hellere Bereiche erkennbar. Diese helleren Bereiche sind Zonen mit Porenneuern, und abgebrochenen Glasfasern. Laut DVS DVS 2201[86 S. 35] wird eine unvollständige Bindung an die Retreating Side beim Kunststoffschweißen durch verschmutzte Fü-geflächen, zu geringe Schweißkraft oder ungenügende Erwärmung verursacht. Probe 1 zeigt in der Rührzone einen schlechteren Materialfluss als Probe 2, verursacht durch die geringere Wärmeein-bringung und geringe Drehzahl. Probe 2 zeigt eine bessere Vermischung in der Stirzone, doch die Anbindung an die Retreating Side ist ebenfalls schlecht.

Die Ultradur-Proben, die mit Pin 1 mit ähnlichen Parametern verschweißt wurden, zeigten im Unterschied zu Ultramid weniger Poren und eine sehr gute Anbindung an der Advancing Side (Kapitel 5.2.2.5, S.103, Abbildung 122).

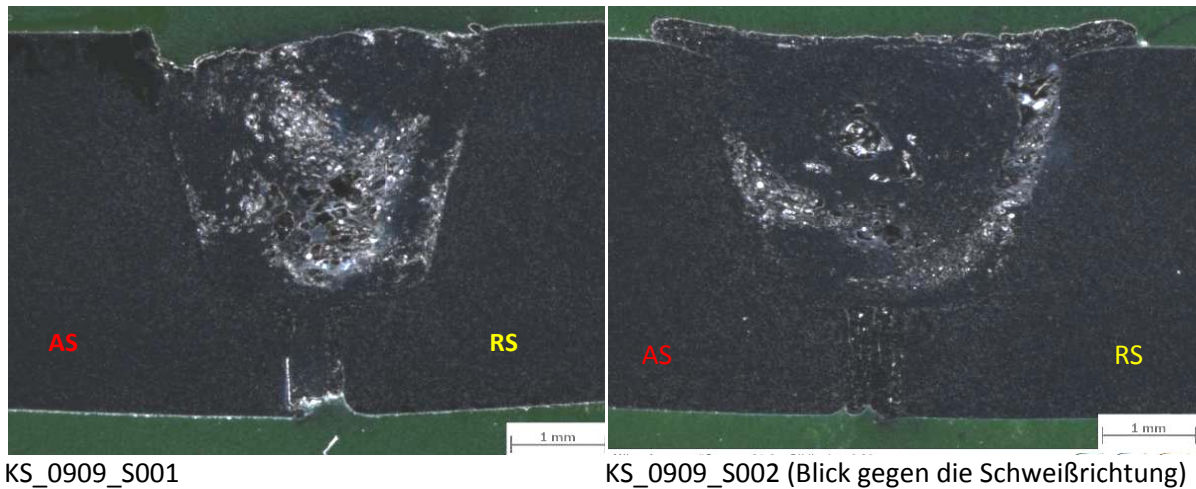


Abbildung 129: Schliiffbilder Ultramid: KS_0909_S001 (links) und S002 (rechts)

Die Zugversuche ergaben Mittelwerte von 8.9N/mm^2 bei einer Vorwärmtemperatur von 80°C und 11.3N/mm^2 bei einer Vorwärmtemperatur von 100°C . Dabei ist zu beachten, dass der relativ niedrige Wert von Zugprobe B von KS_0909_S001 durch das Durchrutschen der Probe an der Zugprüfmaschine verursacht wurde (Abbildung 130). Die restlichen 3 Proben wurden später bei optimalen Bedingungen gezogen.

Unter Vernachlässigung der Zugprobe Ks_0909_S001B erkennt man, dass beide Proben ähnliche Zugfestigkeiten aufweisen, trotz der unterschiedlichen Temperaturen, Drehzahlen und Drehrichtungen.

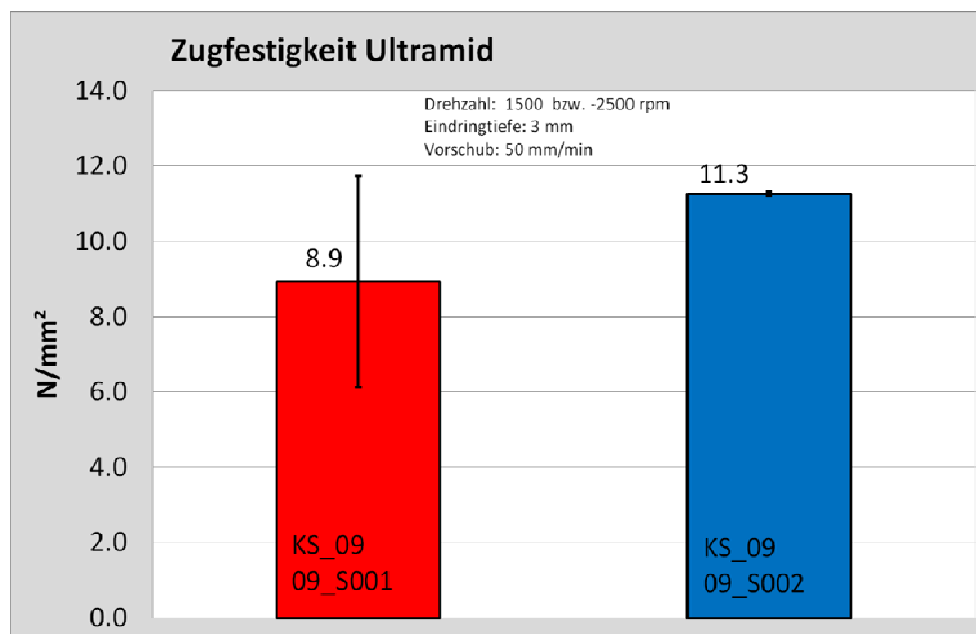


Abbildung 130: Vergleich der Bruchspannungen von Polyamid bei einer Temperatur von 80°C (links) und 100°C (rechts)

Der Bruch erfolgte immer auf der Retreating Side, verursacht durch die schlechte Anbindung des verrührten Materials in diesem Bereich. Ursache hierfür war die zu niedrige Temperaturentwicklung und ein zu niedriger Druck auf die Fügestelle.

5.2.3.2 Parameterstudie

Nach diesen ersten, vielversprechenden Versuchen mit dem Werkzeugkonzept mit der stehenden, beheizten Schulter wurde nun ausgehend von den im Vorversuch gewählten Parametern eine Versuchsmatrix abgesteckt, wie in Tabelle 44 ersichtlich.

Da die Temperatur von 80°C zu gering war, um ein optimales Fließen des Werkstoffs zu bewirken, wurde die nächste Versuchsserie bei einer Temperatur von 100°C fortgesetzt. Um den optimalen Drehzahlbereich herauszufinden, wurden drei verschiedene Werte (1500, 2500 und 3200U/min) in Kombination mit den Temperaturen 100°C und 120°C verschweißt. Vorschubgeschwindigkeit war immer 50 mm/min.

Drehzahl ► ▼Temperatur	-1500 U/min	-2500 U/min	-3200 U/min
80 °C	Vorversuch	/	/
100 °C	Vorversuch	X	X
120 °C	X	X	X

Tabelle 44: Parametermatrix für das Fügen von Ultramid mit Pin 2 des Werkzeugs mit stehender, beheizter Schulter, v=50 mm/min

Verwendet wurde der in Kapitel 4.3.2 beschriebene Schweißschuh mit Heizpatrone. Als Pinwerkzeug wurde ein kegelförmiger Pin mit Durchmesser 4mm und einer Pinlänge von 2.6 mm verwendet (Pin 2).

Während der Schweißungen wurde versucht, den Schweißschuh so nah wie möglich am Material zu führen, um optimalen Druck auf die Schweißnaht aufzubringen. Die Vorrichtung wurde neben dem einreihigen Schrägkugellager wieder mit einem Rillenkugellager ausgestattet, um eine längere Haltbarkeit des Werkzeuges zu garantieren. Die Ultradurplatten wurden 24 Stunden im Trockenofen bei 120°C vorgetrocknet, und kurz vor den Versuchen entnommen. Somit konnten die Platten vor der Versuchsreihe auf Raumtemperatur abkühlen. Dies war notwendig, da bei den vorhergehenden Versuchen festgestellt wurde, dass die warmen Platten nach dem Einspannen durch den Kontakt mit der kühlen Einspannplatte stark schrumpften. Dadurch entstand ein Spalt zwischen den zu verschweißenden Platten. Durch das Abkühlen vor dem Einspannen konnte erreicht werden, dass die Platten längsseitig plan aneinanderlagen, und sich nicht durch eine nachfolgende Abkühlung kurz vor dem Versuch noch auseinander bewegten. In Abbildung 131 ist der Versuchsaufbau kurz vor Beginn der Schweißversuche dargestellt.

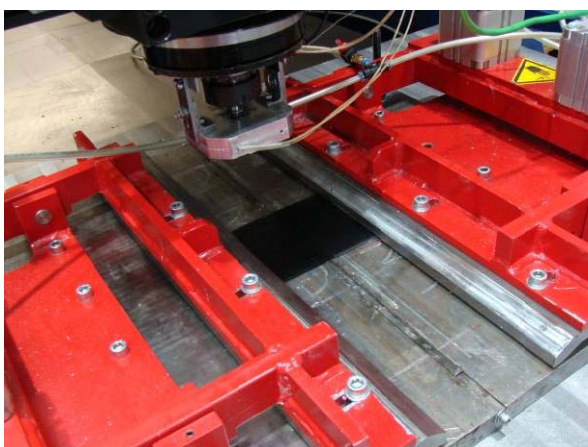


Abbildung 131: Versuchsaufbau und Einspannsituation bei Versuchsreihe KS_0910

Die Versuche wurden entsprechend der Parametermatrix (Tabelle 44) durchgeführt. Die erreichten Zugfestigkeiten bewegten sich in einem weiten Bereich. Die geringsten Werte wurden bei 80°C und einer Drehzahl von 1500 U/min erreicht. Signifikant bessere Ergebnisse wurden bei einer Drehzahl von 2500 U/min und einer Schweißschuhtemperatur von 120°C erreicht, siehe Tabelle 45.

Drehzahl / Temperatur	-1500 U/min	-2500 U/min	-3200 U/min
80 °C	11,5 N/mm ²	/	/
100 °C	11,4 N/mm ²	14,5 N/mm ²	44,4 N/mm ²
120 °C	16,0 N/mm ²	68,4 N/mm ²	29,6 N/mm ²

Tabelle 45: Erreichte Zugfestigkeiten bei Ultramid B3WG6 in den Versuchsreihen KS_0909 und KS_0910.

Abbildung 132 zeigt die Ausbildung der Schweißnaht bei einer Drehzahl von 2500 U/min und einer Schuhtemperatur von 120°C. Es kommt zu keiner Schweißnahtunterwölbung, das Schweißgut fließt gut und bildet ein für FSW typisches kreisförmiges Muster aus.

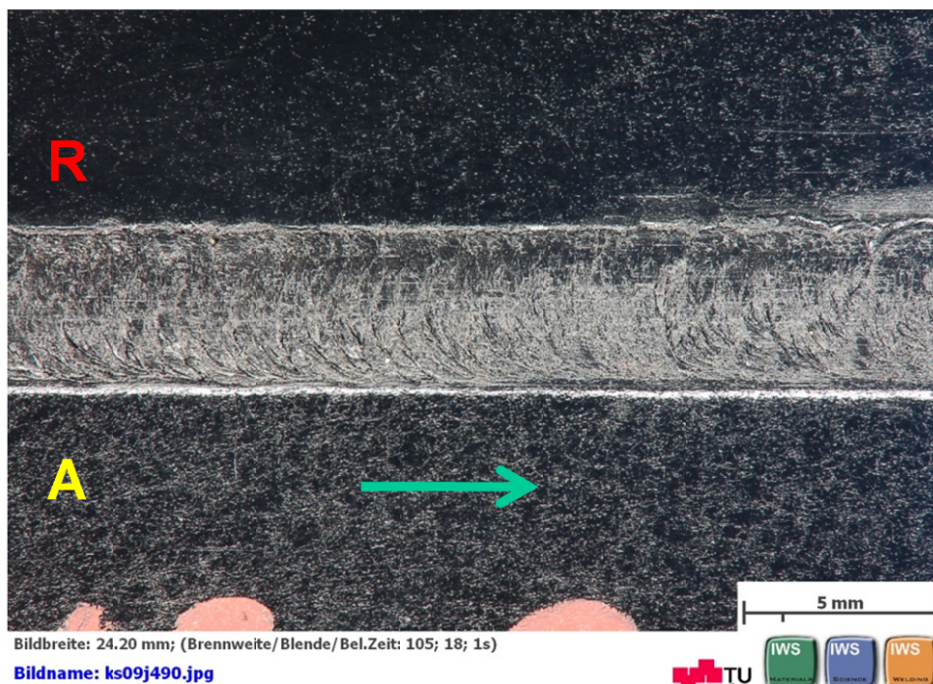


Abbildung 132: Nahtausbildung bei Probe KS_0910_S004: keine Schweißnahtunterwölbung, Schuhtemperatur 120°C, Drehzahl 2500 (Gegenlauf), Vorschub 50 mm/min, Pin 2

Abbildung 133 gibt einen genaueren Überblick über die erreichten Zugfestigkeiten in Abhängigkeit von den variierten Parametern. Es wurden jeweils zwei Zugproben pro Schweißnaht entnommen. Diese Werte wurden mit denen des unverstärkten und konditionierten Ultramid B3K verglichen, welches eine Zugfestigkeit von 40 N/mm² aufweist (getrocknet: 85 N/mm²). Es zeigte sich, dass mit den Parametern der Schweißungen KS_0910_S002 und S004 Festigkeitswerte höher als der unverstärkte Grundwerkstoff erreicht wurden.

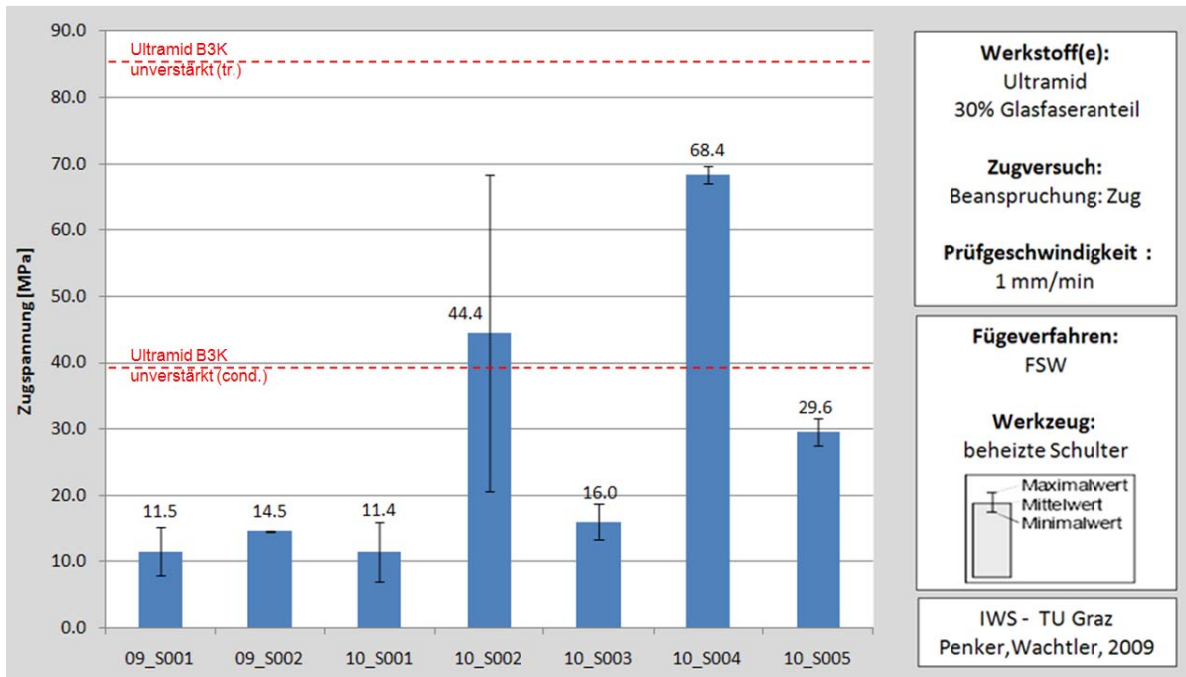


Abbildung 133: Zugversuch Ultramid: Vergleich mit unverstärktem Ultramid B3K

Interessant dabei ist die Betrachtung der Versuchsreihe KS_0910_S002 (Abbildung 133). Hier wurde bei der Zugprobe in Schweißnahtmitte eine Festigkeit von 20,6 N/mm² erreicht, die Zugprobe am Schweißnahtende brach erst bei 68.3 N/mm².

Es wird postuliert, dass die hohe Drehzahl mit zunehmender Schweißnahtlänge zu einer Erhöhung der Temperatur führt und so ein ähnlicher Zustand wie in KS_0910_S004 erreicht wird. Dies wird bei einem Vergleich der Makroschliffe der Rührzonen von KS_0910_S002 (nach einer geschweißten Länge von 35 mm bzw. von 75 mm) und KS_0910_S004 (nach einer geschweißten Länge von 35 mm) deutlich. Beide zeigen eine gute Anbindung an der Advancing Side, und kaum Poren und Bindefehler an der Retreating Side. Es kommt kaum zu Schweißnahtunterwölbung (Abbildung 134).

Probe	R _m [N/mm ²]	% GW	Temp ³⁵ [°C]	Drehzahl [U/min]
KS_0909_S001	11,5	8,7%	80	1500
KS_0909_S002	14,5	11,0%	100	2500
KS_0910_S001	11,4	8,6%	100	1500
KS_0910_S002	44,4	33,7%	100	3200
KS_0910_S003	16,0	12,1%	120	1500
KS_0910_S004	68,4	51,8%	120	2500
KS_0910_S005	29,6	22,4%	120	3200

Tabelle 46: Ergebnisse und Parameter der Versuchsreihen KS_0909 und KS_0910 für Ultramid

³⁵ Vorwärmtemperatur der beheizten Schulter

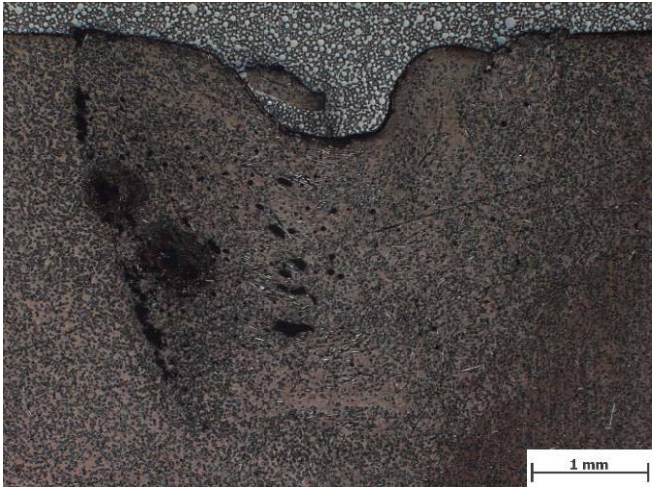
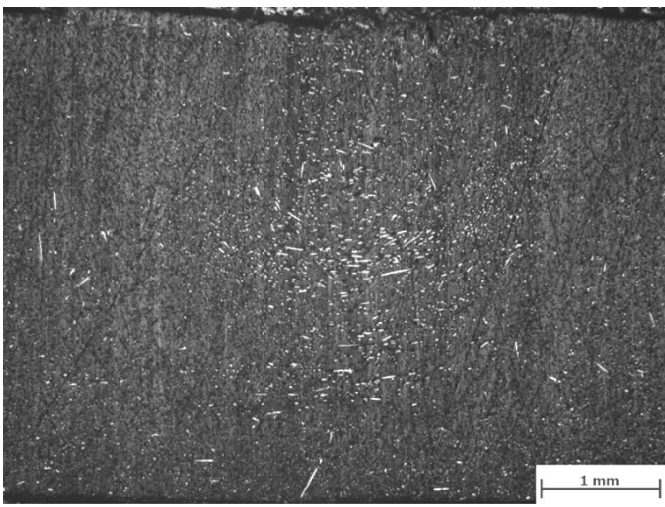
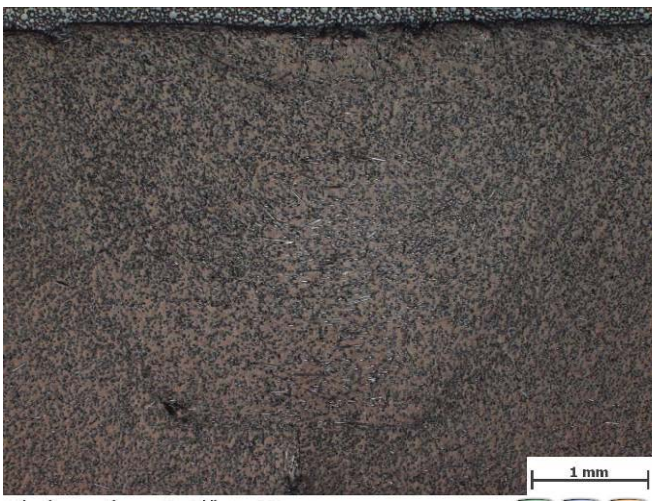
<p>KS_0910 S002</p> <p>Schweißnahtmitte (ca. 35 mm)</p>		<p>geringe Festigkeit</p>
<p>Schweißnahtende (ca. 75 mm)</p>		<p>vergleichbar hohe Festigkeits- werte</p>
<p>KS_0910 S004</p> <p>Schweißnahtmitte (ca. 35 mm)</p>		<p>vergleichbar hohe Festigkeits- werte</p>

Abbildung 134: Vergleich der Makroschliffe von Ultramid mit geringer Festigkeit (oben, S002 nach 35mm Nahtlänge) mit jenen hoher Festigkeit (mitte und unten, S002 nach 75mm Nahtlänge und S004 nach 35mm Nahtlänge)

Die Verteilung der Bereiche hoher Zugspannungen, aufgetragen über Drehzahl und Temperatur, lässt sich im Konturdiagramm der Versuche KS_0909 und KS_0910 übersichtlich darstellen (Abbildung 135; die gemessenen Werte sind als schwarze Datenpunkte dargestellt). Das Diagramm

wurde aus den Daten der Zugversuche (Zugfestigkeit R_m), den Schweißparametern Drehzahl und der Vorwärmtemperatur der stehenden Schulter mittels Programm Minitab[97] erstellt. Anhand von Minitab erstellten Grafiken ist es möglich, Zusammenhänge zwischen den Variablen zu bewerten. Erkenntnisse lassen sich zusammenzufassen und die Interpretation statistischer Ergebnisse wird vereinfacht [97 S. 2-1].

Leider wurden keine Versuche mit höherer Temperatur durchgeführt, um festzustellen, wie sich das Konturdiagramm in einem höheren Temperaturbereich fortsetzt.

Konturdiagramm von Festigkeit vs Drehzahl; Temperatur

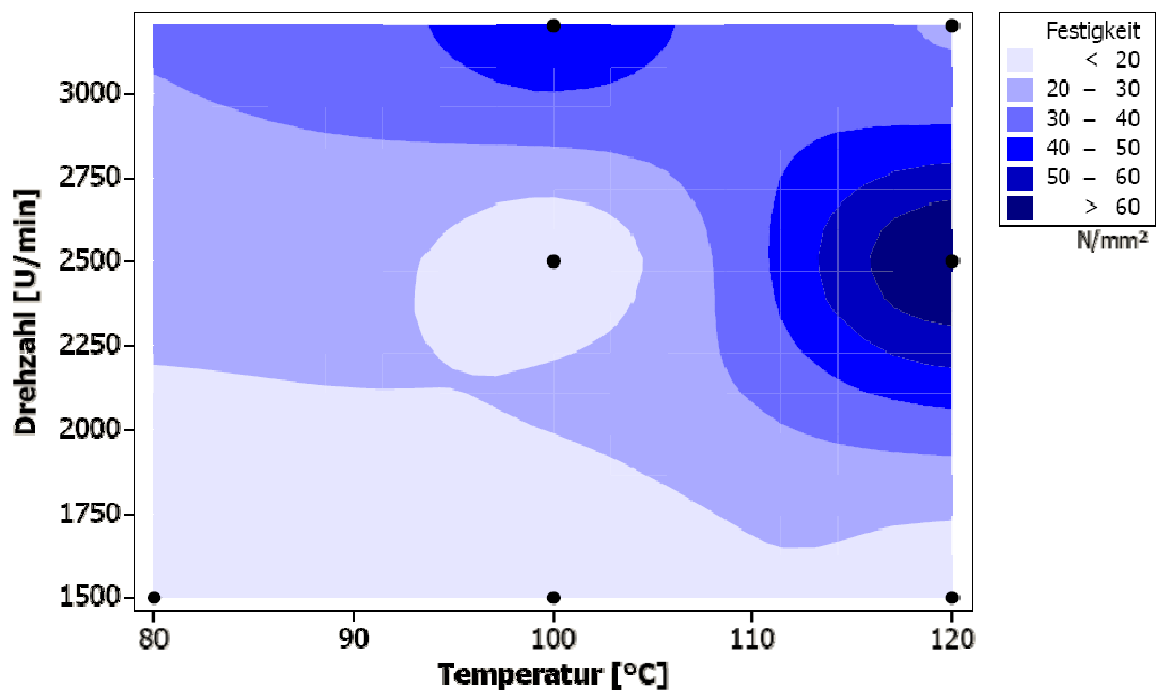


Abbildung 135: Zugfestigkeit vs. Drehzahl, Temperatur; Ultramid (Software Minitab)

Der Bereich höchster Zugspannungen befindet sich in einem schmal abgegrenzten Bereich bei einer Temperatur von 120°C. Auch bei niedrigeren Temperaturen lassen sich hohe Festigkeiten erzielen, allerdings nur in sehr hohen Drehzahlbereichen.

In Abbildung 136 ist die Nahtausbildung bei verschiedenen Drehzahlen und Temperaturen von Ultramid dargestellt.

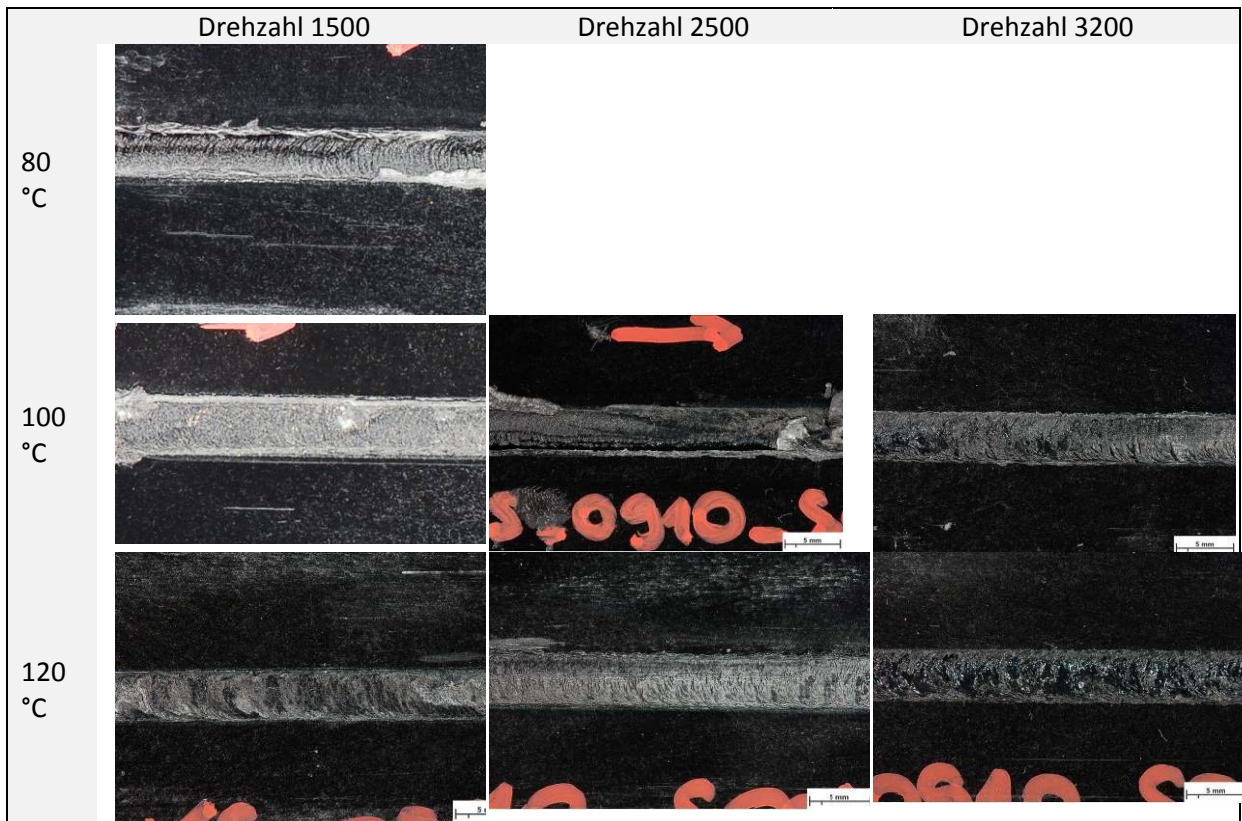


Abbildung 136: Nahtausbildung bei verschiedenen Drehzahlen und Temperaturen;

Abbildung 137 zeigt einen Überblick über die Schweißnaht-Optik bei verschiedenen Drehzahlen und Schweißschuhtemperaturen. Die höchste Zugfestigkeit wurde bei bei 2500 U/min und 120°C erreicht. In den Abbildungen fehlt teilweise der untere, nicht durchgeschweißte Bereich. Da dieser aufgrund der Kerbwirkung die Schweißnahtfestigkeit noch verschlechtert, wurde die Fläche des unteren, unverschweißten Bereichs bei der Berechnung der Schweißnahtfestigkeit nicht berücksichtigt.

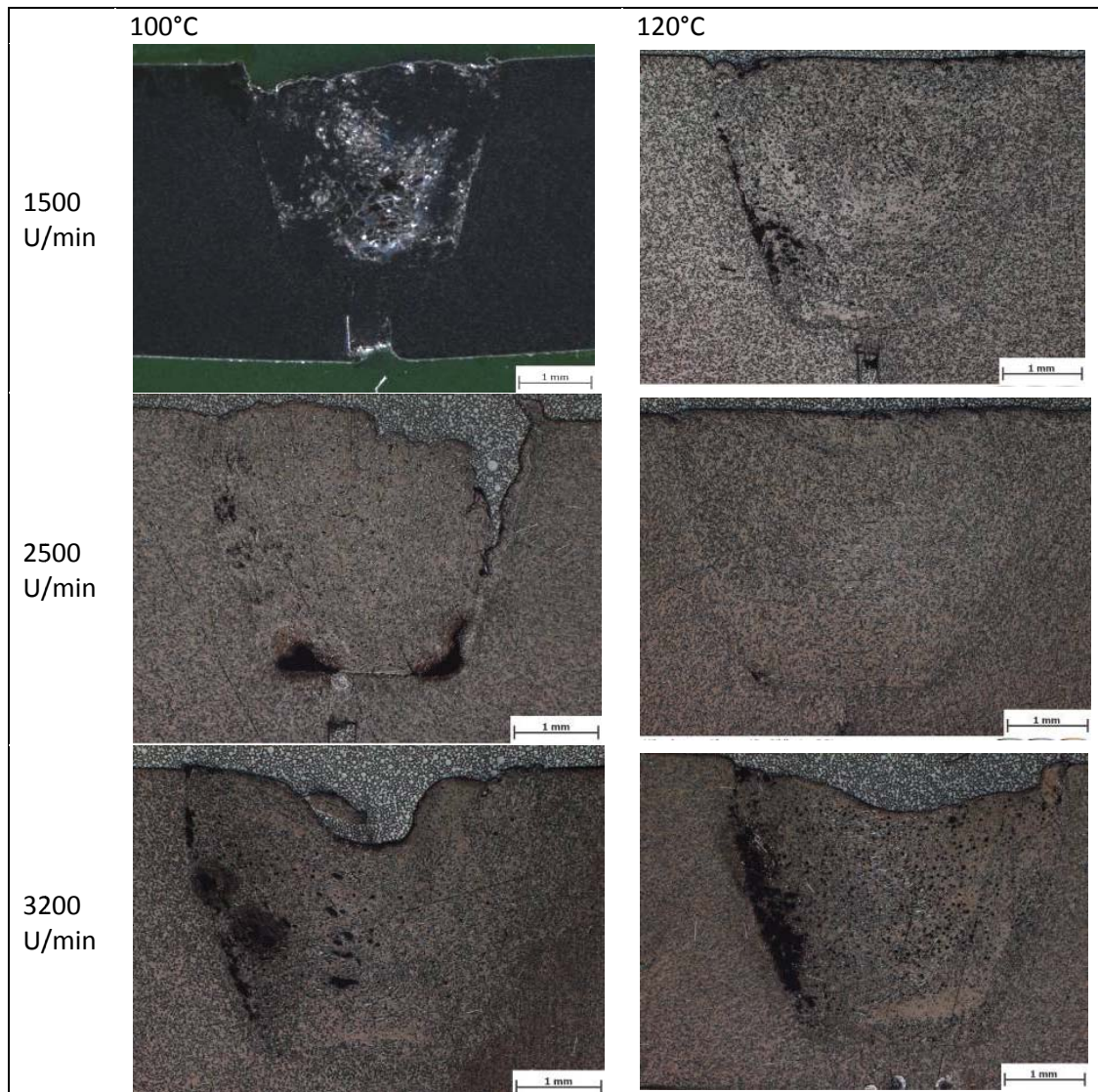


Abbildung 137: Schweißnaht-Optik bei verschiedenen Drehzahlen und Schweißschuhtemperaturen

5.2.4 Ultrason

Ultrason wurde mittels der Werkzeuge 2 und 3 verschweißt (Kapitel 4.3.1). Die Parameter waren folgende:

- Werkzeugwinkel: 2.5°
- Drehzahl 3200/2500/1800 U/min³⁶
- Vorschub: 50 mm/min
- Pineindringtiefe: 3,3mm
- Temperatur Heizplatte: 90°C
- Heißluftfön höchste Stufe
- Die mittels Thermoelement gemessene Maximaltemperatur war 337°C

Wie in Abbildung 138 zu erkennen ist, war die Temperatur des Heißluftföns zu hoch eingestellt. Der Werkstoff begann an der Oberfläche Blasen zu werfen und sich zu verfärben. Im Schliffbild ist diese Blasenbildung zu erkennen. Während sich mit Werkzeug 2 sich eine homogene Rührzone mit einigen großen Poren ausbildete, beeinflusste Werkzeug 3 den Materialfluss in der Fügezone nachteilig. Das

³⁶ Die Drehzahl wurde während der Schweißung kontinuierlich verringert

Material wurde an der Retreating Side aus der Fügezone hinausbefördert und zeigte an der Advancing Side eine sehr schlechte Anbindung, was zu einer deutlichen Verminderung des durchgeschweißten Querschnitts führte.

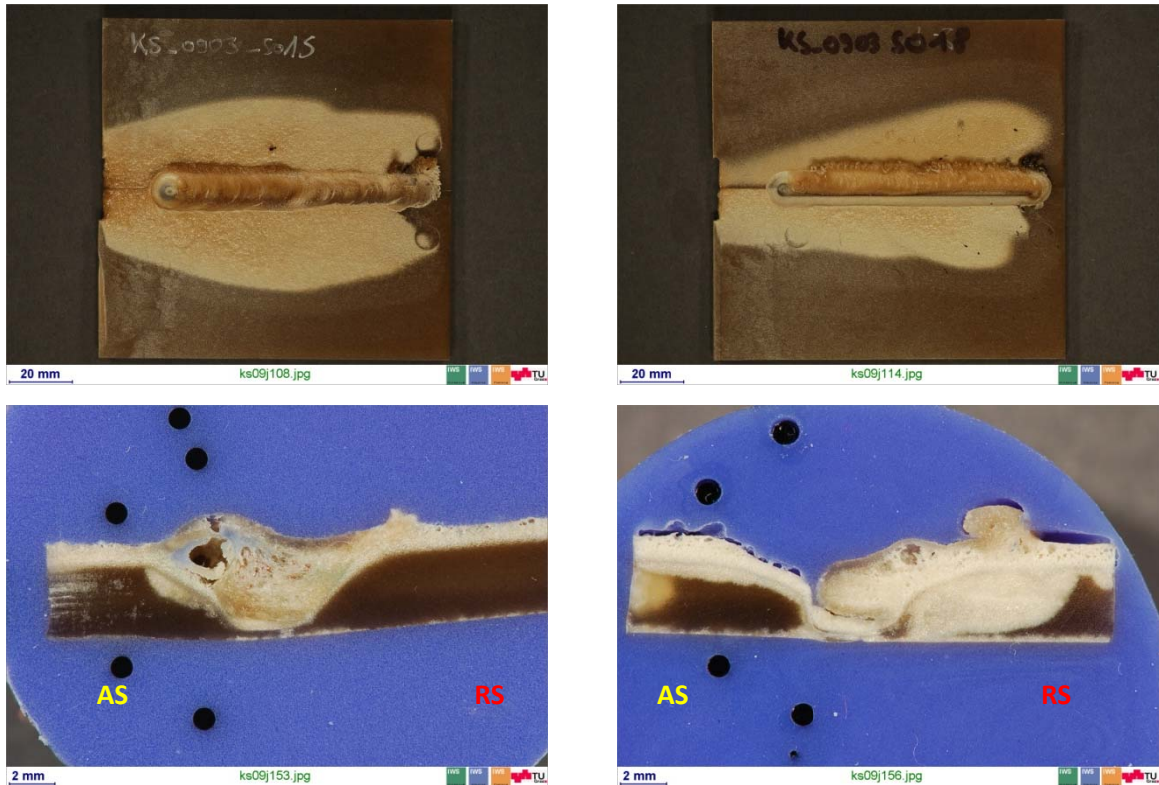


Abbildung 138: FSW von PES; Werkzeug 2 (links) und Werkzeug 3 (rechts)

Die erreichten Festigkeiten lagen bei $19,8 \text{ N/mm}^2$ (Werkzeug 2) bezogen auf eine Dicke von 4mm bzw. bei 7 N/mm^2 bezogen auf eine durchgeschweißte Dicke von 1.5 mm (Werkzeug 3). Abbildung 139 verdeutlicht, dass mittels Werkzeug 2 – im Vergleich zu Werkzeug 3 - eine beinahe dreifache Festigkeit der Verbindung erreicht wurde. Bezogen auf den Grundwerkstoff wurden Schweißfaktoren von 0,162 (WKZ 2) bzw. 0,057 (WKZ 3) erreicht.

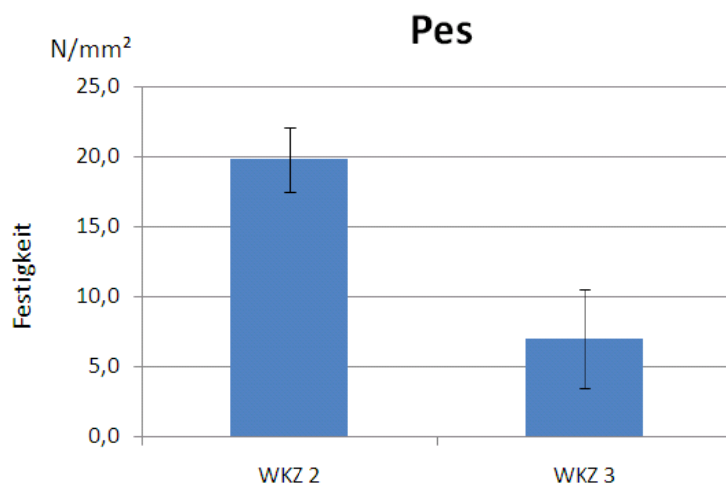


Abbildung 139: Erreichte Schweißnahtfestigkeiten PES: Vergleich von Werkzeug 2 mit Werkzeug 3

Diese Versuche waren die einzigen, welche mit PES durchgeführt wurden. Die auf Anhieb erreichten hohen Festigkeiten bei Verwendung von WKZ 2 lassen aber vermuten, dass mithilfe einer Parameterstudie auch mit einem konventionellen FSW-Werkzeug mit Schulter höhere Festigkeiten erreich-

bar wären. Die optisch ansprechende Nahtoberfläche bei Werkzeug 2 und die teilweise sehr homogene Rührzone mit einer guten Anbindung an der Retreating Side zeigen dies sehr deutlich.

5.2.5 Dissimilar Welding von Ultramid und Ultradur

Die Werkstoffe Ultramid und Ultradur wurden zweimal miteinander verschweißt; zunächst mit dem konventionellen FSW-Werkzeug 2 (Kapitel 4.3.1) und dann mit dem Prototyp der Heizplatte (umgebautes Bügeleisen, Kapitel 4.3.2), jedoch bei Raumtemperatur. Die Parameter der Versuche sind in Tabelle 47 angeführt.

Proben_Nr.	WKZ	Winkel [°]	Drehzahl [U/min]	Eindringtiefe [mm]	Temp. Platte [°C]	Temp. Oberfläche [°C]	Temp. Ofen [°C]	Anmerkung
0906_S008	2	2,8	2800	3,2	126	177	240	Heißluftfön
0907_S002	Bgl/St	0	2500	2,7	/	/	/	Raumtemp.

Tabelle 47: Parameter für das Verschweißen von Ultramid und Ultradur; v= 50mm/min

Die Unterschiede zwischen den beiden Versuchen sind bereits bei Betrachtung der Oberflächen der beiden Schweißnähte zu erkennen (Abbildung 140). Während KS_0906_S008 bei hohen Temperaturen verschweißt wurde, wurde KS_0907_S002 ohne zusätzliche Wärmeeinbringung verschweißt. KS_0906_S008 verschmiert beim Verrühren, während KS_0907_S002 aufgrund der niedrigen Temperaturen schlecht fließt.



Abbildung 140: Verschweißen Ultramid und Ultradur: Werkzeug 2 (links) und stehende Schulter mit Stahlstift (rechts)

Für die Versuchsreihe KS_0907 wurde ein Stahlstift konstruiert, mit einer konischen Pinspitze mit 5.2mm Durchmesser (Abbildung 141).



Abbildung 141: Werkzeug für Versuchsreihe KS_0907 (nach Pinbruch)

Für die beiden Schweißungen konnten keine Zugfestigkeitswerte ermittelt werden, da die Proben bereits bei der Einspannung in die Zugprüfmaschine gebrochen sind. Es konnte aber aus KS_0907_S002 ein plastographischer Schliff gewonnen werden, anhand dessen gut der Materialfluss beim FSW von Polymeren dargestellt werden kann (Abbildung 142).

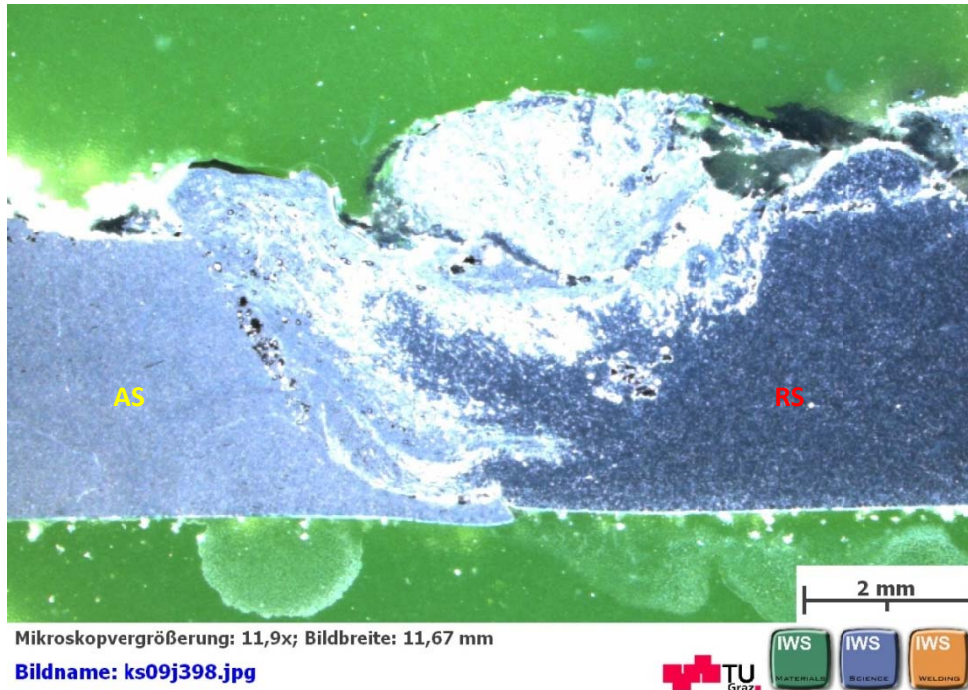


Abbildung 142: Makrobild KS_0907_S002; Advancing Side-Ultramid (links); Retreating Side-Ultramid (rechts)

Die Mikroskopaufnahme der Rührzone (Abbildung 143) zeigt das Ineinanderfließen der beiden Werkstoffe. An der Advancing und an der Retreating Side treten einige Porennester auf; die Anbindung an der Bottom Disturbance Zone ist teilweise nicht gegeben.

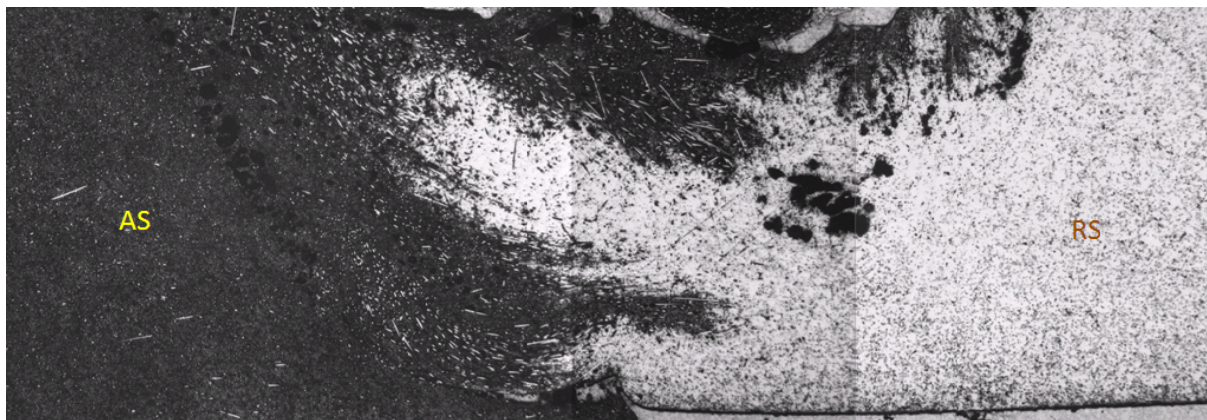


Abbildung 143: Mikroskopaufnahme der Rührzone von KS_0907_S002

Die Rührzone selbst besitzt ein relativ homogenes Materialgefüge, mit einigen wenigen Poren (Abbildung 144). Durch die Erwärmung von unten durch die Heizplatte fließt der Werkstoff auch in der Wurzel gut ineinander und zeigt eine gute Anbindung.

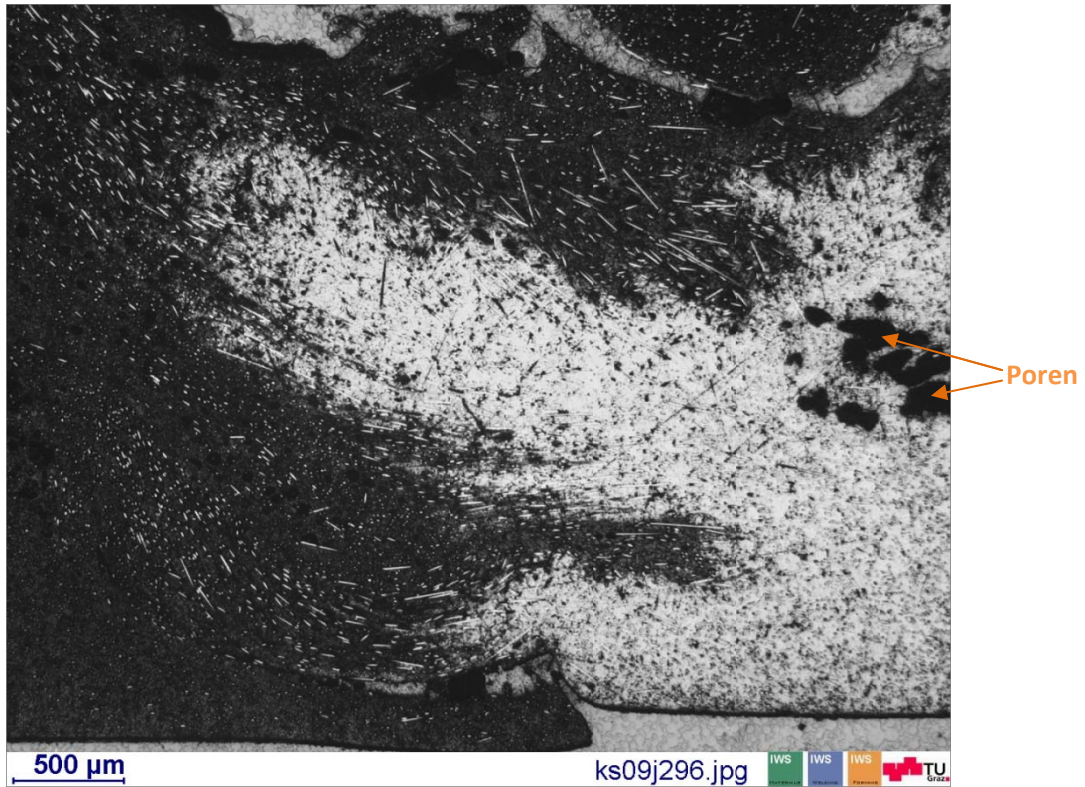


Abbildung 144: Detail aus Abbildung 143: Rührzone

5.2.6 Dissimilar Welding von Ultradur und Ultrason

Die Werkstoffe Ultradur und Ultrason wurden mittels des Werkzeugs mit der beheizten, stehenden Schulter verschweißt (Abbildung 145).

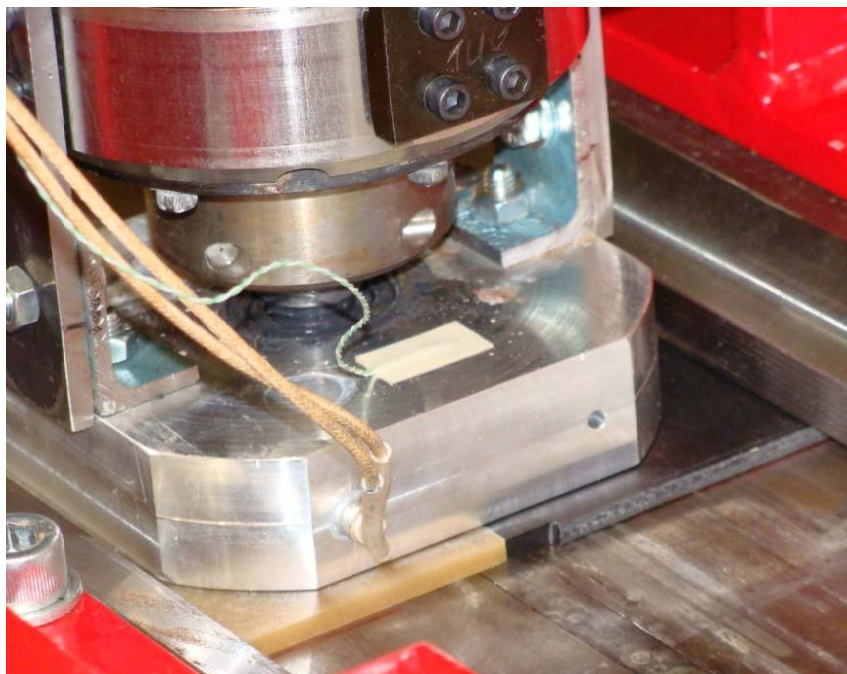


Abbildung 145: FSW von Ultradur und Ultrason

Es wurde nur ein Versuch durchgeführt mit den in Tabelle 48 angeführten Parametern.

Proben_Nr.	WKZ	Winkel [°]	Drehzahl [U/min]	Vorschub [mm/min]	Eindringtiefe [mm]	Temp [°C]
KS_0908_S007	Heizpatrone & Pin 1	0	-2500	50	3	120

Tabelle 48: Parameter für das Dissimilar FSW von PES und PBT

Obwohl es sich nur um einen Vorversuch mit der nicht optimierten Pingeometrie 1 handelte, konnte eine gute Nahtausbildung erreicht werden (Abbildung 146).



Abbildung 146: Dissimilar Welding von Ultradur und Ultrason-Schweißnaht

Das Makroschliffbild zeigt die gute Durchmischung der beiden Fügepartner (Abbildung 147). Ultrason zeigt weiß verfärbte Bereiche, die auf eine eventuelle thermische Schädigung des Werkstoffs hinweisen könnten. Dies dürfte bei einer Schmelztemperatur von 120°C aber nicht der Fall sein, da Ultrason laut BASF-Datenblatt eine Formbeständigkeitstemperatur (1.8 N/mm²) von 220°C besitzt.

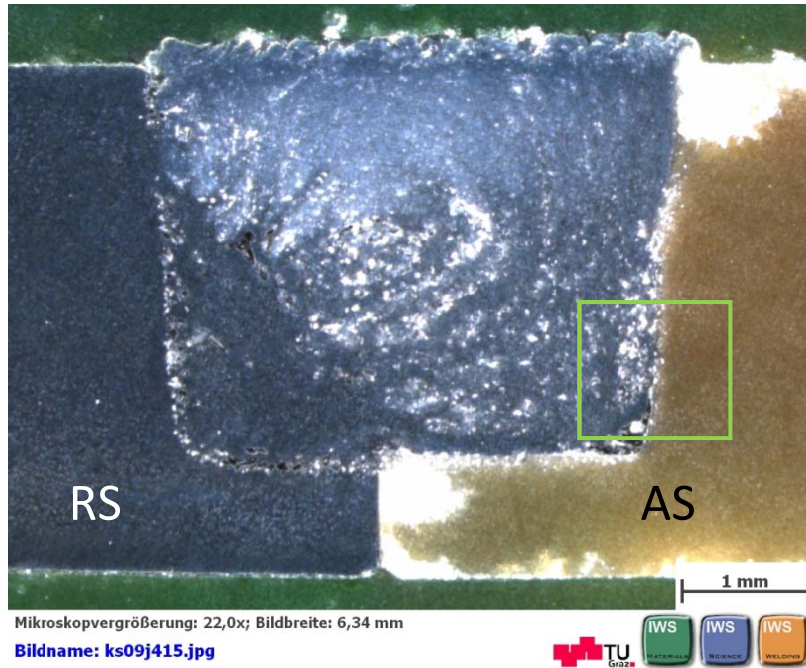


Abbildung 147: Makroschliffbild Dissimilar FSW von Ultradur und Ultrason (Detail)

Im Zugversuch wurde aus drei Proben der Mittelwert von 12.3 N/mm^2 (11% der Zugfestigkeit von PBT) ermittelt. Die Proben brachen alle auf der Advancing Side. Trotz der guten Durchmischung der Fügepartner kam es zu einer schlechten Anbindung der beiden Werkstoffe (Abbildung 148).

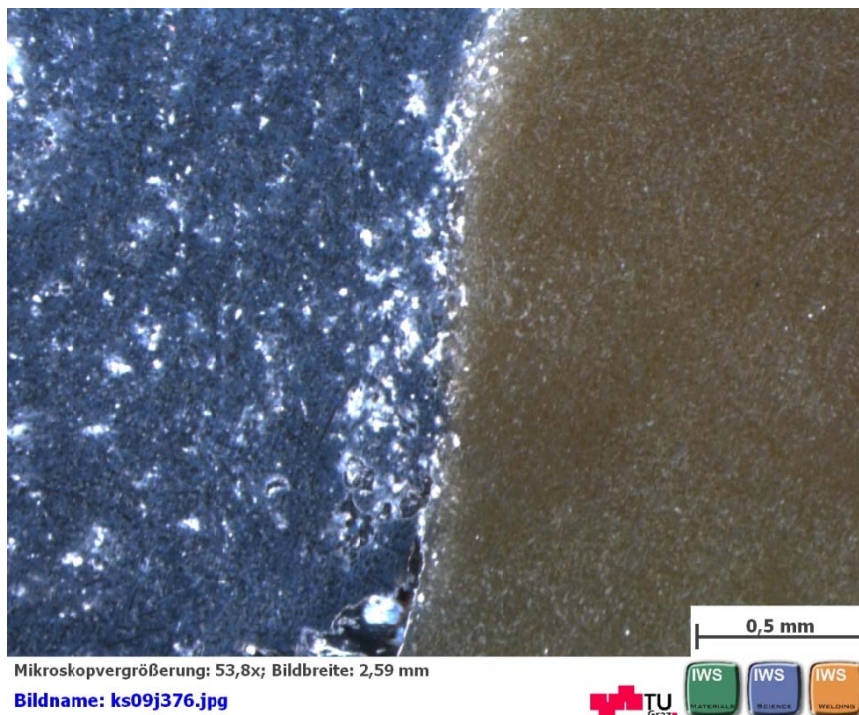


Abbildung 148: Detail aus Abbildung 147: Anbindung der Advancing Side an den Grundwerkstoff Ultrason

5.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Tabelle 49 zeigt eine Übersicht über alle durchgeführten Versuche und die dabei erreichten Festigkeiten.

Werkstoff	GW [N/mm ²]	WKZ 1 R _m	WKZ 2 R _m	WKZ 3 R _m	stSchulter ³⁷ R _m	be.Schulter ³⁸ R _m
Ultramid (PA6)	125,9 N/mm ²	11.1 N/mm ² (8.6%)	28,9 N/mm ² (22,9%)	16,9 N/mm ² (13,4%)	stSchAlu 15 N/mm ² (12%)	Pin 2 68,4 N/mm ² (51,8%)
Ultradur (PBT)	107,6 N/mm ²		7,4 N/mm ² (6,9%)	10 N/mm ² (9,3%)	stSchAlu 8,9 N/mm ² (8,2%)	Pin 1 18,2 N/mm ² (16,9%)
Ultrason (PES)	122,5 N/mm ²		WKZ 2 19.8 N/mm ² (16,2%)	WKZ 3 7 N/mm ² (5,7 %)		
Ultradur & Ultramid	122,5 N/mm ²		WKZ 2 -		Bgl/St -	
Ultradur & Ultrason	107,6 N/mm ²					Pin 1 12.3 N/mm ² (11%)

Tabelle 49: Durchgeführte Versuche mit verschiedenen Werkzeugkonzepten und erreichte Festigkeiten der Verbindungen

Tabelle 50 zeigt die maximal erreichten Schweißfaktoren mittels konventioneller Rührreißschweißwerkzeuge; hierbei wurden die Werkstoffe nur artgleich verschweißt. Bei Ultramid konnte ein Schweißfaktor von 0,23 werden; bei Ultrason wurden nach nur zwei Versuchen Werte von 0,16 und bei Ultradur von 0,09 erreicht.

	Ultramid (#)	Ultradur (#)	Ultrason (#)
Ultramid	22,9% (23)		
Ultradur		9,3% (5)	
Ultrason			16,2% (2)

Tabelle 50: Schweißfaktoren mittels konventioneller FSW-Werkzeuge/ Anzahl der durchgeführten Versuche

Tabelle 50 gibt einen Überblick über die maximal erreichten Schweißfaktoren mittels stehender, beheizter Schulter. Bei der artgleichen FSW-Schweißung von Ultramid wurde ein Schweißfaktor von 0,52 erreicht, was mehr als eine Verdoppelung im Vergleich zu den Versuchen mit konventionellen FSW-Werkzeugen (0,23) darstellt. Auch bei Ultradur konnte eine Verdoppelung der Schweißfaktoren erreicht werden. Bei der Verbindung von Ultradur mit Ultrason konnte in einem einzigen Versuch eine Schweißnahtfestigkeit von 11% des Grundwerkstoffes erreicht werden.

	Ultramid (#)	Ultradur (#)	Ultrason (#)
Ultramid	51,8% (7)		
Ultradur		16,9% (12)	11% (1)

Tabelle 51: Schweißfaktoren mittels Werkzeug mit stehender Schulter/ Anzahl der durchgeführten Versuche

³⁷ Stehende Schulter; stehende Schulter aus Aluminium (stSchAlu) oder umgebautes Bügeleisen mit Stahlstift (Bgl/St), Kapitel 4.3.2

³⁸ Stehende, beheizte Schulter, Kapitel 4.3.2

5.4 Durchgeführte zusätzliche Untersuchungen

5.4.1 Vier-Punkt-Biegeversuch

Der Biegeversuch wurde am IWS an einer Vorrichtung für den Vier-Punkt-Biegeversuch durchgeführt (Abbildung 149). Diese wurde in die Zugprüfmaschine eingebaut. Die Bruchkraft wurde an der Prüfmaschine gemessen.

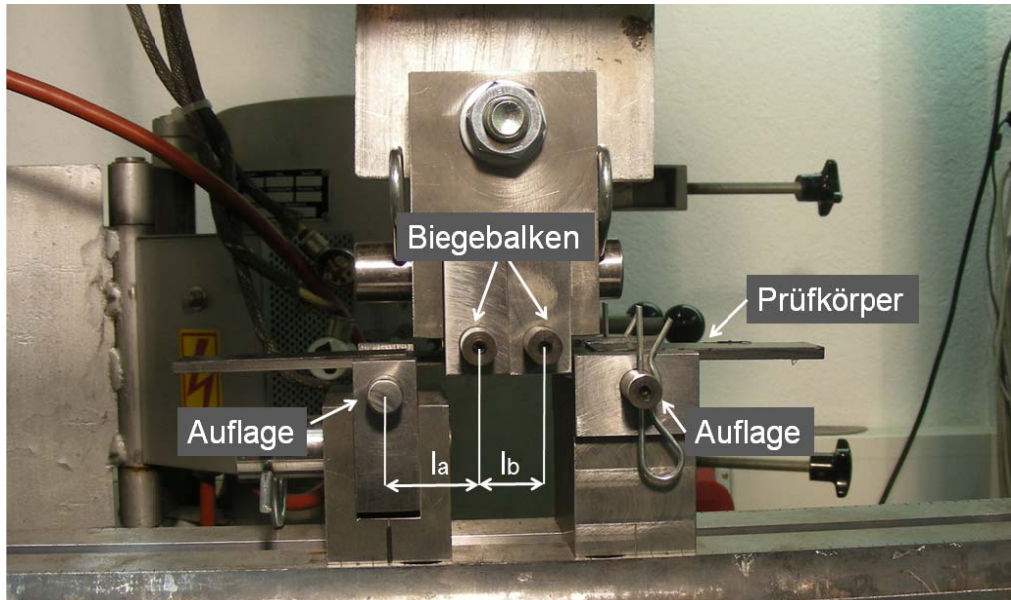


Abbildung 149: Versuchsaufbau Vierpunktbiegeversuch IWS

Der Biegeversuch wurde an zwei Proben aus Ultramid durchgeführt, einmal am Grundwerkstoff und einmal an einer verschweißten Probe. Letztere wurde mit den optimierten Parametern (Schuhtemperatur 120°C, Vorschub: 50 mm/min, Drehzahl 2500 U/min, s. Tabelle 46, Kapitel 5.2.3.2) für Ultramid verschweißt.



Abbildung 150: Entnahme der Biegeprobe aus der verschweißten Platte (links) abgefräste Probe (rechts)

Vor dem Biegeversuch wurden die Schweißwülste auf der den Biegestempel berührenden Seite abgetragen.

Prüfverfahren	Prüfstück [mm]			Abstand zw. den Rollenachsen unten Da	Abstand zw. den Rollenachsen oben l
	a (Nennmaß)	b	L		
Oberseitiger/ Wurzelseitiger Biegeversuch	$3 \leq a < 5$	20	150	80	20

Tabelle 52: Maße der Proben und Prüfanordnung nach DIN EN ISO 12814-1 [98]

Der Biegeversuch selbst wird unter genau festgelegten Temperaturbedingungen durchgeführt. So müssen etwa die Proben auf eine Temperatur von $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ konditioniert werden. Die Prüfgeschwindigkeit sollte so gewählt werden, dass die Prüfung nach etwa einer Minute beendet ist. Für gewöhnlich werden Geschwindigkeiten des Biegestempels von 10-50 mm/min gewählt [92]. Der Versuch am IWS wurde bei einer Geschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt. Für die Ermittlung der Biegewerte wurden die folgenden Formeln verwendet:

Formel 4: Biegefestigkeit [90 S. 154]
$$\sigma_{fm} = \frac{3F_{max}L}{2bh^2}$$

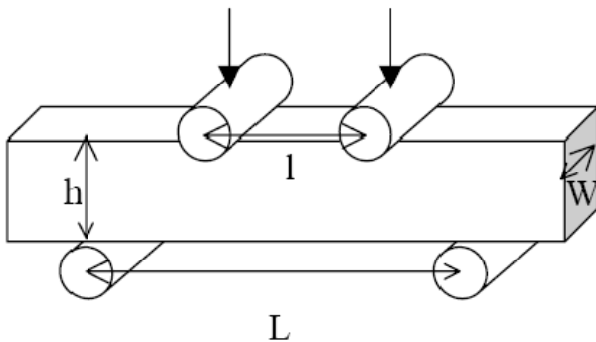


Abbildung 151: Vierpunktbiegeversuch [99]

Formel 5: Biegespannung beim Bruch, speziell Vierpunktbiegeversuch [99]
$$\sigma_B = \frac{3 \cdot F \cdot (L - l)}{2 \cdot w \cdot h^2}$$

Da bei beiden Versuchskörpern der Bruch während des Versuchs auftrat, entspricht der Wert der Biegefestigkeit jenem der Biegespannung beim Bruch.

Laut BASF liegt die Biegefestigkeit für den Grundwerkstoff Ultramid B3WG6 laut DIN EN ISO 178 [91] zwischen 270 N/mm^2 (trocken) und 180 N/mm^2 (luftfeucht).

	maximale Kraft [N]	Länge L [mm]	Länge l [mm]	Breite w [mm]	Höhe h [mm]	σ_B [N/mm ²]
Verschweißte Probe	62	80	20	20	2.7	51,3

Tabelle 53: Berechnung der Biegefestigkeiten Ultradur



Abbildung 152: Biegeversuch Ultramid: gebrochene Probe verschweißter Querschnitt

Die Biegefestigkeit von Ultramid beträgt laut BASF Datenblatt nach ISO 178 180 MPa für die konditionierte Probe. Für die geschweißte Probe wird ein Wert von 51 N/mm² erhalten. Die Biegefestigkeit der geschweißten Probe beträgt 28,3% relativ zum Grundwerkstoff.

5.4.2 Bruchflächenuntersuchung mittels REM

Die Untersuchung der Bruchflächen wurde am Elektronenmikroskop des IWS durchgeführt. Da die untersuchten Polymere nicht elektrisch leitend sind, wurden die Bruchflächen mit einem Gold-Palladium-Target besputtert. Folgende Parameter wurden beim Sputtern eingehalten:

- Schichtdicke: 30nm
- Stromstärke: 50mA
- Sputterzeit: 100sec
- Arbeitsdruck: 1 bar (Argon)

Da die aufgebrauchte Schicht teilweise zu dünn war, wurde nach Betrachtung einiger Bruchflächen ein zweites Mal bei den gleichen Parametern besputtert.

Zunächst wurden die Bruchflächen der Zugproben des Grundwerkstoffs betrachtet, um Bilder zum Vergleich mit den verschweißten Proben zu erhalten. Abbildung 153 zeigt die Bruchfläche von Ultramid.

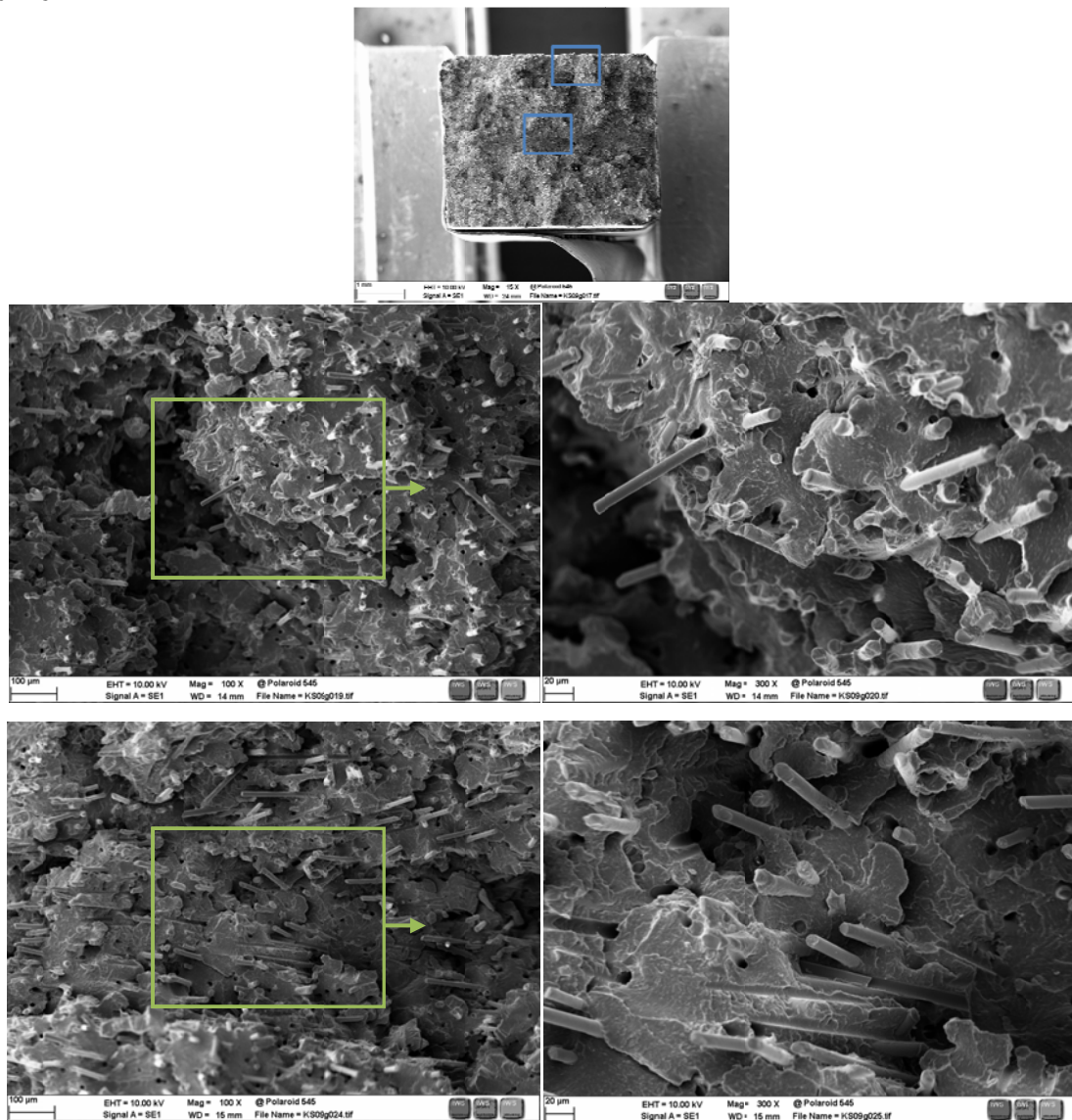


Abbildung 153: REM-Grundmaterial Ultramid: Übersicht (oben), Wandzone (Mitte) und Kernzone (unten)

In der Wandzone verteilen sich die Fasern statistisch, während in der Kernzone die Fasern senkrecht zur Fließrichtung orientiert sind (Kapitel 11.2). Die Fasern sind teilweise hinausgezogen. Dies spricht für eine schlechte Haftwirkung von Matrix und Faser. Doch kann in der Wandzone (Abbildung 153, Mitte) auch Faserbruch beobachtet werden, was für eine gute Adhäsion der Phase spricht.

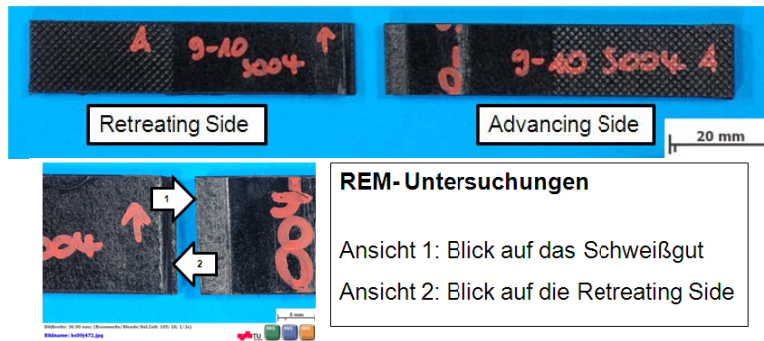


Abbildung 154: Betrachtung der Bruchflächen mittels REM

Die Untersuchung der Bruchfläche wird anhand der FSW-Schweißung KS_0910_S004 dargestellt (Abbildung 154).

Zunächst wurde mit Blick auf die Advancing Side das Schweißgut betrachtet (Ansicht 1 aus Abbildung 154). In der Stirzzone sind die Fasern in Richtung der Drehung des Pins ausgerichtet (Abbildung 155, Mitte). Die Bruchfläche ist im Vergleich zum Grundmaterial relativ glatt, zahlreiche Fasern sind ausgerissen, es sind nur mehr die Abdrücke der Fasern im Matrixmaterial zu sehen

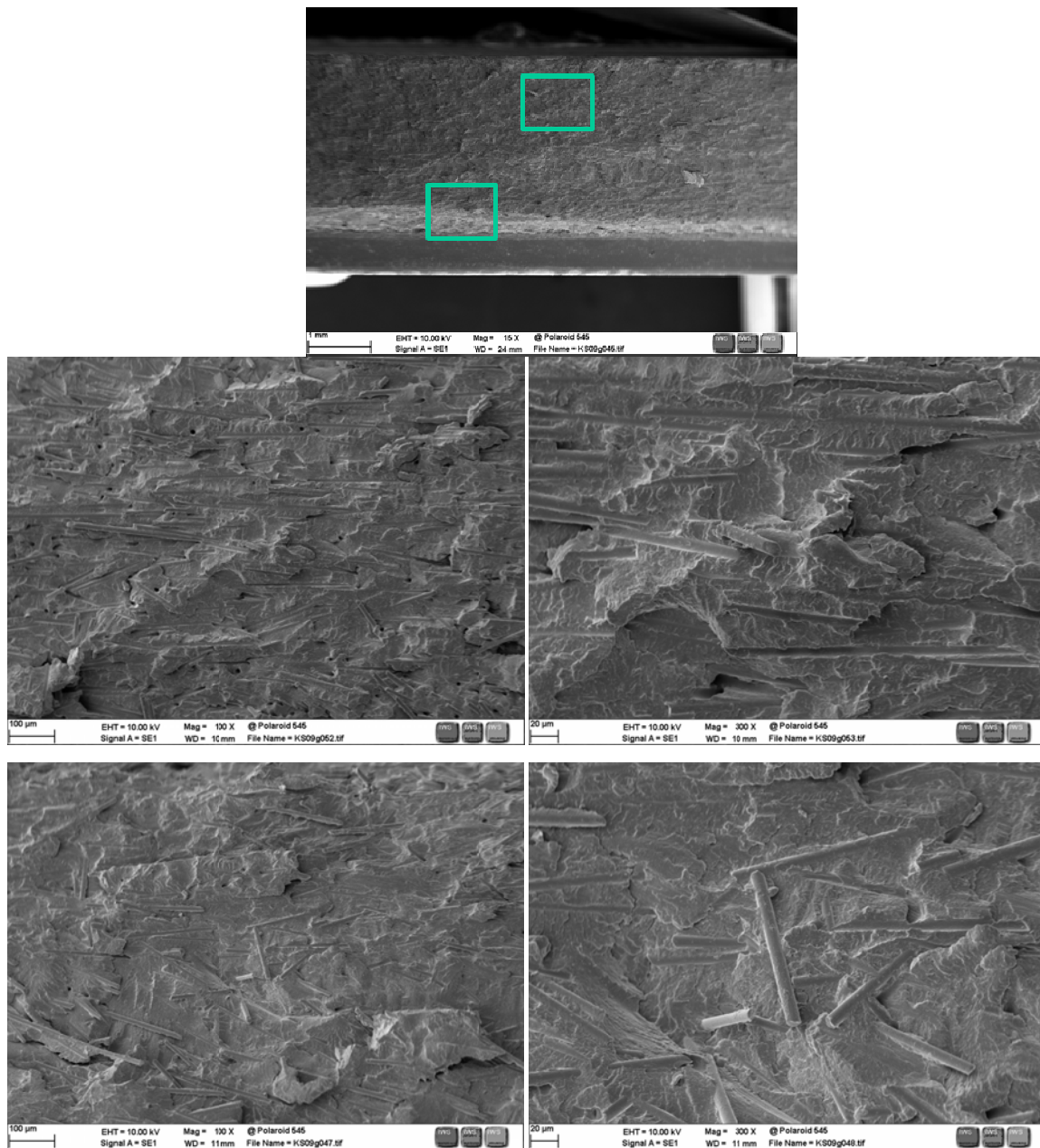


Abbildung 155: REM-Schweißgut Ultramid: Stirzzone (Mitte) und Anbindung Wurzel (unten)

Die Anbindung an Wurzel hingegen zeigt eine regellose Anordnung der Fasern (Abbildung 155, unten). Auch hier zeigt sich eine schlechte Adhäsion der Fasern an die Matrix.

Die Retreating Side wurde mit Blick auf das Grundmaterial betrachtet (Ansicht 2 aus Abbildung 154). Im Gegensatz zu der orientierten Ausrichtung der Fasern in der Stirzone (Abbildung 155, Mitte) liegend die Fasern an der Anbindung zum Grundmaterial regellos angeordnet vor (Abbildung 156, Mitte). Die Bruchfläche ist weniger glatt. Die Fasern quer zur Bruchoberfläche zeigen eine gute Adhäsion an die Matrix. Bei der Betrachtung der Stirzone zeigen sich Abbildung 155 und Abbildung 156 wenig ergänzend, obwohl die Bruchflächen gegenüber liegen.

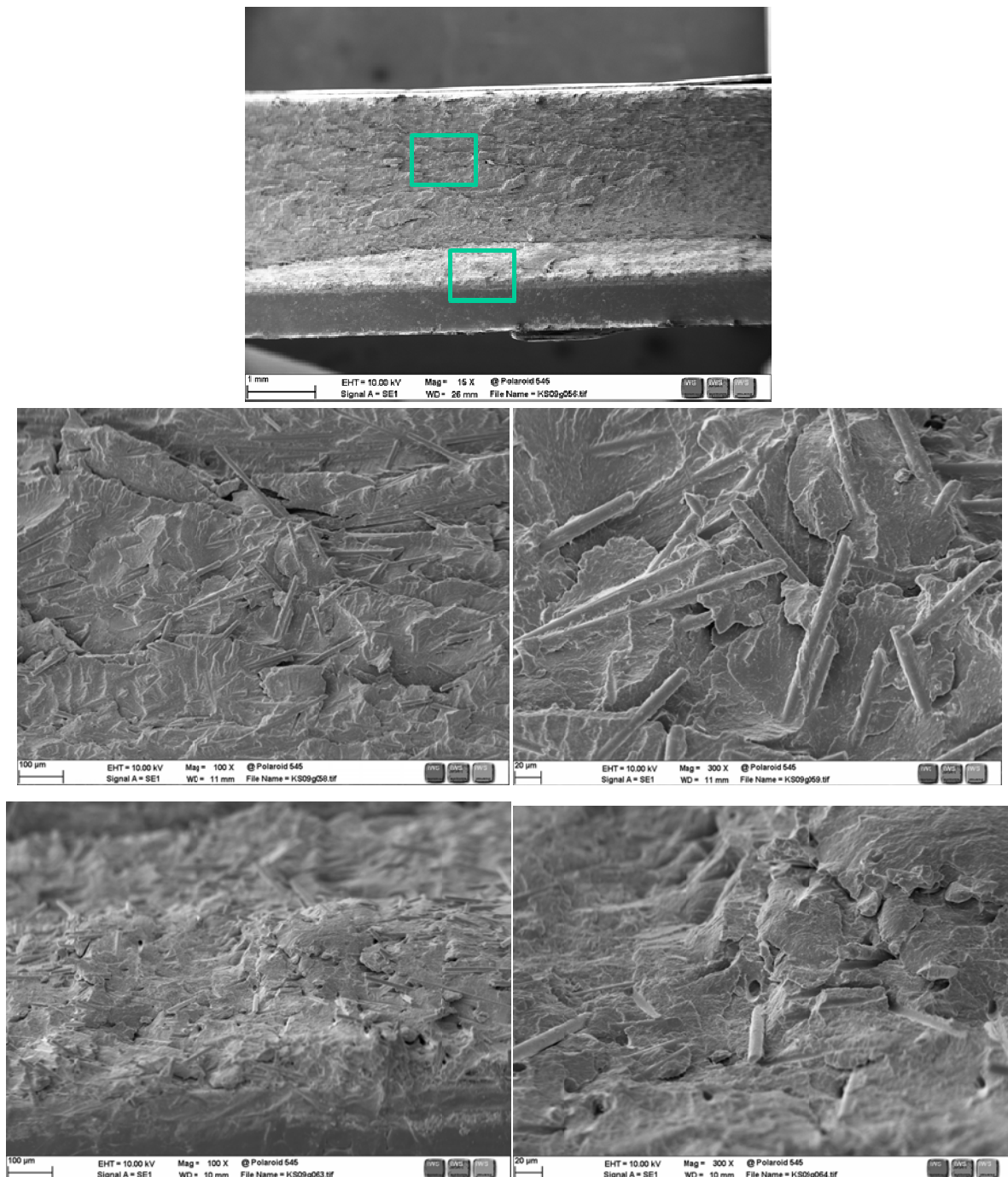


Abbildung 156: REM-Retreating Side-Anbindung Grundmaterial: Stirzone (Mitte) und Anbindung Wurzel (unten)

Beim Friction Stir Welding kann es durch die Krafteinwirkung auf die Fasern während des Rührvorganges zu verstärktem Faserbruch kommen. An der Wurzel liegen im Vergleich zu den anderen Bruchbildern weniger und kürzere Fasern vor (Abbildung 156, unten).

5.4.3 Materialkontrast mittels Back-Scattered Electrons BSC

Um die Entmischung der Fasern in der Fügezone zu zeigen, wurde eine der Proben aus der Versuchsreihe vom Oktober 2009 (KS_0910_S005, Tabelle 46, Kapitel 5.2.3.2) einer Analyse anhand BSC unterzogen.

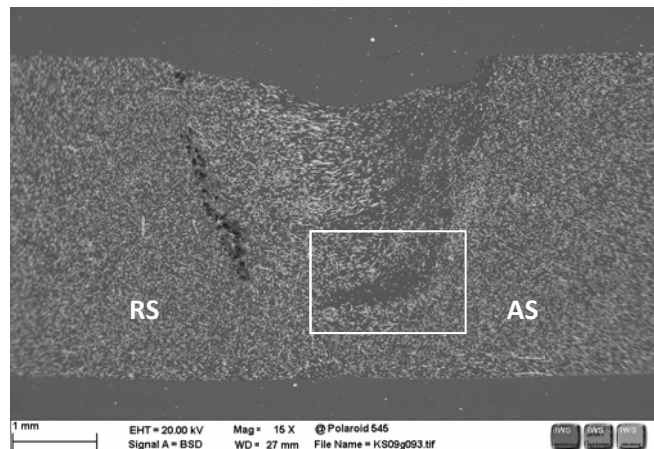


Abbildung 157: Übersichtsbild BSC; Schliff KS_0910_S005

Die weißen Bereiche sind Bereiche hoher Dichte, während die dunkleren Bereiche eine niedrigere Dichte aufweisen. Abbildung 158 zeigt die Zone lokaler Entmischung im Wurzelbereich der Advancing Side.

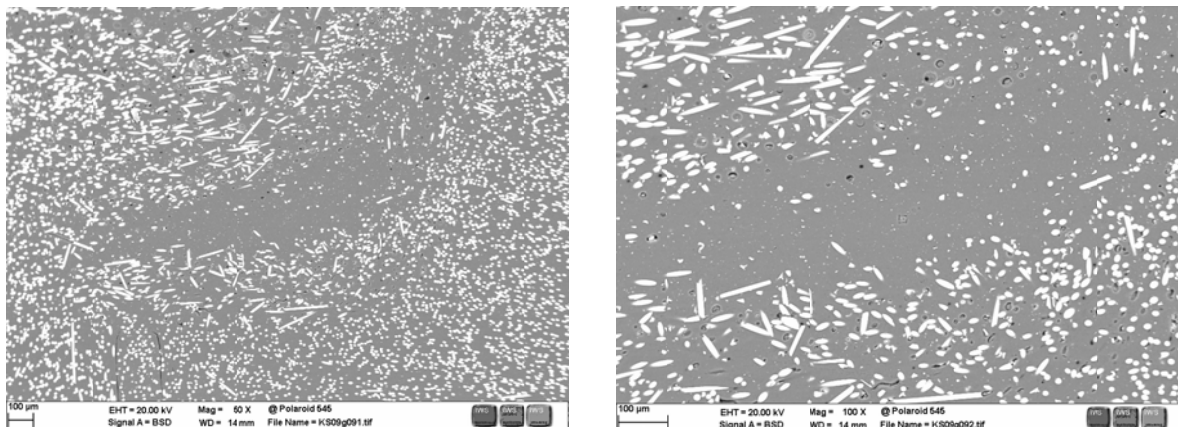


Abbildung 158: BSC-Detail: Zone lokaler Entmischung auf der Advancing Side: 50fache Vergrößerung (links) und 100fache Vergrößerung (rechts)

5.4.4 Elementanalyse mittels EDX

Um die mittels BSC gezeigte Entmischung der Fasern in der Fügezone zu verifizieren, wurde eine Elementanalyse mit Hilfe des EDX-Verfahrens durchgeführt.

Die polierte Probe wurde im Sputter mittels Kohlegarn bedampft. Die lokale Entmischung der Matrix von den Fasern ist bereits im Übersichtsbild des REM ersichtlich (Abbildung 159).

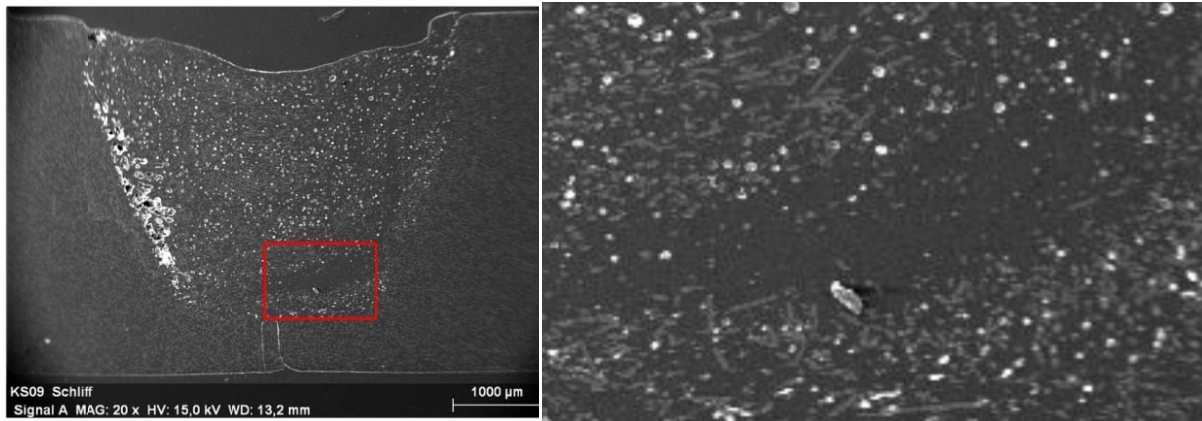


Abbildung 159: Mit Kohlenstoff bedampftes Schlibbild von Polyamid (Probe KS_0910_S005, links), Zone der Entmischung (vergrößert, rechts)

Die Probe wurde mittels Elektronenstrahl abgerastert und die emittierte Röntgenstrahlung detektiert.

Mittels EDX sollte nun festgestellt werden, ob die Fasern sich tatsächlich entmischen, oder ob sie durch die mechanische Einwirkung des FSW-Prozesses zermahlen werden, aber weiterhin in der Matrix enthalten sind. Der Werkstoff Polyamid besteht zum großen Teil aus den Elementen Kohlenstoff (C) und Wasserstoff (H), sowie Sauerstoff (O) und Stickstoff (N)[62 S. 74]. Die Glasfasern hingegen bestehen zum Großteil aus Siliciumdioxid (SiO_2), Calciumoxid (CaO), Korund (Al_2O_3) und Magnesiumoxid (MgO) (Tabelle 11, Kapitel 3.3.5)[100 S. 74].

Die EDX-Analyse ergab ein Impulsspektrum mit den folgenden Elementen: Kohlenstoff (C), Calcium (Ca), Stickstoff (N), Sauerstoff (O), Magnesium (Mg), Aluminium (Al) und Silicium (Si) (Abbildung 160).

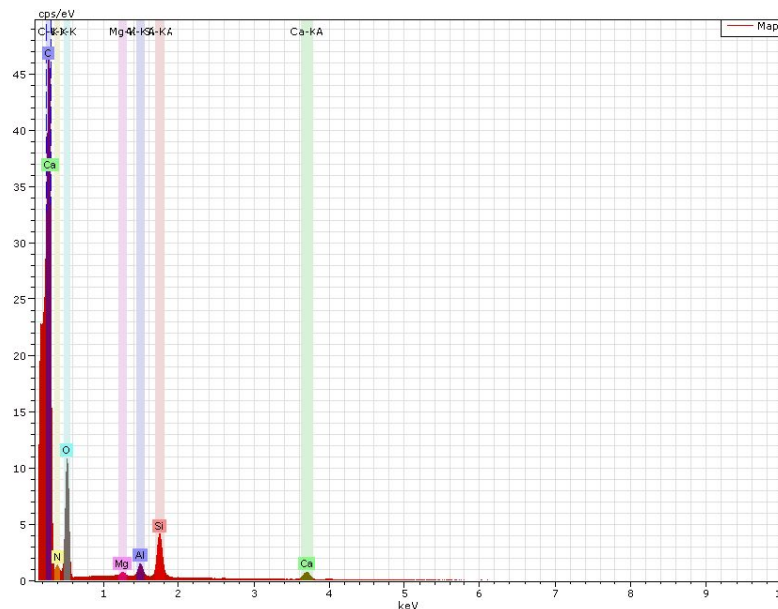


Abbildung 160: Graph der detektierten Röntgenquanten; durch das elementspezifische Energieniveau kann man auf die Zusammensetzung schließen

Das Element Silicium kann zum größten Teil auf die Glasfasern in der polymeren Matrix zurückgeführt werden.

Das EDX-Bild von Silicium zeigt eine deutliche Abnahme des Silicium-Gehalts in genau jenen Bereichen, die auch bei optischer Betrachtung eine Entmischung der Matrix von den Fasern zeigen

(Abbildung 161). Die dunklen Bereiche zeigen Zonen mit geringem Silicium-Gehalt, somit kommt es in diesen Bereichen zu einer Entmischung und nicht zu einer Vermahlung der Fasern.

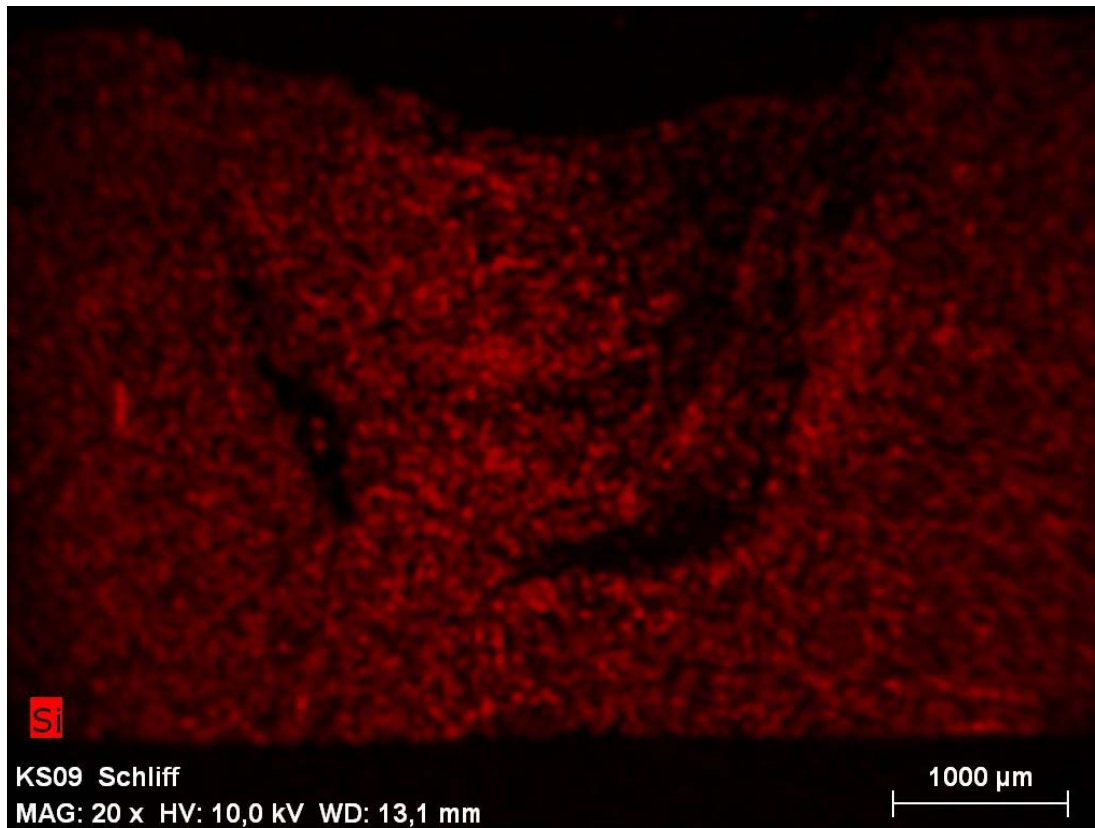


Abbildung 161: EDX-Bild: Siliciumgehalt in der Schweißzone

6 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit zeigt das Potential des Rührreibschweißens zum Fügen faserverstärkter Thermoplaste auf. Viele faserverstärkte Thermoplaste sind nur schwer mit den herkömmlichen Schweißverfahren ffügbar, Mischverbindungen sind oftmals gar nicht realisierbar. Da Kunststoffe eine verminderte Wärmeleitfähigkeit sowie eine thermisch induzierte Selbstschmierung aufweisen, reicht die durch Reibung erzeugte Wärme meist nicht aus, um den Werkstoff optimal zu verrühren.

Wie die Literaturstudie ergab, konnten bei unverstärkten Thermoplasten mit speziellen FSW-Werkzeugen („Hot-Shoe-Tool“) bereits hohe Schweißfaktoren erreicht werden. Hier zeigten sich bereits teilweise jene Probleme, wie etwa der übermäßige Austrag von Schweißgut aus der Fügezone und die kurzen Standzeiten des Werkzeugs, welche auch im Rahmen der Diplomarbeit auftraten. Bei FSW-Versuchen mit unverstärktem Polyamid wurden Festigkeiten von 28,4 MPa (39%) erreicht, bei einer Grundmaterialfestigkeit von 72,4 MPa [13 S. 50]. Für glasfaserverstärktes Polyamid (33% Gewichtsprozent Glasfasern) lag der maximal erreichbare Schweißfaktor beim Heizelementschweißen bei $f=48\%$. Bei Polyethersulfon (verstärkt mit 30% Glasfasern) wurde mittels Heizstrahlerschweißen ein Schweißfaktor von $f_s=83\%$ erreicht.

Die ersten Versuche wurden mittels konventioneller FSW-Werkzeuge durchgeführt, kombiniert mit verschiedenen Möglichkeiten zur Wärmeeinbringung (Heizplatte, Heißluftfön, Vorwärmung der Platten im Ofen). Neben dem Kriterium Temperatur wurden die Schweißparameter Drehzahl und Pindringtiefe betrachtet. Die verschweißten Proben wurden hinsichtlich der Zugfestigkeit, dem Gefügebau der Schweißnähte und der Verteilung der Fasern miteinander verglichen. Bei Ultradur konnte ein Schweißfaktor von 9%, bei Ultrason von 16%, und bei Ultramid von knapp 23% erreicht werden. Alle Werte wurden bei Schweißungen auf der beheizten Platte erreicht, teilweise in Kombination mit einer zusätzlichen Wärmeeinbringung mittels Heißluftfön bzw. Vorwärmen im Ofen.

Nach der Untersuchung der Fügeverbindung für konventionelle FSW-Werkzeuge wurde in mehreren Verbesserungsschritten das Werkzeug mit der stehenden, beheizten Schulter entwickelt. Das Werkzeug besteht aus einer Aluminiumschulter beheizt mit zwei Heizpatronen. In dieser ist der Pin drehbar gelagert.

Der Vergleich konventioneller Rührreibschweißwerkzeuge mit einem Werkzeug mit stehender beheizter Schulter ergab, dass mittels zusätzlicher Wärmeeinbringung zumindest eine Verdoppelung der Festigkeitswerte erzielbar ist. Bei Ultradur konnte die Festigkeit von 10N/mm^2 ($f_z=9,3\%$) auf $18,2\text{N/mm}^2$ ($f_z=16,9\%$) gesteigert werden, bei Ultramid von $28,9\text{N/mm}^2$ ($f_z=22,9\%$) auf $68,4\text{N/mm}^2$ ($f_z=51,8\%$). Auch bei Ultrason, welches nur mittels der konventionellen FSW-Werkzeuge verschweißt wurde (Festigkeit: $19,8\text{N/mm}^2$, $f_z=16,2\%$) ist zu erwarten, dass eine vergleichbare Festigkeitssteigerung möglich wäre.

Bezieht man die FSW-Festigkeitswerte für Ultramid auf das unverstärkte Matrixmaterial (Ultramid B3K), sind Schweißfaktoren von 0,80 (tr.) bzw. 1,75 (cond.) erreichbar.

Somit wurde nachgewiesen, dass nicht nur bei unverstärkten Polymeren der Einsatz einer beheizten Schulter als FSW-Werkzeug sinnvoll ist, sondern auch bei faserverstärkten Thermoplasten.

Vergleicht man die mittels FSW erreichten Zugfestigkeiten mit der Literatur, stellt man fest, dass vor allem bei Polyamid sehr hohe Festigkeiten erreicht werden konnten. Die mittels FSW erreichbaren Schweißfaktoren für Ultramid liegen oberhalb der klassischen Verfahren Heizelement- und Vibrationschweißen[78]. Dies könnte vor allem auf die bessere Verteilung der Glasfasern über die Grenzflächen der Fügezone hinweg zurückzuführen sein. Hinzu kam, dass vor allem bei Ultramid die Feuchtaufnahme der Proben einen Unsicherheitsfaktor darstellte. Bei den ersten Proben wurde dieser Aspekt noch nicht berücksichtigt, doch ließen sich durch Trocknung im Ofen stark verbesserte Ergebnisse erreichen. Bei Polyethersulfon hingegen konnte nur ein Fünftel der mittels Heizstrahlerschweißens erreichten Festigkeit mittels FSW erreicht werden. Hier ist jedoch zu beachten, dass mit diesem Material am IWS insgesamt nur zwei Versuche durchgeführt wurden.

Die Machbarkeitstudie zum Verschweißen unterschiedlicher Materialien zeigte, dass FSW durchaus Potential zum Fügen von normalerweise nicht fügbaren Polymeren, wie etwa Ultrasen und Ultradur, besitzt. Hierbei wurden – ohne Optimierung – Festigkeitswerte von 12,3 N/mm² (11%) erreicht.

Die Untersuchung der FSW-Schweißverbindungen mittels Sichtprüfung und Mikroskopie zeigte bei den optimierten Parametern eine homogene, gut an das Grundmaterial angebundene Schweißzone mit einer glatten und optisch ansprechenden Schweißnahtoberfläche. Die Mikroskopie zeigte aber auch die häufigsten Fehlerarten auf. Bei fast allen Proben war der Querschnitt unvollständig geschweißt, was jedoch durch die gewählten Rahmenbedingungen verursacht wurde. Beobachtet wurden bei den nicht optimierten Schweißungen Poren, fehlerhafte Anbindung an das Grundmaterial und Winkelabweichungen aufgrund der thermischen Einwirkung. Bei den Versuchen mit den konventionellen Rührreibwerkzeugen war die Schweißnahtunterwölbung durch den Auswurf des Materials aus der Fügezone ein großes Problem. All diese Probleme konnten mittels optimierter Schweißparameter und dem Werkzeug mit der stehenden, beheizten Schulter gelöst werden. Herr Kuriykov von BASF zeigte sich begeistert von den Schweißergebnissen.

Die Untersuchung der Bruchflächen mittels REM ergab, dass es beim FSW ebenso wie beim Vibrations-schweißen zu einer Anordnung der Fasern in Fließrichtung des Polymers kommt. Dabei werden die Fasern vermutlich verrieben bzw. verschwinden teilweise aus der Matrix. Es kommt zu einer lokalen Entmischung der Matrix von den Fasern, was mittels BSC und EDX nachgewiesen werden konnte.

7 Ausblick

Anhand der durchgeführten Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Rührreibschweißen ein großes Potential für das Schweißen von faserverstärkten Thermoplasten besitzt.

Zentral ist zu klären, inwieweit durch den FSW-Prozess von faserverstärkten Polymeren die Verstärkungswirkung der Fasern in der Schweißzone erhalten werden kann. Weitere interessante Fragestellungen sind die Auswirkungen des Faserbruchs auf die Verbindung und warum es zur teilweisen Entmischung der Fasern von der Matrix kommt. Ausschlaggebend zum Erreichen hoher Schweißfaktoren ist die Anbindung der Rührzone an den Grundwerkstoff. Es sind jene Parameter zu bestimmen, welche eine optimale Anbindung gewährleisten können.

Bei BASF Ludwigshafen werden im Frühjahr 2010 Kristallinitätsmessungen der einzelnen Schweißnahtbereiche durchgeführt, sowie die statistische Auswertung der Faserverteilung in der Fügezone. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen können aus Termingründen in der vorliegenden Diplomarbeit leider nicht mehr berücksichtigt werden. Mit diesen Untersuchungen soll herausgefunden werden, wie sich der Prozess auf die Kristallinität und somit auf das Bruchverhalten der Schweißverbindungen auswirkt und ob es zu einer Verminderung des Faseranteils im verrührten Material kommt.

Die Entwicklung des Werkzeugkonzepts mit der stehenden, beheizten Schulter führte zu guten Ergebnissen, doch werfen die erfolgreichen Schweißversuche eine Vielzahl an neuen zu lösenden Problemstellungen auf. Eine weitere Optimierung des Werkzeugdesigns ist nötig, um höhere Standzeiten und Festigkeiten zu erreichen. Das Problem des Eindringens von geschmolzenem Polymermaterial in die Fuge zwischen Pin und Schulter muss gelöst werden, um die Lebensdauer der Lager zu erhöhen. Die Geometrie der Pinspitze kann durch weitere Anpassungen zu einem verbesserten Materialfluss in der Fügenaht beitragen. Die Wahl eines geeigneten Werkzeugwerkstoffs, sowohl der Schulter, als auch der Pinspitze kann zur Erreichung von besseren Schweißfaktoren führen. Dies wurde bereits bei Versuchen am TWI gezeigt, wo mittels eines Werkzeugs aus Titan (geringe Wärmeleitfähigkeit) gute Ergebnisse beim Schweißen von Polymeren erreicht wurden [21]. Auch das Erwärmungskonzept der Stehenden Schulter bietet noch Innovationspotential. Ziel soll die Entwicklung eines kompakten, robusten und modular aufgebauten Werkzeugs sein.

Die erreichbaren Schweißnahtfestigkeiten der Werkstoffe Ultradur und Ultrason wurden im Rahmen der Diplomarbeit noch nicht ganz ausgereizt und können im Zuge einer weiteren Parameterstudie noch optimiert werden. Beim Werkstoff Ultramid hingegen würde sich eine Untersuchung zum Einfluss des Konditionierungszustands der Proben auf den Schweißnahtfaktor anbieten, da dieser Werkstoff besonders hygroskopische Eigenschaften aufweist.

Ein großes Potential in Bezug auf Festigkeit der Verbindung bietet das Dissimilar Welding von Ultradur mit Ultramid bzw. Ultrason. Für das Verschweißen unterschiedlicher Materialien ist wegen des unterschiedlichen Verhaltens der Fügepartner eine weitere Optimierung der Schweißparameter und des Werkzeugdesigns, wie etwa außermittiges Schweißen, nötig. Hier wäre auch das Verschweißen anderer faserverstärkter Werkstoffgruppen bzw. die Verbindung von Polymeren mit anderen Werkstoffgruppen interessant.

Auch die Einspannsituation der polymeren Platten besitzt Verbesserungspotential. Durch den hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten schrumpften die vorgewärmten Platten nach dem Einspannen, sodass die Platten zu Beginn des eigentlichen Schweißprozesses nicht mehr plan aneinander lagen. Abhilfe könnte hier beispielsweise eine kraftgesteuerte Einspannung bringen. Die Problematik der Kerbwirkung durch nicht ganz durchgeschweißte bzw. durch schlechtes Einspannen der Platten auf die Zugfestigkeit soll des Weiteren nicht außer Acht gelassen werden. Es wäre auch eine Betrachtung des Verzugs der verschweißten Platten, in Abhängigkeit von der Einspannung und den Prozessparametern interessant.

Ein wichtiger Punkt ist die zerstörungsfreie Prüfbarkeit bzw. die Qualitätssicherung der mittels FSW geschaffenen Verbindungen von faserverstärkten Polymeren. Auch in der zerstörenden Prüfung sind noch Verbesserungen der fügetechnischen Analyse möglich, z.B. durch den Einsatz des plastographi-

schen Ätzens für eine bessere Kontrastierung der amorphen und teilkristallinen Schweißgefügebereiche.

Fraglich ist, ob es sich im vorliegenden Fall noch um ein reines FSW- Verfahren handelt, oder ob es schon in die Gruppe der Hybridschweißverfahren (FSW und Heizelementschweißen) einzuordnen ist. Somit wäre eventuell auch eine Kombination mit anderen auf Wärmeeinbringung basierenden Kunststoffschweißverfahren (wie Laser-, Infrarot- und Wärmegasschweißen) sinnvoll, bzw. mit anderen, alternativen Erwärmungs-Technologien (Mikrowellen).

Essentiell ist schließlich die Aufgabe, mögliche industrielle Einsatzbereiche für das FSW von faserverstärkten Polymeren zu finden. Laut Herrn Kuriykov von BASF besitzt vor allem das Dissimilar Welding ein großes Potential für zukünftige Anwendungen.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Plattenmaterial BASF: Abmessungen (links) und Draufsicht (rechts): Ultramid, Ultrason, Ultradur.....	2
Abbildung 2:Verfahrensprinzip Friction Stir Welding [9 S. 131]	4
Abbildung 3: Verlauf der Schweißparameter beim FSW von Polymeren	4
Abbildung 4: Typische FSW-Naht von Polymeren	5
Abbildung 5: Umfangsgeschwindigkeiten (ω) und Vorschubgeschwindigkeit (v) am Werkzeug an der Advancing Side und der Retreating Side[10 S. 17].....	6
Abbildung 6: FSW als Extrusionsprozess [13 S. 9].....	6
Abbildung 7: Typische Zwiebelringstruktur FSW von PP [7 S. 54]	7
Abbildung 8: Schweißzonen in einer polymeren FSW-Stumpfnah: Advancing und Retreating Interface, Bottom Disturbance, Central Region (Stirzone) ; Grundwerkstoff: Polypropylen [7 S. 70] ...	8
Abbildung 9: Pingeometrie (a) und mikrostrukturellen Zonen (b): Rührzone, Thermo-mechanisch beeinflusste-(TMAZ) und Wärmeinfluss-Zone (HAZ) sowie Grundmaterial (GM) beim FSW-Schweißen von Polymeren, hier Ultradur.....	9
Abbildung 10: Erste Schweißversuche mit einem konventionellem Alu-FSW-Werkzeug (rechts) an zwei verschiedenfarbigen ABS-Platten (links) [1 S. Fig.1&2]	10
Abbildung 11: Hot-Shoe-Tool: Prinzipieller Aufbau [1 S. Fig.5]	11
Abbildung 12: Optimierte Schweißversuche mit dem Hot-Shoe-Tool an zwei verschiedenfarbigen ABS-Platten, Blick in die Schweißrichtung [1 S. Fig.6].....	11
Abbildung 13: Prinzipskizze Patent FSW Tool für Polymere[1].....	13
Abbildung 14: Werkzeug für das FSW von PP [7]	15
Abbildung 15: Schweißen von PE mittels beidseitigem FSW[24 S. 3315].....	16
Abbildung 16: Unterschiedliche Bruchzonen beim beidseitigen FSW von PE nach dem Dreipunktbiegeversuch; Die besten Ergebnisse lieferten Bruchbild (e) vor Bruchbild (b) und (d); die schlechtesten Ergebnisse (a)[24 S. 3315]	17
Abbildung 17: Verteilung der DSC-Schmelzwärme in der Fügezone von PP; deutlich ist die erhöhte Kristallinität in der matrixseitigen Wärmeinflusszone zu erkennen[23 S. 16].....	18
Abbildung 18: REM-Aufnahme der Bruchfläche der Schweißnaht, Schweißsaum links, Grundmaterial rechts [23 S. 16]	18
Abbildung 19: Fräswerkzeuge, 8-gängig mit einem Steigungswinkel der Schneide von 15° (links) und 45° (rechts)[23]	19
Abbildung 20: Querschliff der FSW-Schweißnaht, poliert; Vermischung der beiden Fügepartner.....	19
Abbildung 21: FSW-Werkzeugkonzept an der SDSM&T: Überblick[5]	20
Abbildung 22: Pingeometrien mit unterschiedlichem Abstand der Gewindgänge: Coarse (4,2 mm), Medium (2,1 mm) und Fine (1 mm) [5].....	20
Abbildung 23: FSJ-Werkzeug an der SDSM&T: Funktionsprinzip[5].....	21
Abbildung 24: Kristalliner Anteil der FSW Schweißnahtbereiche von PP, nach[5].....	23
Abbildung 25: Bruchflächenanalyse von PP mittels optischer und Rasterelektronen-Mikroskopie; PTPP bezeichnet die verschiedenen Pingeometrien (coarse, medium, fine) [5].....	23
Abbildung 26: Prinzip Vertical Reciprocating FSW[29]	24
Abbildung 27: (a) Equipment und (b) Versuchsaufbau der Schweißversuche mit „Frictional Vibration“ [25 S. 5]	24
Abbildung 28: Typische Verbindung bei „Frictional Vibration Welding“[25 S. 5].....	24
Abbildung 29: Verschweißen von Polymeren mit Viblade™: Vorrichtung und optimierte Geometrie der Titanklinge[21].....	25
Abbildung 30: Optimiertes Nahtaussehen und Querschliffe typischer Viblade™-Schweißungen[21] 25	25
Abbildung 31: Prinzipskizze Friction Stir Welding of Fiber Reinforced Thermoplastics. Angeben sind die Schweißrichtung und die Faserorientierung in den beiden zu verschweißenden Thermoplasten vor (unten) und nach (oben) dem FSW[26]	26

Abbildung 32: Zunehmende Bedeutung von thermoplastischen Faserverbunden in der Werkstoffwahl für den Flugzeugrumpf; Darstellung anhand der Materialverteilung bei A350XWB (links) und A380-800(rechts)[30]	28
Abbildung 33: Einordnung der Eigenschaften von Kunststoffen im Vergleich zu Stahl (=1)[31 S. 38].	28
Abbildung 34: Schematische Darstellung der Anordnung der Kettenmoleküle in Kunststoffen und deren Eigenschaften [36]	30
Abbildung 35 Einteilung der Kunststoffe[37 S. 3]	31
Abbildung 36: Strukturen thermoplastischer Kunststoffe: a) Thermoplast mit einem geringen Anteil an kristallinen Bereichen (amorpher Thermoplast); b) Thermoplast mit einem höherem Anteil an kristallinen Bereichen (teilkristalliner Thermoplast) [39 S. 432]	31
Abbildung 37: Zustandsformen von Thermoplasten: ZT... Zersetzungstemperatur, ST... Schmelztemperatur, KST... Kristallitschmelztemperatur, GT...Glastemperatur [42 S. 381]	32
Abbildung 38: Relativer Werkstoffeinsatz in der Luftfahrt/ Airbus und Boeing(GLARE: glasfaserverstärktes Aluminium)[30]	35
Abbildung 39: Molekularer Aufbau der Glasfaser (links), Struktur und REM-Aufnahme von Glasfasern in einer Polyamid6 Matrix (rechts)[46 S. 19].	36
Abbildung 40: Einteilung der Kunststoffe nach dem Temperaturbereich; PA und PBT zählen zu den Technischen Thermoplasten, PES (PSU) zu den hochtemperaturbeständigen Thermoplasten [35] ...	37
Abbildung 41: Strukturformel PA6 [48]	38
Abbildung 42: Ringöffnungspolymerisation von ϵ -Caprolactam. Start der Reaktion durch Hydrolyse (links); aus den ϵ -Caprolactam-Molekülen entsteht das kettenförmige Polycaprolactam-Makromolekül (rechts)[50]	38
Abbildung 43: Strukturformel PESU[55]	39
Abbildung 44: Strukturformel PBT[60]	40
Abbildung 45: Dampfblasen in Schweißnähten aus Polyamid 6 [64 S. 132]	41
Abbildung 46: Vergleich der mechanischen Eigenschaften von Polyamid 6 trocken und konditioniert[65]	41
Abbildung 47: Fügetechniken für unverstärkte und verstärkte Thermoplaste[3 S. 305]	43
Abbildung 48: Klassifikation der Schweißverfahren für faserverstärkte Thermoplaste[3 S. 306]	44
Abbildung 49: Schematischer Schweißablauf: 1. Erwärmung der Fügeflächen durch Wärmeleitung, Konvektion, Dissipation oder Strahlung; 2. Kontaktherstellung, Abkühlung und Lagefixierung[73 S. 3-1]	45
Abbildung 50: Die wichtigsten Schritte beim Verbinden von thermoplastischen Oberflächen beim Schweißen: inniger Kontakt unter Druck und Temperatur (links), Diffusion der Molekülketten über die Grenzflächen der Fügepartner hinweg (Mitte); Schweißverbindung(rechts)[74 S. 346].	45
Abbildung 51: Verschlaufungen von linearen Polymerketten über die Grenzflächen der Fügepartner[73 S. 3-18]	46
Abbildung 52: Schematische Aufeinanderfolge von Gefügeformationen an einer Heizelementschweißnaht aus PP[73]	48
Abbildung 53: Realisierbare Werkstoffkombinationen für Serienschweißverfahren; grün: guteSchweißbeignung ; orange: schlechte Kombinierbarkeit; weiß: k.A.(BASF)	49
Abbildung 54: Der Schweißprozess im Zustandsdiagramm für Wasser [77]	51
Abbildung 55: Streckspannung, Schweißnahtfestigkeit und Schweißfaktor von Polyamid 6 in Abhängigkeit vom Fasergewichtsanteil [64 S. 13]	52
Abbildung 56: Schematische Anordnung der Glasfasern in einer Heizelement-Schweißnaht [64 S. 127]	53
Abbildung 57: Vibrationsschweißen: Schweißnähte aus PA6-GF30 (linear längs; $p = 4,0 \text{ N / mm}^2$; $a = 0,6 \text{ mm}$; $s = 1,5 \text{ mm}$) (BASF)	54
Abbildung 58: Mikroschliffbild der Schweißzone eines kurzfaserverstärkten Polyamids [3 S. 310]	54

Abbildung 59: Fügenahtbereich und Glasfaserorientierung in den Fügenahtbereichen von faserverstärktem PES. a) Heizelektroschweißen, b) Vibrationsschweißen, c) Heizstrahlerschweißen[79]	55
Abbildung 60: Friction-Stir-Welding-Anlage am IWS	57
Abbildung 61: Stahlkopf	57
Abbildung 62: Aluminiumkopf	57
Abbildung 63: Temperaturregler Joens	58
Abbildung 64: Berührungslose Temperaturmessung	58
Abbildung 65: Zugprüfmaschine RMC100 mit mechanischen (links) und hydraulischen Klemmbacken (rechts)	58
Abbildung 66: Rasterelektronenmikroskop am IWS	59
Abbildung 67: Elektrodenofen	59
Abbildung 68: Ablauf der Diplomarbeit	60
Abbildung 69: Schneiden der Proben und Verschweißen (Vibrationsschweißen)	61
Abbildung 70: Rührreibschweißen- Entnahme der Zugprobe[80]	61
Abbildung 71: Zu prüfende Bereiche an den verschweißten Platten	62
Abbildung 72: Fehlende Durchschweißung der Probe; deutlich erkennbar ist die verminderte Pineindringtiefe	63
Abbildung 73: Ablauf der Werkzeugentwicklung, insbesondere des Werkzeug-Designs	64
Abbildung 74: Übersicht über die verwendeten Werkzeuge	65
Abbildung 75: Werkzeug 1	65
Abbildung 76: Werkzeug 2	66
Abbildung 77: Werkzeug 3	66
Abbildung 78: Vergleich der Werkzeugkonzepte mit stehender Schulter; Schweißnahtaussehen	67
Abbildung 79: Adjustable Pin für Prototyp Heizplatte oben, Pinspitze mit Gewinde (rechts) (M4)	67
Abbildung 80: Werkzeug mit stehender beheizter Schulter	68
Abbildung 81: Pin 1 (links) und Pin 2 (rechts) des Werkzeugs mit stehender, beheizter Schulter	68
Abbildung 82: Pin mit Linksgewinde (links) und Pin mit Rechtsgewinde (rechts)[81]: Verteilung der Schweißfehler nach 6,98 bzw. 7,86 Sekunden Schweißzeit (Linksgewinde) / 6,75 bzw. 10,86 Sekunden Schweißzeit (Rechtsgewinde)	69
Abbildung 83: Werkzeugentwicklung: Wärmeeinbringung	70
Abbildung 84: Heizplatte mit Temperaturregeleinheit	71
Abbildung 85: Wärmeeinbringung mittels Heißluftfön / Thermische Schädigung des Werkstoffs	71
Abbildung 86: Werkzeugentwicklung: Einspannung	72
Abbildung 87: Einspannung Heizplatte	72
Abbildung 88: Pneumatische Spannvorrichtung	72
Abbildung 89: Charakterisierung der Schweißnaht nach Strand (Kapitel 3.1.5)	75
Abbildung 90: Spannungs-Dehnungsverhalten von Kunststoffen im uniaxialen Zugversuch bei konstanter Ziehgeschwindigkeit v_0 [88]	77
Abbildung 91: Probenform für flache Schweißverbindungen; Abmaße der Probe DIN EN 12814-2 ...	78
Abbildung 92: Schematischer Aufbau der Dreipunkt-(a) und der Vierpunktbiegeprüfeinrichtung (b) mit Biegemomenten und Querkraftverlauf [90 S. 146]	79
Abbildung 93: DIN EN ISO 12814-1 Ermittlung des Biegewinkels α bzw. des Biegeweges H ;	80
Abbildung 94: Blockschaubild eines Rasterelektronenmikroskops [93]	80
Abbildung 95: Bruchflächen von glasfaserverstärktem PP im Rasterelektronenmikroskop: a) zeigt eine schlechte Haftwirkung der Phase, b) gute Adhäsion der Phase[94]	81
Abbildung 96: mögliche Verformungsvorgänge in faserverstärkten Verbundwerkstoffen	82
Abbildung 97: Schematische Spannungsverteilung entlang einer Verstärkungsfaser (links) und Versagensmechanismen bei unterschiedlichen Faserlängen: lange Fasern: Faserlänge $> l_c$; kurze Fasern: Faserlänge $< l_c$ [93 S. 196]	82

Abbildung 98: Funktionsprinzip der energiedispersiven Röntgenanalyse EDX: Durch externe Anregung wird ein Elektron aus einer Atomschale eines Elements herausgeschlagen. Der frei gewordenen Platz in der Atomschale wird sofort mit einem Elektron aus einer Schale mit weniger stark gebundenen Elektronen nachbesetzt. Dieser Vorgang geschieht unter Emittierung einer charakteristischen Röntgenstrahlung [95].....	83
Abbildung 99: Zugproben der unverschweißten Grundwerkstoffe; Die Proben wurden in Fließrichtung entnommen. Geometrie nach DIN EN ISO 572: Probenkörpertyp 1BA klein.....	85
Abbildung 100: Vergleich der unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten (Schweißnahtlänge ca. 70 mm).....	87
Abbildung 101: Probenentnahme aus der verschweißten Platte und Durchführung Zugversuch.....	87
Abbildung 102: Schweißnahtaussehen Werkzeug 1.....	88
Abbildung 103: Zugfestigkeitswerte der Serie KS_0902.....	89
Abbildung 104: Untersuchte Bereiche.....	90
Abbildung 105: Lunker und Bindefehler in einer FSW-Naht. Hier: KS0902_S009A, Polyamid 6 gelagert bei Raumklima, geschweißt auf einer beheizten Platte bei einer Temperatur von 160°C.....	90
Abbildung 106: Gegenüberstellung Grundmaterial-Stirzone.....	91
Abbildung 107: Darstellung der Festigkeitswerte von Ultramid über die Temperatur bei verschiedenen Werkzeugen (2&3).....	92
Abbildung 108: Vergleich Anbindung an der Advancing Side-KS_0903_S002 (Wkz2) mit KS_0903_S004 (Wkz3).....	93
Abbildung 109: Vergleich Anbindung an der Bottom Disturbance-KS_0903_S002 (Wkz2) mit KS_0903_S004 (Wkz3).....	94
Abbildung 110: Anbindung an der Retreating Side-KS_0903_S002 (Wkz2, rechts) mit KS_0903_S004 (Wkz3, links).....	94
Abbildung 111: Konturdiagramm der Reihe KS_0903 (Werkzeug 2) von Festigkeit vs. Drehzahl; Temperatur – Mintab.....	95
Abbildung 112: Pingeometrie mit Gewinde G (links), Pingeometrie glatt P (rechts).....	96
Abbildung 113: Nahtaussehen_KS_0904-S002, S003 und S004 (von oben).....	96
Abbildung 114: Stehende Schulter aus Aluminium und Werkzeug 3.....	97
Abbildung 115: Schweißnahtaussehen der besten Schweißung KS_0905_S002 (Ultradur).....	98
Abbildung 116: Ultradur-Makroschliff konventionelle FSW-Werkzeuge: WKZ 2 (links) und WKZ 3 (rechts).....	99
Abbildung 117: Herausnehmen der Proben aus den geschweißten Platten (B, C, E Zugproben; D Makro).....	100
Abbildung 118: Schweißnahtaussehen KS_0906_S016 (oben) und Entnahme des plastographischen Anschliffs (unten).....	101
Abbildung 119: Schweißnahtquerschnitt beheizter Pinstift KS_0906_S016.....	101
Abbildung 120: Pin 1 -eingebaut in die feststehende, beheizte Schulter und FSW-Stahlkopf.....	102
Abbildung 121: Schweißnaht KS_0908_S005.....	102
Abbildung 122: Querschliff KS_0908_S005.....	103
Abbildung 123: Querschliff der Probe KS_0908_S004.....	104
Abbildung 124: Vergrößerung aus Abbildung 123: Schweißwurzel (links) und Anbindung Retreating Side (rechts).....	104
Abbildung 125: Graphische Darstellung der Ergebnisse aus den Zugversuchen KS_0908_S009-S014.....	105
Abbildung 126: Verbesserung der Festigkeit anhand stehender, beheizter Schulter.....	106
Abbildung 127: Vorrichtung mit Messing-Gleitlager (vorher) und gebrochenen/ verrienen Pin (nachher).....	107
Abbildung 128: Schweißnahtaussehen und erreichte Festigkeiten bei Ultramid; Vorversuche stehende, beheizte Schulter.....	107
Abbildung 129: Schliffbilder Ultramid: KS_0909_S001 (links) und S002 (rechts).....	108

Abbildung 130: Vergleich der Bruchspannungen von Polyamid bei einer Temperatur von 80° C (links) und 100°C (rechts)	108
Abbildung 131: Versuchsaufbau und Einspannsituation bei Versuchsreihe KS_0910	109
Abbildung 132: Nahtausbildung bei Probe KS_0910_S004: keine Schweißnahtunterwölbung, Schuhtemperatur 120°C, Drehzahl 2500 (Gegenlauf), Vorschub 50 mm/min, Pin 2	110
Abbildung 133: Zugversuch Ultramid: Vergleich mit unverstärktem Ultramid B3K.....	111
Abbildung 134: Vergleich der Makroschliffe von Ultramid mit geringer Festigkeit (oben, S002 nach 35mm Nahtlänge) mit jenen hoher Festigkeit (mitte und unten, S002 nach 75mm Nahtlänge und S004 nach 35mm Nahtlänge).....	112
Abbildung 135: Zugfestigkeit vs. Drehzahl, Temperatur; Ultramid (Software Minitab).....	113
Abbildung 136: Nahtausbildung bei verschiedenen Drehzahlen und Temperaturen;.....	114
Abbildung 137: Schweißnaht-Optik bei verschiedenen Drehzahlen und Schweißschuhtemperaturen	115
Abbildung 138: FSW von PES; Werkzeug 2 (links) und Werkzeug 3 (rechts).....	116
Abbildung 139: Erreichte Schweißnahtfestigkeiten PES: Vergleich von Werkzeug 2 mit Werkzeug 3	116
Abbildung 140: Verschweißen Ultramid und Ultradur: Werkzeug 2 (links) und stehende Schulter mit Stahlstift (rechts).....	117
Abbildung 141: Werkzeug für Versuchsreihe KS_0907 (nach Pinbruch)	117
Abbildung 142: Makrobild KS_0907_S002; Advancing Side-Ultramid (links); Retreating Side-Ultradur (rechts).....	118
Abbildung 143: Mikroskopaufnahme der Rührzone von KS_0907_S002	118
Abbildung 144: Detail aus Abbildung 143: Rührzone	119
Abbildung 145: FSW von Ultradur und Ultrason	119
Abbildung 146: Dissimilar Welding von Ultradur und Ultrason-Schweißnaht	120
Abbildung 147: Makroschliffbild Dissimilar FSW von Ultradur und Ultrason (Detail).....	121
Abbildung 148: Detail aus Abbildung 147: Anbindung der Advancing Side an den Grundwerkstoff Ultrason.....	121
Abbildung 149: Versuchsaufbau Vierpunktbiegeversuch IWS.....	123
Abbildung 150: Entnahme der Biegeprobe aus der verschweißten Platte (links) abgefräste Probe (rechts).....	123
Abbildung 151: Vierpunktbiegeversuch [99]	124
Abbildung 152: Biegeversuch Ultramid: gebrochene Probe verschweißter Querschnitt	124
Abbildung 153: REM-Grundmaterial Ultramid: Übersicht (oben), Wandzone (Mitte) und Kernzone (unten)	125
Abbildung 154: Betrachtung der Bruchflächen mittels REM.....	126
Abbildung 155: REM-Schweißgut Ultramid: Stirzone (Mitte) und Anbindung Wurzel (unten).....	127
Abbildung 156: REM-Retreating Side-Anbindung Grundmaterial: Stirzone (Mitte) und Anbindung Wurzel (unten).....	128
Abbildung 157: Übersichtsbild BSC; Schliff KS_0910_S005	129
Abbildung 158: BSC-Detail: Zone lokaler Entmischung auf der Advancing Side: 50fache Vergrößerung (links) und 100fache Vergrößerung (rechts).....	129
Abbildung 159: Mit Kohlenstoff bedampftes Schliffbild von Polyamid (Probe KS_0910_S005, links), Zone der Entmischung (vergrößert, rechts).....	130
Abbildung 160: Graph der detektierten Röntgenquanten; durch das elementspezifische Energieniveau kann man auf die Zusammensetzung schließen	130
Abbildung 161: EDX-Bild: Siliciumgehalt in der Schweißzone	131
Abbildung 162: Spannungs-Dehnungsdiagramm Ultramid	151
Abbildung 163: Spannungs-Dehnungsdiagramm Ultradur.....	151
Abbildung 164: Spannungs-Dehnungsdiagramm Ultrason.....	152

Abbildung 165: Fließrichtung und vorherrschende Glasfaserorientierung für eine spritzgegossene Platte [100 S. 397].....	152
Abbildung 166: Faserorientierung in einer Spritzgegossenen Platte, Wandquerschnittsaufnahme [102 S. 387]; Längsschnitt durch ein PP- Spritzgußteil (20% glasfaserverstärkt) [103 S. 66].....	153
Abbildung 167: Probenentnahme: Teststäbe in und quer zur Fließrichtung der spritzgegossenen Platten [104]	153
Abbildung 168: Glasfaserorientierung in einer Platte aus PA6 [49]	154
Abbildung 169: Resultierende Faserorientierungsverteilung. A: Faserarme Schicht B: Randzone mit Faserausrichtung parallel zur Bauteiloberfläche C: Übergangsbereich D: Kernzone mit Faserorientierung senkrecht zur Flussrichtung [105 S. 328]	154
Abbildung 170: Faserlängenverteilung in einem extrudierten Bauteil. Ausgangslänge der Fasern: 3mm [106].....	154

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Untersuchte Parameter beim FSW von ABS [27]	12
Tabelle 2: Einfluss der verschiedenen Parameter auf die Schweißnahtqualität von ABS, PP; und HDPE[27]	12
Tabelle 3: Zugversuchsergebnisse für unterschiedliche Polymere [13 S. 50]	14
Tabelle 4: FSJ-Prozessparameter, Wertebereiche und optimierte Prozessparameter[5]	21
Tabelle 5: Durchschnittliche Zugfestigkeit und Bruchdehnung des unverschweißten PP-Grundmaterials im Vergleich mit drei, mit unterschiedlichen Pindesigns verschweißten FSW-Proben [5]	22
Tabelle 6: Durchschnittliche Kristallinität und Standardabweichung in Bereichen der FSW-Schweißzone[5]	22
Tabelle 7: Parameter Friction Stir Welding of Fiber reinforced Thermoplastics[26]	27
Tabelle 8: Zustandsverarbeitungsschema für amorphe Thermoplaste[34 S. 9]	33
Tabelle 9: Zustandsverarbeitungsschema für teilkristalline Thermoplaste [34 S. 9]	33
Tabelle 10: Gliederung der Verbundwerkstoffe und Anwendungen[37 S. 3]	34
Tabelle 11: Richtwerte der Glaszusammensetzung in % [44 S. 22]	35
Tabelle 12: Eigenschaften der Glasfasern [44 S. 27]	35
Tabelle 13: Vergleich der Eigenschaften von unverstärkten mit kurzfaserverstärkten Güten (PA6)...	36
Tabelle 14: Mechanische und thermische Kennwerte der verwendeten Werkstoffe Ultramid, Ultrason, Ultradur, verstärkt mit 30% Kurzglasfasern	37
Tabelle 15: Richtwerte für die Trocknung von Platten aus Ultrason [53] [62 S. 96]	42
Tabelle 16: Vor- und Nachteile der Schweißverfahren für Ultramid; Anwendungen [48]	51
Tabelle 17: Effizienz der Schweißverfahren für glasfaserverstärktes Nylon 6 (33% Glasfasern, bei 23°C, trocken, optimierte Prozess-Konditionen)[78]	52
Tabelle 18: Verschweißte Kombinationen	63
Tabelle 19: Vergleich der Erweichungstemperaturen der untersuchten Werkstoffe mit den Aushärtungstemperaturen des Einbettmittels [83],[Datenblatt VariDur, Labor IWS]	73
Tabelle 20: Bewertung von Schweißverbindungen nach DVS-Merkblatt 2201-1; Äußerer Befund - Bewertungsgruppen für Warmgaszieh- und Warmgasfächelschweißnähte (WZ, WF) bzw. Warmgasextrusionsschweißnähte (WE)[86]	76
Tabelle 21: Bewertung von Schweißverbindungen nach DVS-Merkblatt 2201-1; Innerer Befund - Bewertungsgruppen für Warmgaszieh- und Warmgasfächelschweißnähte (WZ, WF) bzw. Warmgasextrusionsschweißnähte (WE)[86]	77
Tabelle 22: Zugfestigkeiten und Bruchdehnungen der Werkstoffe	85
Tabelle 23: Verschweißte Kombinationen	86
Tabelle 24: Ergebnisse der ersten Schweißversuche mit Ultramid	86
Tabelle 25: Parameter der Versuche KS_0902 mit Ultramid und Werkzeug 2; Winkel 2,8°; Vorschub 50 mm/min	88
Tabelle 26: Ergebnisse der Zugprüfung der Serie KS_0902	89
Tabelle 27: Variation der Wärmeparameter bei Ultramid; Winkel: 2,8°, Drehzahl: 2500U/min; Vorschub 50 mm/min Eindringtiefe Werkzeug: 3,3 mm	91
Tabelle 28: Festigkeitswerte der Variation der Wärmeparameter	92
Tabelle 29: Gegenüberstellung der Schweißnahtgeometrie WKZ 2 (links) und WKZ 3 (rechts); gelb-Rührzone	93
Tabelle 30: Parameter der Versuche mit Werkzeug 2 und 3/ Ultramid; Winkel: 2,5°, v= 50mm/min, Eindringtiefe 3,3mm	94
Tabelle 31: Ergebnisse der Zugversuche KS_0903_S009-S016 (Ultradur)	95
Tabelle 32: Parameter der Versuchsreihe KS_0904; Winkel 2,5°; Drehzahl: 2500 U/min; Vorschub 50 mm/min	96

Tabelle 33: Parameter der Schweißversuche KS_0905 und Ergebnisse der Zugprüfung; Winkel: 2,8°; Vorschub 50 mm/min	97
Tabelle 34 Versuche – kalt mit Ultradur; Vorschub 2000 mm/min	98
Tabelle 35: Parameter der Versuche mit konventionellen Rührreischweißwerkzeugen; Vorschub: 50 mm/min; Eindringtiefe 3,3mm	99
Tabelle 36: Ergebnisse der Zugversuche KS_0903 (Ultradur)	99
Tabelle 37: Parameter der Versuchsreihe KS_0905 für Ultradur; Winkel 2,8°; Vorschub 50 mm/min	99
Tabelle 38: Ergebnisse der Zugprüfung KS_0905 (Ultradur).....	100
Tabelle 39: Parameter der Versuche mit beheizter, stehender Schulter und Pin 1; Vorschub: 50mm/min; Winkel 0°;.....	102
Tabelle 40: Ergebnisse der Zugprüfung stehende beheizte Schulter Ultradur.....	103
Tabelle 41: Parameter der weiterführenden Versuche mit der stehenden, beheizten Schulter und Pin 1/Ultradur; Werkzeug Pin 1; Winkel. 0°; Vorschub 50 mm/min	105
Tabelle 42: Ergebnisse der Zugprüfung Ultradur/stehende beheizte Schulter	105
Tabelle 43: Parameter der Vorversuche mit Ultramid	107
Tabelle 44: Parametermatrix für das Fügen von Ultramid mit Pin 2 des Werkzeugs mit stehender, beheizter Schulter, v=50 mm/min	109
Tabelle 45: Erreichte Zugfestigkeiten bei Ultramid B3WG6 in den Versuchsreihen KS_0909 und KS_0910.	110
Tabelle 46: Ergebnisse und Parameter der Versuchsreihen KS_0909 und KS_0910 für Ultramid	111
Tabelle 47: Parameter für das Verschweißen von Ultramid und Ultradur; v= 50mm/min	117
Tabelle 48: Parameter für das Dissimilar FSW von PES und PBT	120
Tabelle 49: Durchgeführte Versuche mit verschiedenen Werkzeugkonzepte und erreichte Festigkeiten der Verbindungen.....	122
Tabelle 50: Schweißfaktoren mittels konventioneller FSW-Werkzeuge/ Anzahl der durchgeführten Versuche	122
Tabelle 51: Schweißfaktoren mittels Werkzeug mit stehender Schulter/ Anzahl der durchgeführten Versuche	122
Tabelle 52: Maße der Proben und Prüfanordnung nach DIN EN ISO 12814-1 [98].....	124
Tabelle 53: Berechnung der Biegefestigkeiten Ultradur.....	124

10 Literaturverzeichnis

1. **Nelson, et al.** *Friction Stir Welding of Polimeric Materials*. US 6 811 632 B2 United States, 2. November 2004. S.24ff.
2. **BASF.** Technische Kunststoffe - Ultramid (PA) Verbindungsmethoden. *www.plasticsportal.net*. [Online] 2009. [Zitat vom: 04. 06 2009.] http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/common/content/products/engineering_plastics/ultramid/joining_methods.
3. **Yousefpour, A., Hojjati, M. und Immarigeon, J.-P.** Fusion Bonding/ Welding of Thermoplastic Composites. [Hrsg.] Sage. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 17, 2004, Bd. 303.
4. **Messler, R.W.** *Joining of Materials and Structures: From Pragmatic Process to Enabling Technology*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann, 2004. Elektronische Ressource www.engineeringvillage.com.
5. **Mattapelli, S., Arbegast, W. and Winter, R.** *Friction Stir Joining of Thermoplastics*. s.l.: Mishra R. S., 2007. 9780873396615.
6. **Weinberger, T. und Enzinger, N.** Anwendungsmöglichkeiten von Rührreißschweißen. *Metall*. 2008, Bd. 9. Offizielles Magazin der Landesinnung Wien der Schlosser, Landmaschinentechniker und Schmiede.
7. **Strand, S. R.** *Effects of Friction Stir welding on Polymer Microstructure- Master Thesis*. Department of Mechanical Engineering. Utah: Brigham Young University, 2004.
8. **Strand, S., Sorensen, C.D. und Nelson, T. W.** *Effects of Friction Stir Welding on polymer Microstructure*. Nashville: Society of Plastics Engineers, 2003. Bd. 61.
9. **Dilthey, U.** *Schweißtechnische Fertigungsverfahren 1, Kapitel 7 Pressverbindungs-schweißen*. Berlin Heidelberg: VDI-Buch, 3., bearbeitete Auflage, Schweiß- und Schneidtechnologien Springer, 2006.
10. **Führer, Bernhard.** *Diplomarbeit: Prozess- und Werkzeugentwicklung für das Rührreißschweißen von Stählen*. Graz: IWS, 2007.
11. **Reynolds, A.P.** Visualisation of material flow in autogenous friction stir welds. [Hrsg.] Maney Publishing. *Science and Technology of Welding & Joining*. 2000, Bd. 5, 2, S. pp. 120-124(5). <http://www.ingentaconnect.com/content/maney/stwj/2000/00000005/00000002/art00008>.
12. **Schneider, J.A.** Temperature Distribution and Resulting Metal Flow. [Buchverf.] R.S. Mishra und M.W. Mahoney. *Friction Stir Welding and Processing*. Ohio: ASM International, 2007.
13. **Arbegast, W.J.** *Friction Stir Weding and Processing- Current State of the Art and Needs for the Future*. XXXIII CONSOLDA - CONGRESSO NACIONAL DE SOLDAGEM, e 27 a 30 de agosto de 2007, Caxias do Sul, RS: CFSP, 2007.
14. **Krishnan, K.N.** On the formation of onion rings in friction stir welds. *Materials Science and Engineering A*. 327, 2002, S. 246–251. www.elsevier.com/locate/msea.
15. **Arbegast, W. J.** Application of Friction Stir Welding and Related Technologies. [Buchverf.] R.S. Mishra und M.W. Mahoney. *Friction Stir Welding and Processing*. Ohio: ASM International, 2007.
16. **Chen, J., H., Liu und Feng, J.** Friction stir welding characteristics of different heat-treated-state 2219 aluminum alloy plates. *Materials Science and Engineering A*. 420, 2006, S. 21-25.
17. **Deutscher Verband für Schweißen und Verwandte Verfahren / Fachgruppe Schweißtechnische Ingenieurausbildung.** *Fügetechnik, Schweißtechnik*. Düsseldorf: DVS-Verlag, 2004. ISBN 3-87155-786-2.
18. **Mishra, R.S. und Ma, Z.Y.** Friction Stir Welding and Processing. [Hrsg.] Elsevier B.V. *Materials Science and Engineering*. R: Reports, 31. 08 2005, Bd. 50, 1-2. http://www.sciencedirect.com/science?_ob=ArticleURL&_udi=B6TXH-4GX0C6S-1&_user=464374&_coverDate=08%2F31%2F2005&_alid=1181027099&_rdoc=5&_fmt=high&_orig=search&_cdi=5591&_sort=r&_st=13&_docanchor=&_ct=154&_acct=C000022118&_version=1&_urlVersion=0&_userid=
19. **Wise und R., J.,.** *Thermal Welding of Polymers*. Cambridge: Abington Publishing, 1999. S. 44. 1 85573 495 8.

20. **Artmeyer, S., et al.** Band 15: Korrosion bis Lacke: Kunststoffe, Verarbeitung. *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie 4. Auflage*. Weinheim : Verlag Chemie, 1982.
21. **Scialpi, A., Troughton, M., Andrews, S. und De Filippis, L.A.C.** In- line reciprocating friction stir welding of plastics. *TWI World Centre for Materials Joining Technology*. [Online] TWI Ltd, 2007. [Zitat vom: 04. Februar 2009.] Published in *Joining Plastics/Fügen von Kunststoffen Magazine*, Issue 1, May 2007. <http://www.twi.co.uk/content/spmjtmay2007.html>.
22. **Strand, S.** *Joining Plastics- Can Friction Stir Welding Compete?* s.l.: IEEE Xplore, 2003. <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1247904&isnumber=27951>.
23. **Kiss, Z. und Czigany, T.** Applicability of friction Stir Welding in Polymeric Materials. *periodica polytechnica*. 51, 2007.
24. **Arici, A. und Sinmaz, T.** Effects of double passes of the tool on friction stir welding of polyethylene. *Journal of Materials Science*. 2005, 40, S. 3313- 3316.
25. **Panneerselvam, K., et al.** *Joining of plastics by frictional vibration*. India : Department of Metallurgical and Materials Engineering, Indian Institute of Technology Madras, 2004. International Symposium of Research Students on Materials Science and Engineering. <http://metallurgy.iitm.ac.in/isrs/isrs04/cd/content/Papers/JCS/PO-JCS-7.pdf>.
26. **Manicke, Helder.** *Friction Stir Welding of Fiber Reinforced 'Thermoplastics*. 0156411 USA, Juni 2008.
27. **Sorensen, C.D, et al.** *Joining of thermoplastics with friction stir welding*. Dallas : Society of Plastic Engineers, 2001. Antec 2001 Conference Proceedings.
28. **Troughton, Michael J.** *Handbook of Plastics Joining: A Practical Guide*. [Hrsg.] William Andrews. s.l. : International Institute of Welding, 2008. ISBN: 081551812.
29. **Thomas.** *Friction welding* . 5460317 USA, 1995.
30. **Gradingner.** *Österreichische F&E im Luftfahrtleichtbau*. Wien : Seminar Leichtbau - Prinzipien, Werkstoffauswahl und Fertigungsvarianten in der Luftfahrt, 2009.
31. **Wissenschaftlicher Arbeitskreis Kunststofftechnik (WAK).** Werkstoffkunde Vorlesung. [Online] [Zitat vom: 13. 12 2009.] <http://132.180.184.15/wak/daten/vorlesungen/hab-Werkstoffkunde-folien.pdf>.
32. **Burr, A. und Harsch, G.** Kunststoffe. [Buchverf.] K.-H. Grote und J. Feldhusen. *Doppel, Taschenbuch für den Maschinenbau*. Berlin Heidelberg : Springer, 2005. <http://www.springerlink.de/content/p372662013501661/fulltext.pdf>.
33. **Brydson, J.A.** Chapter: 18 Polyamides and Polyimides . *Plastics Materials: Seventh Edition, Page 533ff* . s.l. : Elsevier Butterworth-Heinemann, 1999l.
34. **Schwarz, O. und Ebeling, F.W., Furth, B.** *Kunststoffverarbeitung*. Würzburg : Vogel Verlag, 2002. 3-8023-1893-5.
35. **Seycek, O.** *Vorlesung „Kunst- und Verbundwerkstoffe“; Kapitel: „Grundlagen der Kunststofftechnik“*. Graz : IWS TU Graz , 2004.
36. **Menges, G., et al.** *Werkstoffkunde Kunststoffe*. München : Hanser, 2002.
37. **Eyerer, P., Elsner, P. und Hirth, T.** *Polymer Engineering*. [Hrsg.] VDI Buch. s.l. : Springer Verlag, 2008.
38. **DIN.** *DIN 7724 Polymere Werkstoffe; Gruppierung polymerer Werkstoffe aufgrund ihres mechanischen Verhaltens*. 1993:04.
39. **Benedix, R.** *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure* . Wiesbaden : Teubner Verlag, 2006.
40. **Menke, T.J.** *Maßschneidern der Eigenschaften von Polypropylen Mischungen und Olefincopolymeren*. Halle : Dissertation Uni Halle, 2001. <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/01/02H013/t6.pdf>.
41. **Illy, Stefanie.** 8. Strukturen . *Werkstoffe; Handreichungen für das Wahlpflichtfach Mathematik-Naturwissenschaften der Realschule und für den fachübergreifenden projektorientierten Unterricht*. [Online] Pädagogisches Zentrum des Landes Rheinland-Pfalz Bad Kreuznach, 06. 12 2001 . [Zitat vom: 14. 12 2009.] <http://pz.bildung-rp.de/mat/werkstoff/node11.html>.

42. **Krüger, O.** Kapitel 7: Kunststoffe. [Buchverf.] Schulze Bargel. *Werkstoffkunde*. Berlin : Springer, 2005. <http://www.springerlink.de/content/r6535773k7m57h38/fulltext.pdf>.
43. **Rösler, J., Harders, H. und Bäker, M.** Mechanisches Verhalten der Faserverbundwerkstoffe. *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. s.l. : Vieweg+Teubner, 2008. <http://www.springerlink.com/content/t146516040w0714n/fulltext.pdf>.
44. **Ehrenstein, G.W.** *Faserverbundwerkstoffe*. Erlangen : Hanser Verlag, 1992.
45. **Wikipedia.** Glasfaser. *Wikipedia Die freie Enzyklopädie*. [Online] Wikimedia Foundation Inc., 02. 02 2010. [Zitat vom: 02. 02 2010.] http://de.wikipedia.org/wiki/Glasfaser#Arten_von_Verst.C3.A4rkungsfasern.
46. **Ehrenstein, G.W.** *Faserverbund-Kunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften*. München, Wien : Hanser, 2006.
47. **Salinas, M.H.** *Untersuchung flüchtiger Verbindungen bei der thermischen Zersetzung von stickstoffhaltigen Polymerwerkstoffen*. München: Lehrstuhl für Ökologische Chemie und Umweltanalytik der Technischen Universität München, 2000. http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=962143073&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=962143073.pdf.
48. **BASF Ultramid.** BASF. *ULTRAMID*. [Online] 2007. [Zitat vom: 14. 12 2009.] http://fh-kl.de/~albert.meij/Ultramid_brochure.pdf.
49. **Ehrenstein, G.** *Polymer Werkstoffe -Struktur, Eigenschaften, Anwendung*. s.l. : Hanser, 1999 .
50. **Wikipedia.** Caprolactam. *Wikipedia Die freie Enzyklopädie*. [Online] Wikimedia Foundation Inc., 07. 08 2009. [Zitat vom: 27. 01 2010.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Caprolactam>.
51. **Weißbach, W.** *Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. s.l. : Springer Verlag, 2007. ISBN 3834802956.
52. **Wikipedia.** Polyamide. *Wikipedia Die freie Enzyklopädie*. [Online] Wikimedia Foundation Inc., 26. 01 2010. [Zitat vom: 27. 01 2010.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Polyamide>.
53. **BASF Ultrason.** BASF, Produktbeschreibung Ultrason. *BASF The Chemical Company*. [Online] BASF. [Zitat vom: 28. 01 2010.] http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/content/products/engineering_plastics/ultrason;
http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/function/conversions:/publish/common/upload/engineering_plastics/Ultrason_brochure.pdf.
54. **DIN.** *DIN EIN ISO 1043-1: Kunststoffe - Kennbuchstaben und Kurzzeichen - Teil 1: Basis-Polymere und ihre besonderen Eigenschaften*. 2002:06.
55. **BASF.** Plastics Portal Europa. [Online] [Zitat vom: 17. 06 2009.] http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/common/content/products/engineering_plastics/ultradur/fabrication_ultradur.
56. **Rodríguez, Ana.** Polyethersulfon (PESU). [Buchverf.] H. Domininghaus. *Kunststoffe Eigenschaften und Anwendungen*. VDI Buch. s.l. : Springer Verlag, 2004.
57. **Wikipedia.** Amorphes Material. *Wikipedia die freie Enzyklopädie*. [Online] Wikimedia Foundation Inc., 23. 01 2010. [Zitat vom: 28. 01 2010.] http://de.wikipedia.org/wiki/Amorphes_Material.
58. **BASF.** BASF Ultradur. *Technische Kunststoffe-Ultradur*. [Online] BASF, 2010. [Zitat vom: 28. 01 2010.] http://www.plasticsportal.net/wa/plasticsEU~de_DE/portal/show/content/products/engineering_plastics/ultradur.
59. **DIN.** *DIN EN ISO 7792-1: Kunststoffe - Thermoplastische Polyester (TP)-Formmassen Teil 1: Bezeichnungssystem und Basis für Spezifikationen*. 2008:1.
60. **Eipper, Andreas.** Polybutylenterephthalat (PBT). [Buchverf.] Domininghaus. *VDI Buch Kunststoffe Eigenschaften und Anwendungen*. Berlin : Springer, 2008.
61. **Wikipedia.** Konditionierung (Polyamid). *Wikipedia Die freie Enzyklopädie*. [Online] Wikimedia Foundation Inc., 30. 01 2009. [Zitat vom: 27. 01 2010.] [http://de.wikipedia.org/wiki/Konditionierung_\(Polyamid\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Konditionierung_(Polyamid)).

62. **Hellerich, Harsch, Haenle.** *Werkstoff-Führer Kunststoffe*. München : Hanser Verlag, 1989. S. S.27; 77; 333ff.
63. **Stanyl.** Minimieren der Blasenbildung in Steckverbindern aus Stanyl. *Astonishing Stanyl*. [Online] Koninklijke DSM N.V, 2004. [Zitat vom: 17. 06 2009.] http://www.dsm.com/le/de_DE/stanyl/html/connector_blistering.htm.
64. **Potente, H.** *Fügen von Kunststoffen; Grundlagen, Verfahren, Anwendung*. München : Hanser, 2004. Tu Wien.
65. **BASF.** CAMPUS® i. [Online] Software by M-Base Engineering + Software GmbH / www.m-base.de . [Zitat vom: 23. 10 2009.] <http://campus-i.plasticsportal.net/matdb/matdb.php>.
66. **DIN.** *ISO 1628-5: Kunststoffe - Bestimmung der Viskosität von Polymeren in verdünnter Lösung durch ein Kapillarviskosimeter - Teil 5: Thermoplastische Polyester(TP) Homopolymere und Copolymere*. 1998: 03.
67. —. *DIN EN ISO 1133-2 Plastics - Determination of the melt volume-flow rate (MVR) and melt mass-flow rate (MFR) of thermoplastics materials - Part 2: Method for materials sensitive to time-temperature history and/or moisture* . 2009:02.
68. **Kukutschki.** *Werkstoffwahl für die Neuentwicklung eines Kleinkühlkompressors*. s.l. : Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik, TU Graz, 2007. S. 97, Dissertation.
69. **Ruge, J. und Wohlfahrt, H.** *Verarbeitung der Polymerwerkstoffe. Technologie der Werkstoffe*. Braunschweig : Vieweg, 2002.
70. **Bachmann, F.; Russek, U. A.** Rofin. *Schweißen von Kunststoffen mit Hochleistungs-Dioidenlasern*. [Online] 2009. [Zitat vom: 30. 04 2009.] http://www.rofin.de/deutsch/anwendungen/laser-mikro-micro/data/D_Photonics%20West%202002.pdf.
71. **Becker, G.W. und L., Bottenbruch, Binsack, R.** *Technische Thermoplaste. 4. Polyamide*. s.l. : Hanser Verlag, 1998.
72. **Brandt, H. G. und Weiler, H.** *Ullmann`s Enzyklopedie der technischen Chemie: Band 21: Schwefel bis Sprengstoffe*. Weinham : Batholomé, 1982.
73. **Michel, P.** *Schweißverfahren in der Kunststoffverarbeitung - Grundlagen und Aspekte zur Serienfertigung*. Düsseldorf : Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren, 1999. Bd. DVS Berichte Band 203, TU Wien.
74. **Butler, C. A., et al.** An Analysis of Mechanisms Governing Fusion Bonding of Thermoplastic Composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 11, 1998, Bd. 338. <http://jtc.sagepub.com>.
75. **DSM Engineering Plastics B.V.** DSM Engineering Plastics . *DSM Welding*. [Online] 2004. [Zitat vom: 29. 06 2009.] http://www.dsm.com/en_US/html/dep/welding.htm.
76. **Velthuis, Rudi.** *Induction Welding of Fiber Reinforced Thermoplastic Polymer Composites to Metals*. [Hrsg.] IVW. Kaiserslautern : Institut für Verbundwerkstoffe, 2007. Bd. Band 75, TU Wien.
77. **Uebbing.** *Berechnungsmöglichkeiten und Qualitätssicherung beim Vibrationsschweißen*. Paderborn : DVS, 1995. TU WIEN.
78. **Kagan, V.A. und Pinho, G.P.** Laser Transmission Welding of Semicrystalline Thermoplastics - Part II: Analysis of Mechanical Performance of Welded Nylon. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 23, 2004, Bd. 95. DOI: 10.1177/0731684404029360.
79. **Potente, Natrop, Klit Pedersen, Uebbing.** Vergleichende Untersuchung beim Schweißen von glasfaserverstärktem PES. *Der Plastverarbeiter*. 1993, Bd. 6, Juni, S. 26-33. Fachbibliothek für Chemie.
80. **Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).** Institut für Werkstoff-Forschung, Metallische Strukturen und Hybride Werkstoffsysteme Köln- Porz. *DLR Portal*. [Online] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). , 2010. [Zitat vom: 28. 01 2010.] http://www.dlr.de/wf/Portaldata/23/Resources/images/forschung/fsw/fsw2-de_600.gif.

81. Higashiyama, M., Shinoda, T. und Takegami, H. Visualization of material flow phenomenon during friction stir welding. *Journal of Japan Institute of Light Metals*. 2006, Bd. Vol. 56, No. 10, S. 533–537.
82. DIN . *DIN EN ISO 306: Kunststoffe - Thermoplaste - Bestimmung der Vicat-Erweichungstemperatur* . 2004:10.
83. Campus®. CAMPUSplastics | All BASF grades. *Campusplastics* . [Online] CWFG mbH, 1991. [Zitat vom: 03. 02 2010.] <http://www.campusplastics.com/de/brandproducer/BASF/20>.
84. Petzow, G. *Metallographisches, keramographisches, plastographisches Ätzen*. Berlin : Bonträger, 1994.
85. Kerschbaumer, K. *Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften von artfremd geschweißten Kehlnähten an hochfestem TM-Stahl*. Graz : Diplomarbeit am IWS, 2010.
86. DVS Taschenbuch DVS- Merkblätter und Richtlinien . *Fügen von Kunststoffen*. Düsseldorf : DVS Verlag, 2006.
87. DIN. *EN ISO 527 Kunststoffe: Bestimmung der Zugeigenschaften*. Brüssel : Europäisches Komitee für Normung, 1996:04.
88. Lang, R.W. Physik und Werkstoffprüfung der Kunststoffe, WS 02/03. *Skriptum*. Leoben : Institut für Werkstoffkunde und -prüfung der Kunststoffe Montanuniversität Leoben, 2002.
89. DIN. *DIN EN 12814-2: Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen - Teil 2: Zugversuch*. 2000:02.
90. Grellmann, W. und Seidler, S. *Kunststoffprüfung*. München : Hanser Verlag, 2005.
91. DIN. *DIN EN ISO 178: Kunststoffe - Bestimmung der Biegeeigenschaften*. 2006-04.
92. DIN EN ISO, 12814-1. Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen: Teil 1: Biegeversuch. 1999:12.
93. Schmitt-Thomas, Karlheinz G. *Integrierte Schadensanalyse*. Berlin : Springer, 1999. S. S. 98-99; S. 197 . 3-540-61820-1.
94. Michler, Georg H. *Electron Microscopy of Polymers*. Halle : Springer, 2008. 978-3-540-36-350.
95. IWS Integrative Laboratory Materials, Fracture Surfaces. *IWS Integrative Laboratory Materials, Fracture Surfaces*. Graz : s.n.
96. Fels Werkstoffanalytik. Fels Werkstoffanalytik - Mineralbestimmung: EDX-Analysen . www.reclot.de. [Online] [Zitat vom: 04. 11 2009.] <http://www.reclot.de/kapitel/kurs.htm>.
97. Minitab. *Einführung in Minitab 15*. s.l. : Minitab Inc., 2007.
98. DIN. *DIN EN 12814-1: Prüfung von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen - Teil 1: Biegeversuch*. 1999-12.
99. Uni Kassel Vorlesung Keramische Werkstoffe. Mechanische Charakterisierung. *Universität Kassel*. [Online] 25. 04 2001. [Zitat vom: 07. 01 2010.] http://www.uni-kassel.de/fb15/ifw/qualitaet/qveroeff/vorlesung-keramik/keramik_I_mech_charak.pdf.
100. Wende, A., Moebes, W. und MArten, H. *Glasfaserverstärkte Plaste*. Leipzig : VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1969. Bib TU Wien.
101. Tsang, K.Y., DuQuesnay, D.L und Bates, P.J. Fatigue properties of vibration-welded nylon 6 and nylon 66 reinforced with glass fibres. *Composites: Part B 39 (2008) 396–404*. 39, 2008, S. 396–404.
102. Pflamm- Jonas, T. Auslegung und Dimensionierung von kurzfaserverstärkten Spritzgussbauteilen. *Dissertation Technische Universität Darmstadt*. Darmstadt : s.n., 2001. S. 4f. http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=962736872&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=962736872.pdf.
103. Johannaber, F. und Michaeli, W. *Handbuch Spritzgießen*. s.l. : Hanser Verlag.
104. Mills, N.J. *Plastics: Microstructure, Properties and Applications*. Birmingham. UK : Edward Arnold, 1986.
105. Hasenauer, J., et al. Top in Form 10 Konstruktions Tips. *Materialauswahl - Die richtige Wahl*. [Online] DuPont, 2009. [Zitat vom: 27. 05 2009.] http://plastics.dupont.com/myplastics/Mediator?id=516&locale=de_DE.

106. **Mayer, J., et al.** Faserverbundwerkstoffe. [Buchverf.] E. Wintermantel und S.-W. Ha. *Medizintechnik*. Berlin : Springer, 2009. <http://www.springerlink.com/content/mnm44334582u2w24/>.
107. **Mills, N.J.** *Plastics Microstructure, Properties, Applications*. Salisbury, UK : Edward Arnold, 1986. IWS Bibliothek.
108. **Mishra Rajiv S., Mahoney Murray W.** *Friction Stir Welding and Processing*. s.l. : ASM International, 2007. Google books.
109. **Kuriykov, Künkel, Ehrenstein.** Vibrationsschweißen- Die entscheidende Sekunde für die Schweißnahtqualität. *Schweißen und Schneiden*. 2005, Bd. 57, 10, S. 569ff.
110. **Hinrichsen, J.** *Morphologie und Bruchverhalten medienbeaufschlagter Überlappschweißnähte aus Polyethylen hoher Dichte*. Fachbereich Bauingenieurwesen, Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. 2003. http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=975298747&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=975298747.pdf.
111. **Hahn, F.** Kapitel 11: Kunststoffe. [Buchverf.] W. Seidel. *Werkstofftechnik Werkstoffe-Eigenschaften- Prüfung- Anwendung*. München : Hanser Verlag, 2007.
112. **Figner, G.** *Friction Stir Spot Welding an Aluminium- und Aluminium/ Stahl-Überlappverbindungen im Karosseriebau*. Graz : Diplomarbeit, 2007.
113. **IWS Institut für Werkstoffkunde und Schweißtechnik.** Kapitel 9: Kunststoffe. [Buchverf.] Cerjak. *Skriptum Werkstoffkunde*. Graz : s.n., 2006.
114. **Möginger, B.** *Einfluß der Verarbeitung auf Morphologie und Deformationsverhalten von Polybutylenterephthalat (PBT)*. s.l. : Fakultät Verfahrenstechnik der Universität Stuttgart, 1992. Dissertation.
115. **Arcelor Mittal.** TRIP-Stähle (TRansformation Induced Plasticity) . *Arcelor Mittal Automotive Worldwide*. [Online] 09. 03 2009. [Zitat vom: 19. 01 2010.] http://www.arcelormittal.com/automotive/sheets/catalogue.pl?language=DE&id_sheet=B&fn=.
116. **Wikipedia.** Amide. *Wikipedia Die freie Enzyklopädie*. [Online] Wikimedia Foundation Inc., 08. Januar 2010. [Zitat vom: 27. 01 2010.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Amide>.
117. —. Reptation. *Wikipedia Die freie Enzyklopädie*. [Online] Wikimedia Foundation Inc., 12. 01 2009. [Zitat vom: 03. 02 2010.] <http://de.wikipedia.org/wiki/Reptation>.

11 Anhang

11.1 Spannungs-Dehnungsdiagramme Zugversuche Grundmaterial

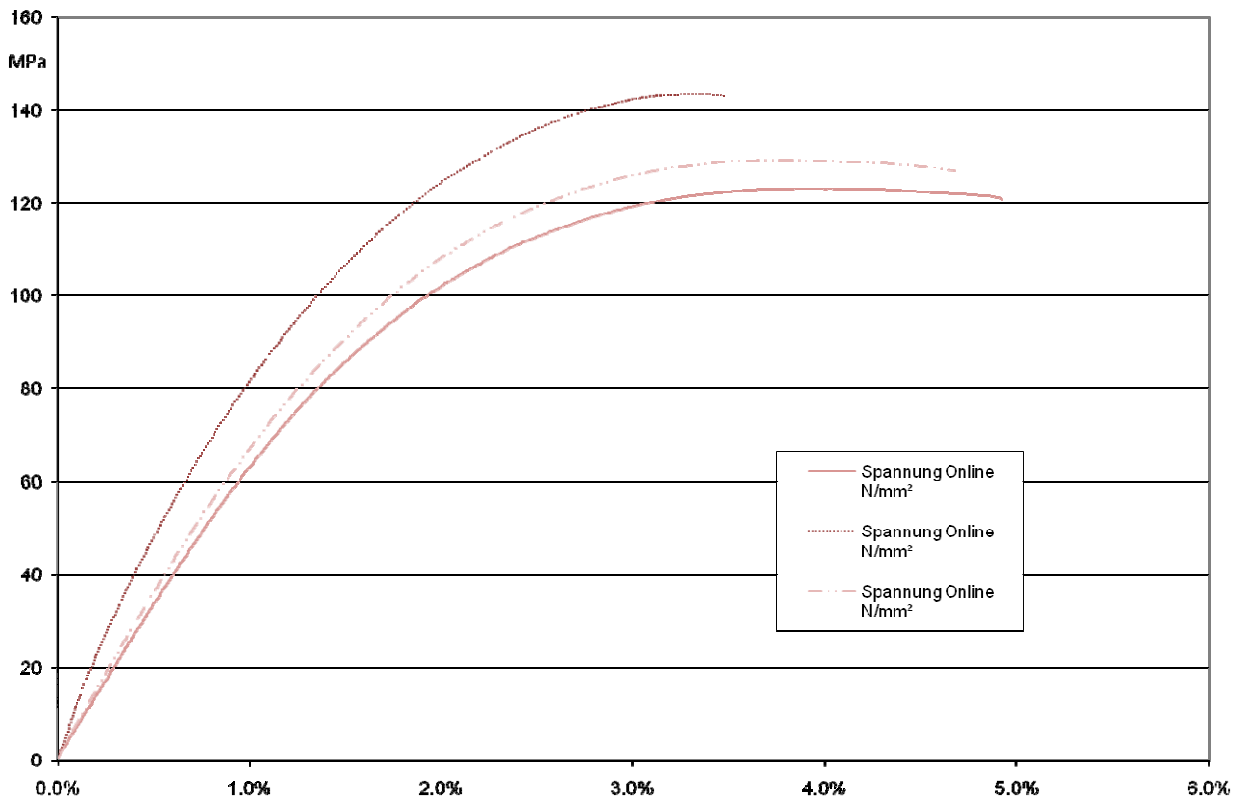


Abbildung 162: Spannungs-Dehnungsdiagramm Ultramid

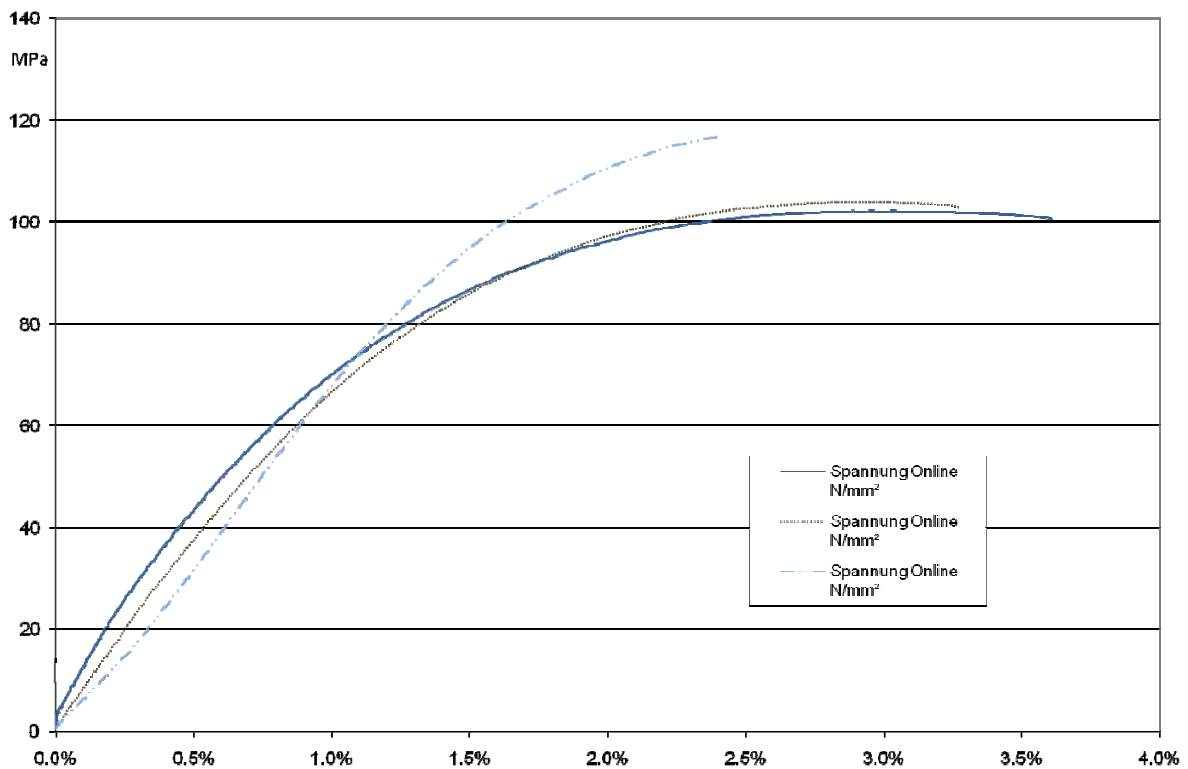


Abbildung 163: Spannungs-Dehnungsdiagramm Ultradur

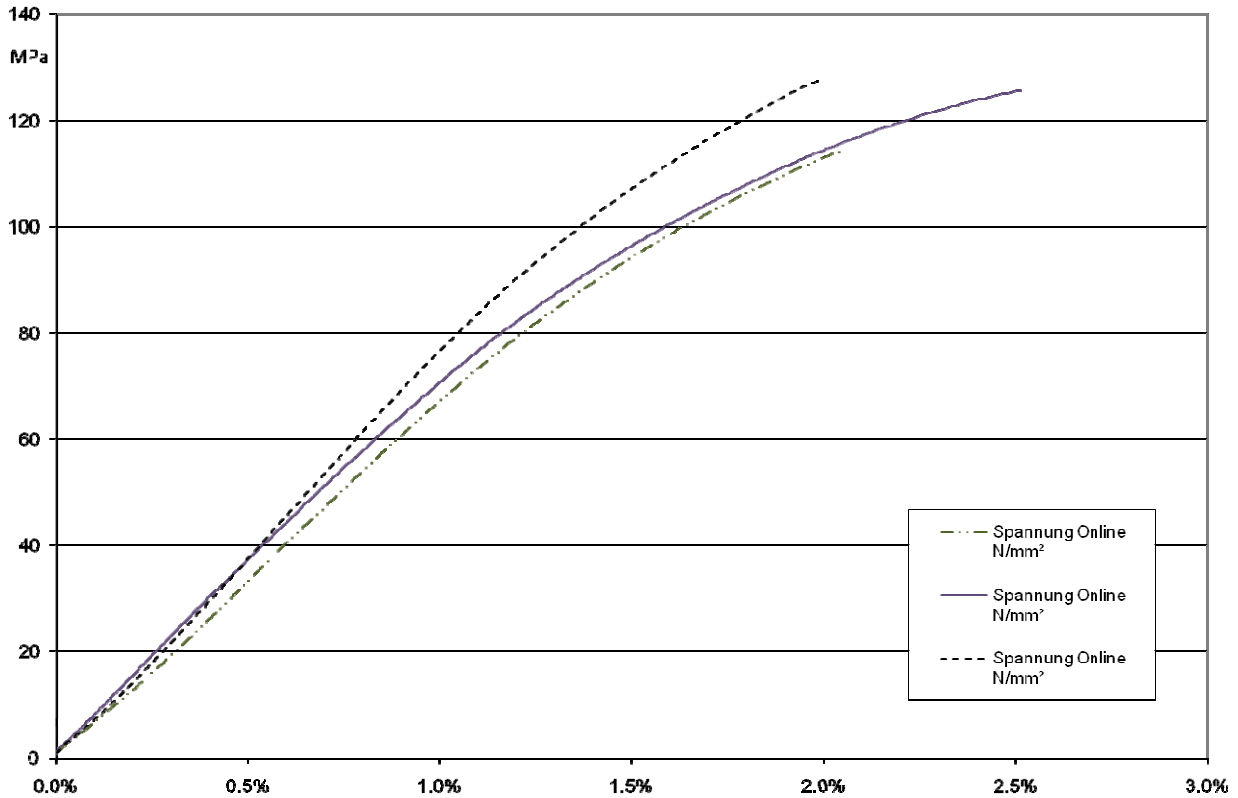


Abbildung 164: Spannungs-Dehnungsdiagramm Ultrason

11.2 Einfluss des Herstellungsprozesses auf die Faserorientierung und Zugeigenschaften

Vereinfachend kann angenommen werden, dass sich die in der thermoplastischen Formmasse enthaltenen Kurzfasern beim Spritzgießen in Fließrichtung ausrichten. Abbildung 165 verdeutlicht die grobe Ausrichtung der Fasern beim Spritzgießen einer Platte, ähnlich der in dieser Diplomarbeit verwendeten Grundwerkstoffplatten.

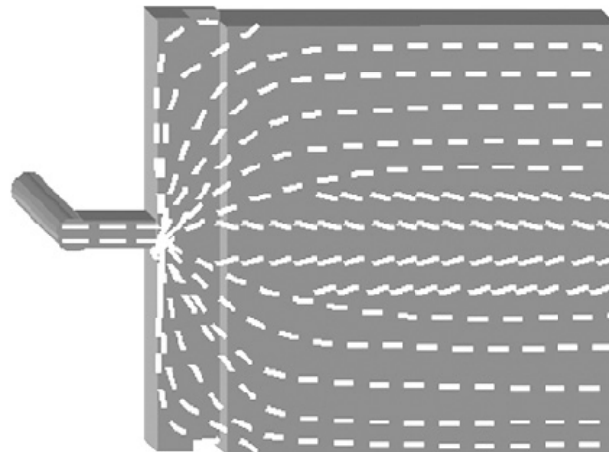


Abbildung 165: Fließrichtung und vorherrschende Glasfaserorientierung für eine spritzgegossene Platte [101 S. 397]

Da die Faserorientierung laut Pflamm-Jonas [102] das Geschwindigkeitsprofil der Schmelze beim Füllen des zur Verfügung stehenden Hohlraumes widerspiegelt, bilden sich bei kurzfaserverstärkten Bauteilen innerhalb des Wandquerschnittsprofils einer Platte Zonen unterschiedlicher Faserorientierungen aus. Diese sind in Abbildung 166 zu erkennen. In den beiden Randbereichen (Scherberei-

chen), welche zusammen den wesentlich größten Bereich bilden, entspricht die Faserrichtung der Strömungsrichtung, wie in Abbildung 165 dargestellt. In den Wandzonen verteilen sich die Fasern statistisch, während die Kernzone von senkrecht zur Fließrichtung orientierten Fasern gekennzeichnet ist.

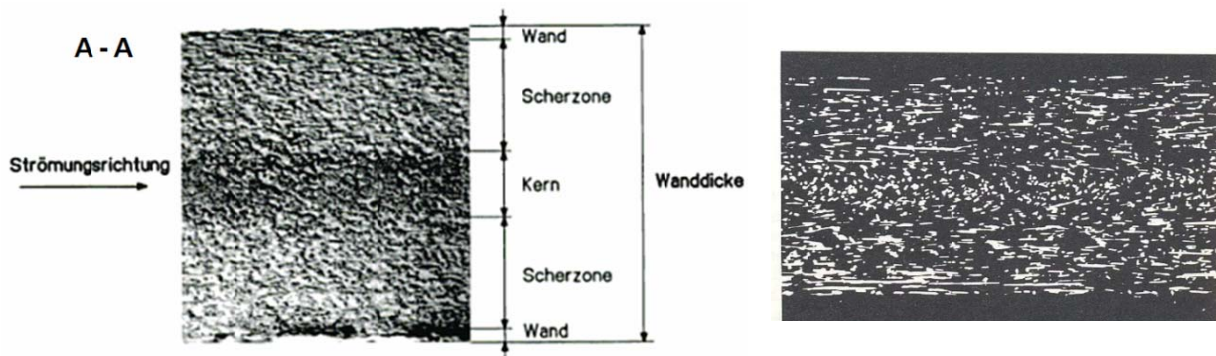


Abbildung 166: Faserorientierung in einer Spritzgegossenen Platte, Wandquerschnittsaufnahme [103 S. 387]; Längsschnitt durch ein PP- Spritzgußteil (20% glasfaserverstärkt) [104 S. 66]

Die Faserorientierung besitzt großen Einfluss auf die mechanischen Werte. Je nachdem, ob Zugprüfproben quer zur Fließrichtung oder in Fließrichtung entnommen werden, zeigen sich unterschiedliche Festigkeitswerte. Proben, welche in Fließrichtung entnommen wurden, zeigen deutlich bessere Zugfestigkeitswerte, einen höheren Biege-E-Modul sowie Schlagzähigkeitswerte³⁹.

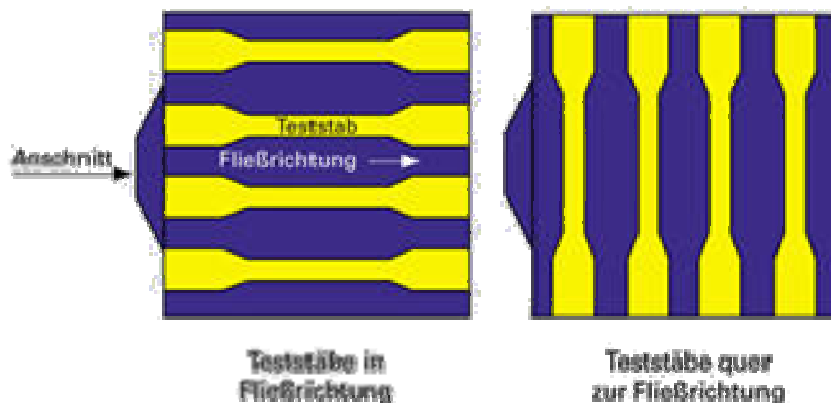


Abbildung 167: Probenentnahme: Teststäbe in und quer zur Fließrichtung der spritzgegossenen Platten [105]

Abbildung 168 zeigt die Glasfaserorientierung in einer Platte aus PA6 mit 35% Glasfaseranteil mit Bandanguss über die Schmalseite. Die Fasern stellen sich in Strömungsrichtung ein, dabei orientieren sie sich in Dehnströmungen stärker als in Scherströmungen. In Abbildung 168 liegen die Fasern in den Bildern 1 und 3 senkrecht zur Füllrichtung durch die Dehnströmung im Platteninneren; Scherströmungen hingegen wirken rand- und oberflächennah [49 S. 133].

³⁹ Zugprüfproben aus PET, 30% glasfaserverstärkt, welche aus einer spritzgegossenen Platte quer zur Fließrichtung entnommen wurden zeigten einen Festigkeitsabfall von 32% im Vergleich zu jenen Proben, welche in Fließrichtung entnommen wurden. Der Biege-E-Modul nahm um 43% ab, die Schlagzähigkeit sogar um 53%. [105]

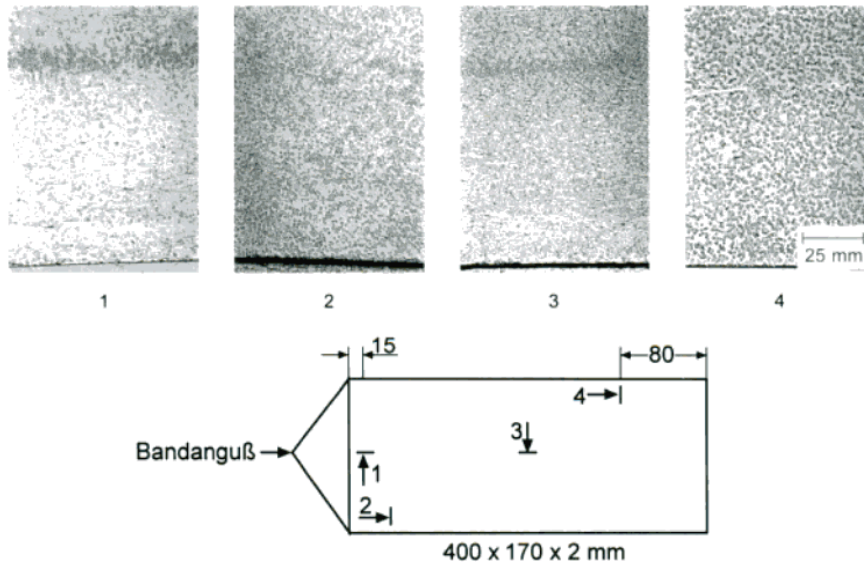


Abbildung 168: Glasfaserorientierung in einer Platte aus PA6 [49]

Abbildung 169 zeigt die resultierende Faserorientierungsverteilung im spritzgegossenen Bauteil von einem alternativen Blickwinkel betrachtet. Auch hier können Bereiche ähnlicher Faserorientierung unterschieden werden [106 S. 328].

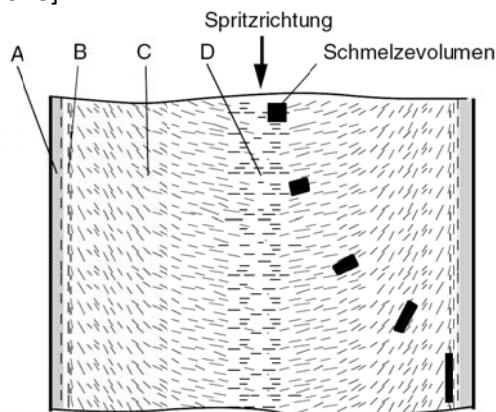


Abbildung 169: Resultierende Faserorientierungsverteilung. A: Faserarme Schicht B: Randzone mit Faserausrichtung parallel zur Bauteiloberfläche C: Übergangsbereich D: Kernzone mit Faserorientierung senkrecht zur Flussrichtung [106 S. 328]

Der Verarbeitungsprozess im Extruder hat auch einen Einfluss auf die Faserlänge im Bauteil. So liegen die Fasern vor der Verarbeitung meist in einer Länge von 3mm vor, und werden durch die hohen Beanspruchungen in der Scherströmung im Extruder verrießen, so dass schlussendlich eine Faserlängenverteilung wie in Abbildung 170 vorliegt [107].

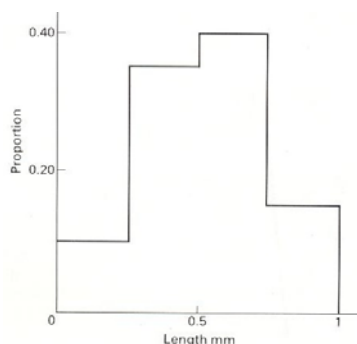


Abbildung 170: Faserlängenverteilung in einem extrudierten Bauteil. Ausgangslänge der Fasern: 3mm [107]

11.3 Datenblätter Kunststoff

11.3.1 Ultramid

Ultramid® B3WG6 | PA6-GF30

Produkttext

Glasfaserverstärkte und wärmealterungsbeständige Spritzgussmarke z.B. für Kfz-Saugrohre und Pedale.

Rheologische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Schmelzevolumenrate	50 / *	cm ³ /10min	ISO 1133
Temperatur	275 / *	°C	ISO 1133
Belastung	5 / *	kg	ISO 1133
Mechanische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	9500 / 6200	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchspannung	185 / 115	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchdehnung	3.5 / 8	%	ISO 527-1/-2
Charpy-Schlagzähigkeit (+23°C)	95 / 110	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit (-30°C)	80 / -	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (+23°C)	15 / 30	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (-30°C)	11 / -	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Thermische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Schmelztemperatur (10°C/min)	220 / *	°C	ISO 11357-1/-3
Formbeständigkeitstemperatur (1.8 MPa)	210 / *	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur (0.45 MPa)	220 / *	°C	ISO 75-1/-2
Vicat-Erweichungstemperatur (50°C/h 50N)	220 / *	°C	ISO 306
Längenausdehnungskoeffizient (parallel)	0.225 / *	E-4/°C	ISO 11359-1/-2
Längenausdehnungskoeffizient (senkrecht)	0.65 / *	E-4/°C	ISO 11359-1/-2
Brennbarkeit bei nominal 1.5mm	HB / *	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	1.5 / *	mm	IEC 60695-11-10
UL Registrierung	UL / *	-	-
Brennbarkeit bei Dicke h	HB / *	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	0.7 / *	mm	IEC 60695-11-10
UL Registrierung	UL / *	-	-
Brennbarkeit-Sauerstoff-Index	22.5 / *	%	ISO 4589-1/-2
Elektrische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Dielektrizitätszahl (1 MHz)	3.8 / 6.8	-	IEC 60250
Dielektr. Verlustfaktor (100Hz)	230 / 2200	E-4	IEC 60250
Dielektr. Verlustfaktor (1 MHz)	230 / 2200	E-4	IEC 60250
Spezifischer Durchgangswiderstand	1E13 / 1E10	Ohm*m	IEC 60093
Spezifischer Oberflächenwiderstand	* / 1E10	Ohm	IEC 60093
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	- / 450	-	IEC 60112
Andere Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Wasseraufnahme	6.6 / *	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtigkeitsaufnahme	2.1 / *	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1360 / -	kg/m ³	ISO 1183
Materialspezifische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Viskositätszahl	140 / *	cm ³ /g	ISO 307, 1157, 1628
Probekörper Herstellbedingungen	Wert	Einheit	Prüfnorm
Spritzgießen Massetemperatur	280	°C	ISO 294
Werkzeugtemperatur	80	°C	ISO 10724
Spritzgeschwindigkeit	300	mm/s	ISO 294
Rheologische Berechnungsparameter	Wert	Einheit	Prüfnorm
Wärmeleitfähigkeit der Schmelze	0.21	W/(m K)	-
Spez. Wärmekapazität der Schmelze	2130	J/(kg K)	-
Ejection-Temperatur	160	°C	-

11.3.2 Ultradur

Ultradur® B 4300 G6 | PBT-GF30

Produkttext

Spritzgussmarke mit 30 % Glasfasergehalt, für technische Teile, steif, zäh und dimensionsstabil, z.B. für Kfz-Scheibenwischerbügel, Platinen, Gehäuse, Konsolen, Kontaktträger u. Abdeckungen.

Abgekürzte Bezeichnung gemäß ISO 1043-1: PBT

Abgekürzte Bezeichnung gemäß ISO 7792-1:

Formmasse ISO 7792-PBT, MGHLNR, 11-100, GF30

Rheologische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Schmelzevolumenrate	11	cm ³ /10min	ISO 1133
Temperatur	250	°C	ISO 1133
Belastung	2.16	kg	ISO 1133
Verarbeitungsschwindung parallel	0.3	%	ISO 2577, 294-4
Verarbeitungsschwindung senkrecht	1.1	%	ISO 2577, 294-4
Mechanische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	9800	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchspannung	140	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchdehnung	3	%	ISO 527-1/-2
Zug-Kriechmodul (1000h)	7500	MPa	ISO 899-1
Charpy-Schlagzähigkeit (+23°C)	70	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit (-30°C)	74	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (+23°C)	9.5	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Thermische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Schmelztemperatur (10°C/min)	223	°C	ISO 11357-1/-3
Formbeständigkeitstemperatur (1.8 MPa)	215	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur (0.45 MPa)	220	°C	ISO 75-1/-2
Längenausdehnungskoeffizient (parallel)	0.25	E-4/°C	ISO 11359-1/-2
Brennbarkeit bei nominal 1.5mm	HB class		IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	1.6	mm	IEC 60695-11-10
UL Registrierung	UL -		-
Brennbarkeit bei Dicke h	HB class		IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	0.4	mm	IEC 60695-11-10
UL Registrierung	UL -		-
Brennbarkeit-Sauerstoff-Index	19.5	%	ISO 4589-1/-2
Elektrische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Dielektrizitätszahl (100Hz)	4	-	IEC 60250
Dielektrizitätszahl (1 MHz)	3.8	-	IEC 60250
Dielekt. Verlustfaktor (100Hz)	25	E-4	IEC 60250
Dielekt. Verlustfaktor (1 MHz)	170	E-4	IEC 60250
Spezifischer Durchgangswiderstand	>1E13	Ohm*m	IEC 60093
Spezifischer Oberflächenwiderstand	1E13	Ohm	IEC 60093
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	375	-	IEC 60112
Andere Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Wasseraufnahme	0.4	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtigkeitsaufnahme	0.2	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1530	kg/m ³	ISO 1183
Materialspezifische Eigenschaften	Wert	Einheit	Prüfnorm
Viskositätszahl	102	cm ³ /g	ISO 307, 1157, 1628
Probekörper Herstellbedingungen	Wert	Einheit	Prüfnorm
Spritzgießen Massetemperatur	260	°C	ISO 294
Werkzeugtemperatur	80	°C	ISO 10724
Spritzgeschwindigkeit	200	mm/s	ISO 294
Rheologische Berechnungsparameter	Wert	Einheit	Prüfnorm

Dichte der Schmelze	1300 kg/m ³	-
Wärmeleitfähigkeit der Schmelze	0.22 W/(m K)	-
Spez. Wärmekapazität der Schmelze	1770 J/(kg K)	-
Ejection-Temperatur	180 °C	-

11.3.3 Ultrasen

Ultrasen® E 2010 G6 UN | PES-GF30

Produkttext

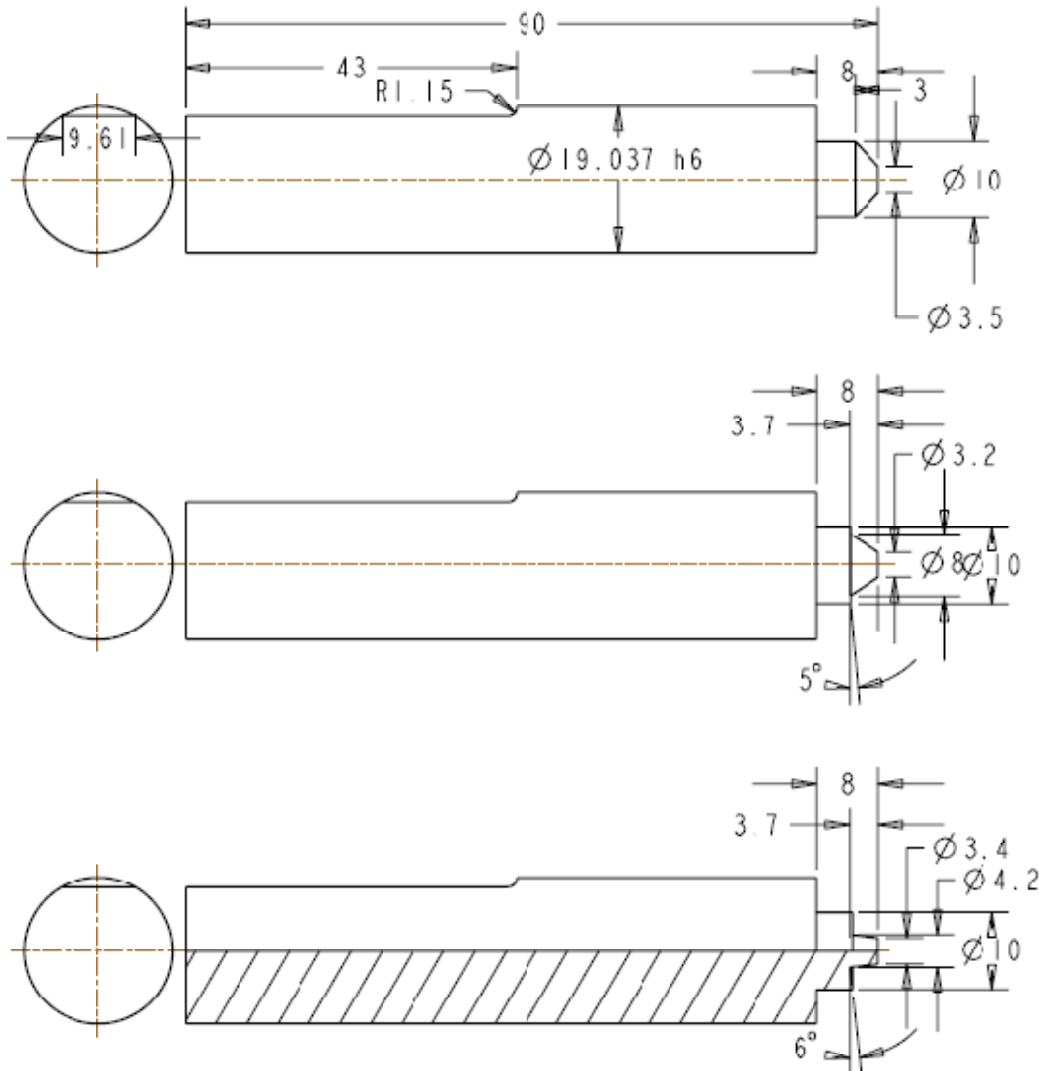
Mittelviskose Spritzgussmarke mit hoher Steifigkeit und Festigkeit, 30 % glasfaserverstärkt.
Abgekürzte Bezeichnung gemäß ISO 1043-1: PESU-GF

Rheologische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Schmelzevolumenrate	25 / *	cm ³ /10min	ISO 1133
Temperatur	360 / *	°C	ISO 1133
Belastung	10 / *	kg	ISO 1133
Verarbeitungsschwindigkeit parallel	0.3 / *	%	ISO 2577, 294-4
Verarbeitungsschwindigkeit senkrecht	0.6 / *	%	ISO 2577, 294-4
Mechanische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Zug-Modul	- / 10000	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchspannung	- / 140	MPa	ISO 527-1/-2
Bruchdehnung	- / 1.9	%	ISO 527-1/-2
Zug-Kriechmodul (1h)	* / 9000	MPa	ISO 899-1
Zug-Kriechmodul (1000h)	* / 8300	MPa	ISO 899-1
Charpy-Schlagzähigkeit (+23°C)	- / 42	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy-Schlagzähigkeit (-30°C)	- / 45	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (+23°C)	- / 8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy-Kerbschlagzähigkeit (-30°C)	* / 8	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Thermische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Glasübergangstemperatur (10°C/min)	225 / *	°C	ISO 11357-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur (1.8 MPa)	220 / *	°C	ISO 75-1/-2
Formbeständigkeitstemperatur (0.45 MPa)	224 / *	°C	ISO 75-1/-2
Vicat-Erweichungstemperatur (50°C/h 50N)	217 / *	°C	ISO 306
Längenausdehnungskoeffizient (parallel)	0.15 / *	E-4/°C	ISO 11359-1/-2
Brennbarkeit bei nominal 1.5mm	V-0 / *	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	1.6 / *	mm	IEC 60695-11-10
UL Registrierung	UL / *	-	-
Brennbarkeit bei Dicke h	V-0 / *	class	IEC 60695-11-10
geprüfte Probekörperdicke	0.4 / *	mm	IEC 60695-11-10
UL Registrierung	UL / *	-	-
Brennbarkeit-Sauerstoff-Index	44.5 / *	%	ISO 4589-1/-2
Elektrische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Dielektrizitätszahl (100Hz)	* / 4.3	-	IEC 60250
Dielektrizitätszahl (1 MHz)	* / 4.3	-	IEC 60250
Dielekt. Verlustfaktor (100Hz)	* / 20	E-4	IEC 60250
Dielekt. Verlustfaktor (1 MHz)	* / 100	E-4	IEC 60250
Spezifischer Durchgangswiderstand	* / >1E13	Ohm*m	IEC 60093
Elektrische Durchschlagfestigkeit	* / 37	kV/mm	IEC 60243-1
Vergleichszahl der Kriechwegbildung	* / 125	-	IEC 60112
Andere Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Wasseraufnahme	1.6 / *	%	Ähnlich ISO 62
Feuchtigkeitsaufnahme	0.6 / *	%	Ähnlich ISO 62
Dichte	1600 / -	kg/m ³	ISO 1183
Materialspezifische Eigenschaften	tr. / cond.	Einheit	Prüfnorm
Viskositätszahl	56 / *	cm ³ /g	ISO 307, 1157, 1628
Probekörper Herstellbedingungen	Wert	Einheit	Prüfnorm
Spritzgießen Massetemperatur	370	°C	ISO 294
Werkzeugtemperatur	170	°C	ISO 10724
Spritzgeschwindigkeit	200	mm/s	ISO 294
Nachdruck	80	MPa	ISO 294
Rheologische Berechnungsparameter	Wert	Einheit	Prüfnorm

Dichte der Schmelze	1410	kg/m ³	-
Wärmeleitfähigkeit der Schmelze	0.24	W/(m K)	-
Spez. Wärmekapazität der Schmelze	1740	J/(kg K)	-
Ejection-Temperatur	205	°C	-

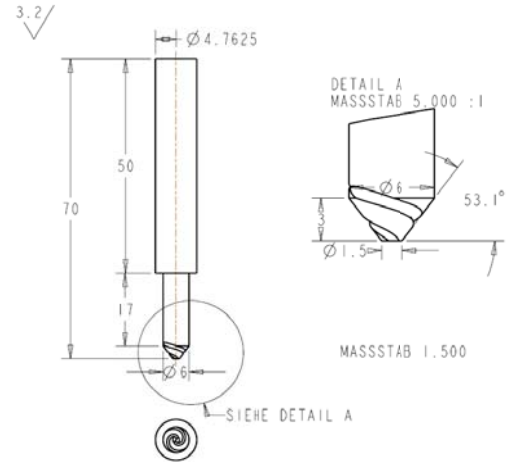
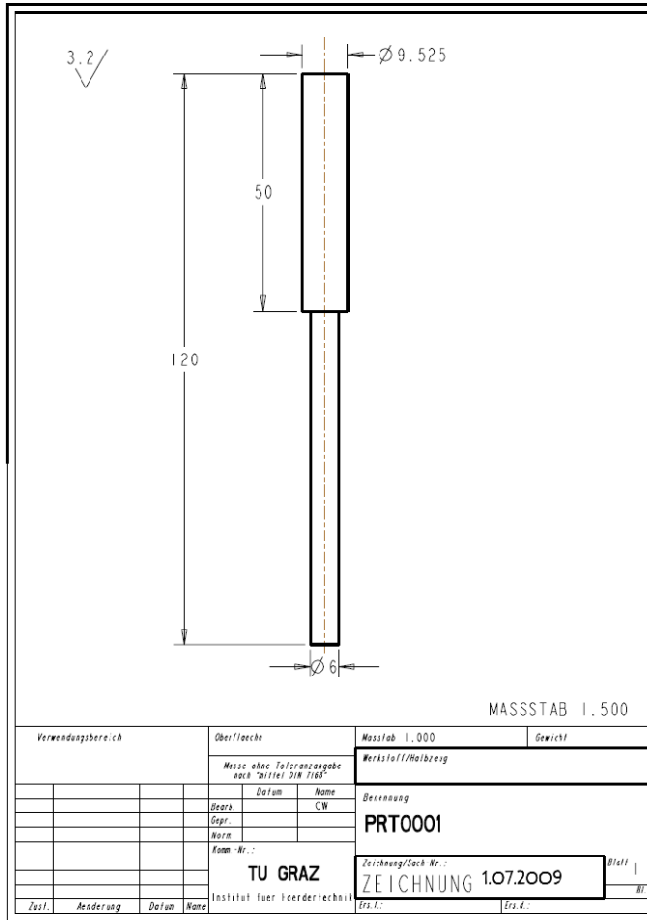
11.4 Konstruktionszeichnungen

11.4.1 Konventionelles Rührreibschweißwerkzeug 1, 2 und 3



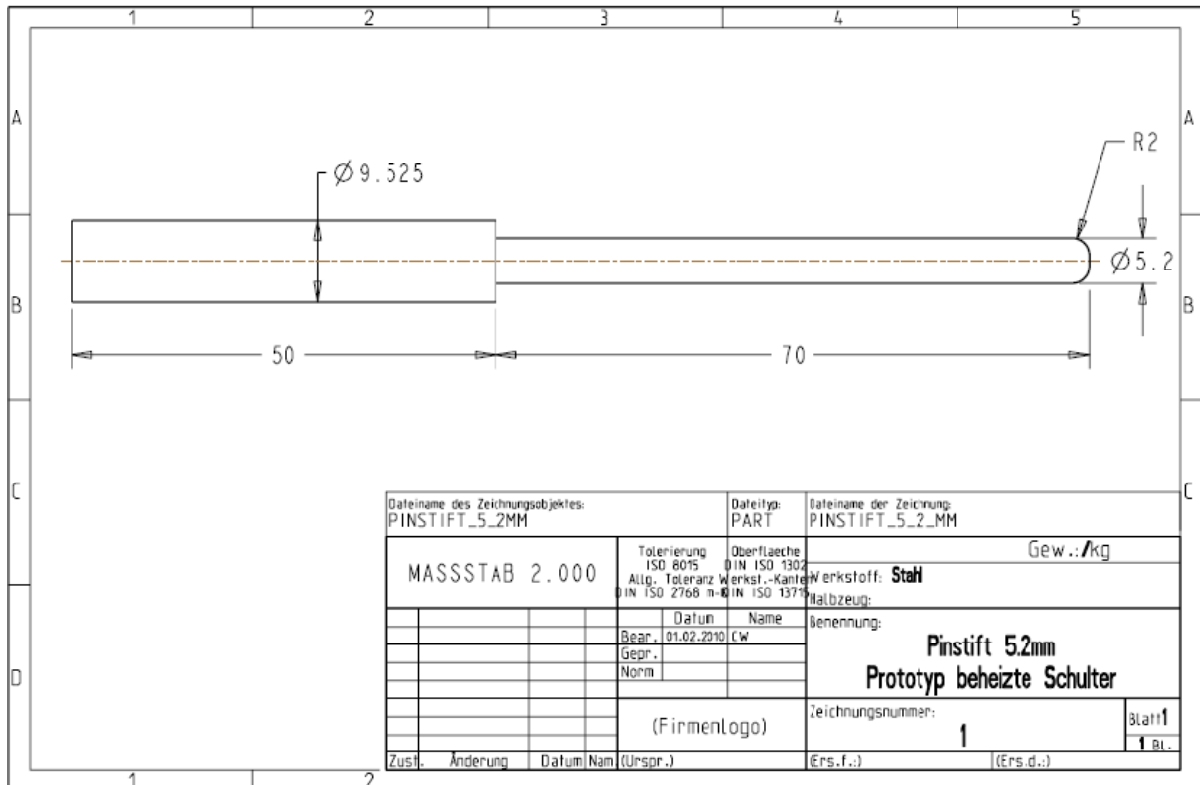
Dateiname des Zeichnungsobjektes: KONVENTIONELLEPINS		Dateityp: ASSEM	Dateiname der Zeichnung: KONV_FSW	
Tolerierung ISO 8015 Allg. Toleranz DIN ISO 2768 m-0		Oberfläche DIN ISO 1302 Werkst.-färbung DIN ISO 13711	Maßstab 1.000	Gew.: 7kg
Datum		Name	Werkstoff: Boehler N395	
Bear. 20.01.2010 wachler		Halbzeug:		
Gepr.:		Benennung: Konventionelle FSW-Werkzeuge		
Norm:		MASSSTAB 1:500		
(FirmenLogo)		Zeichnungsnummer: 1		Blatt 1 1 Bl.

11.4.2 Adjustable Pin für Prototyp Heizplatte

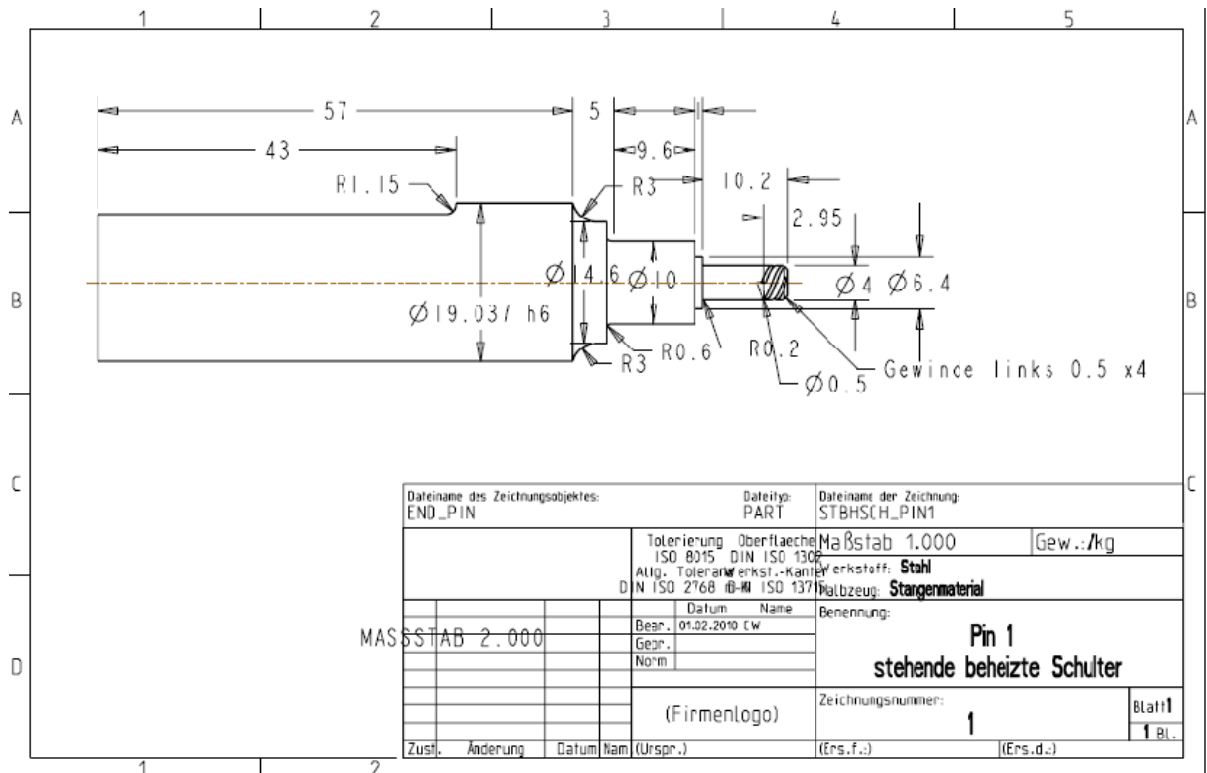


te

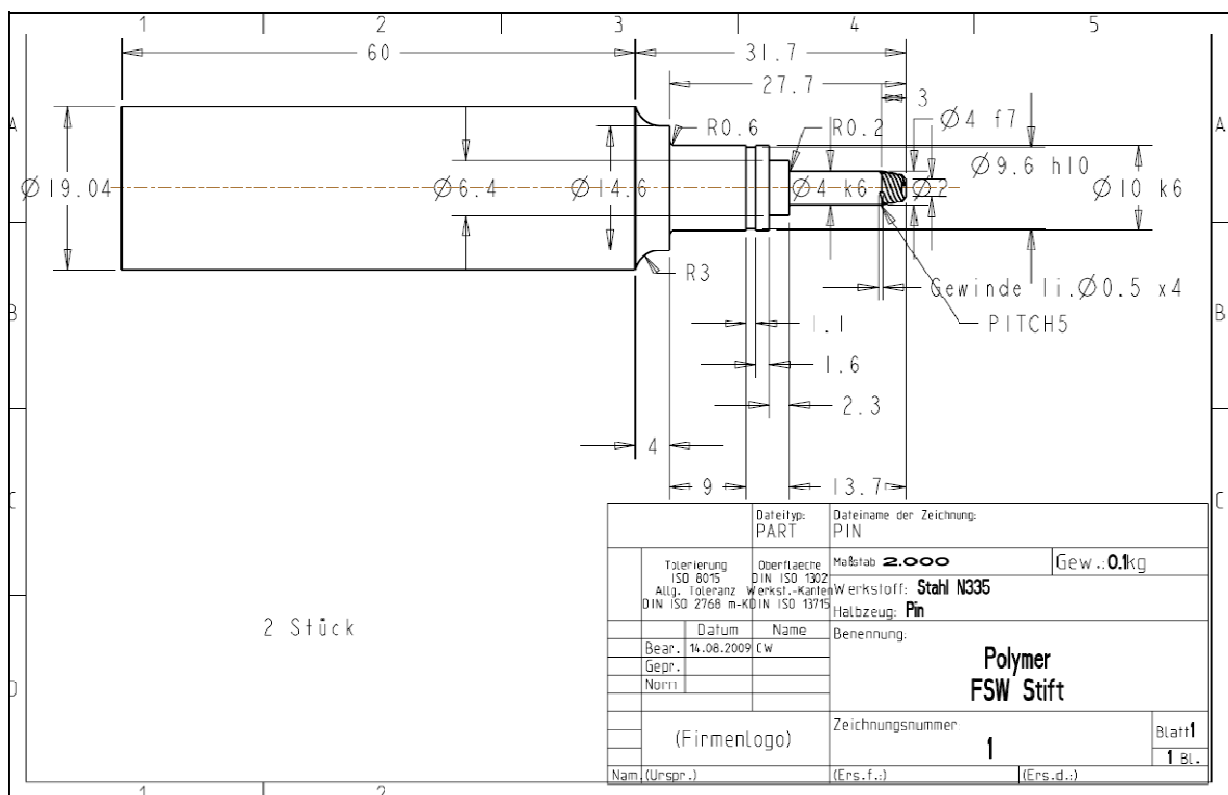
11.4.3 Pinstift Ø5.2mm für Prototyp beheizte Schulter



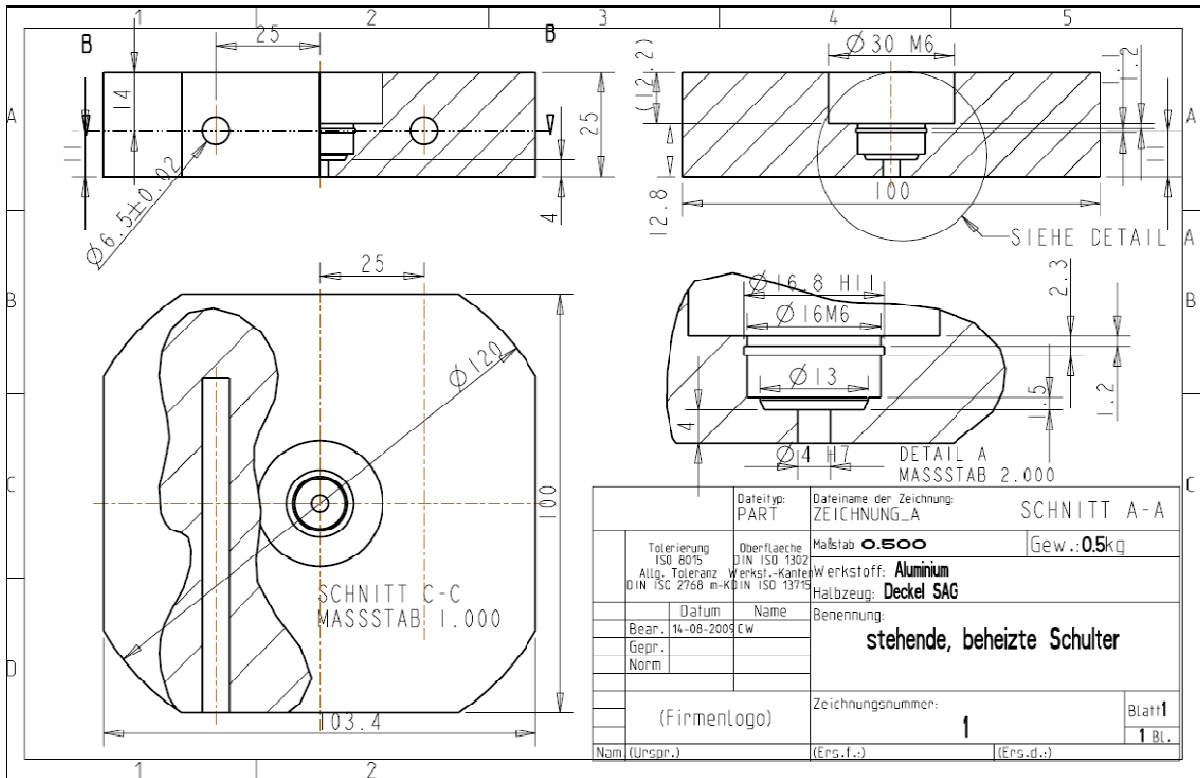
11.4.4 Pin 1 für stehende, beheizte Schulter



11.4.5 Pin 2 für stehende, beheizte Schulter



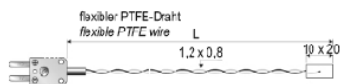
11.4.6 Stehende, beheizte Schulter



11.5 Wärmeeinbringung und Temperaturmessung

11.5.1 Folienfühler

B+B Thermotechnik



Beschreibung Description Range	Temperaturbereich [mm]	Länge Length	∅ [mm]	T90	Art.-No.	Nettopreis Net price
Folienfühler, selbstklebend Adhesive foil probe	-50... +250°C	1000 Litze wire	10x20	12	0644 1401	€ 28,00

11.5.2 Heizpatrone



Elektrowärmetechnik und Messtechnik
 8020 Graz, Sigmundstadt 1 1070 Wien, Neubaugasse 25
 ☎ 0310 / 71-16-51 ☎ 01 / 523-32-29
 Fax: 0310 / 71-16-519 Fax 01 / 523-32-299

Besuchen Sie uns auch im Internet unter: <http://www.e-loos.at>
 oder kontaktieren Sie uns unter office@e-loos.at

Technische Daten:

Patronenmantel

Chrom-Nickel-Stahl X 10 CrNiTi 18 9, Werkstoff Nr. 1.4541, Gefüge austenitisch, Patronenboden gas- und flüssigkeitsdicht verschweißt (< 500 bar), Temperaturbelastung max. 750° C, Manteloberfläche: spitzenlos auf Feintoleranz geschliffen.

Heizleiter

NiCr 8020, Werkstoff Nr. 2.4869, Schmelzpunkt 1400° C.

Heizleiterträger

Reines Magnesiumoxid, hochverdichtet

Toleranzen

Durchmesser: -0,02 mm bis -0,08 mm bei metrischem Durchmesser
 +0,05 mm vom Soll Durchmesser bei Durchmessern in inch
 (1/4" = 6,22 mm, 5/16" = 7,87 mm,
 3/8" = 9,40 mm, 1/2" = 12,57 mm,
 5/8" = 15,75 mm).

Länge: ± 1,5 %, mindestens jedoch ± 2 mm
 (wenn nicht besonders vereinbart).

Leistung: ± 10 %.

Grenzwerte

Spannung: bis 400 V.

max. Strom bei Durchmesser

Ø mm	6,5	8	10	12,5	16	20
A	1,6	2	6	8	10	16
Länge max. mm	100	130	160	200	300	300

Hochleistungsheizpatronen der Typenreihen HLPL werden bis 1,5 m Länge nach Kundenauftrag gefertigt.

Durchmesser: metrisch und in inch nach Typenliste.

Leistung: Minimal- und Maximalwerte sind von den Patronenabmessungen abhängig.

Ableitstrom: < 0,5 mA

Oberflächenbelastung

Mantel: ca. 50 W/cm²

Betriebs-

temperatur: ca. 750° C am Mantel

Unbeheizte Enden

Die Heizpatronen sind je nach Durchmesser am Kopfende zwischen 6 mm und 12 mm, am Bodenende zwischen 4 mm und 8 mm unbeheizt.

Anschlüsse

Bei Patronen über 60 mm Länge, Anschlußkopf aus Keramik Typ KER 221, DIN 40685. Patronen, die kürzer als 60 mm sind, haben keinen Keramikkopf. Die Anschlußseite ist mit einer Keramikscheibe abgeschlossen. Die starren Reinrikelanschlußdrähte sind bei beiden Ausführungen ca. 30 mm lang.

Endprüfung

Stückprüfung analog VDE 720.

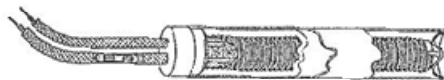


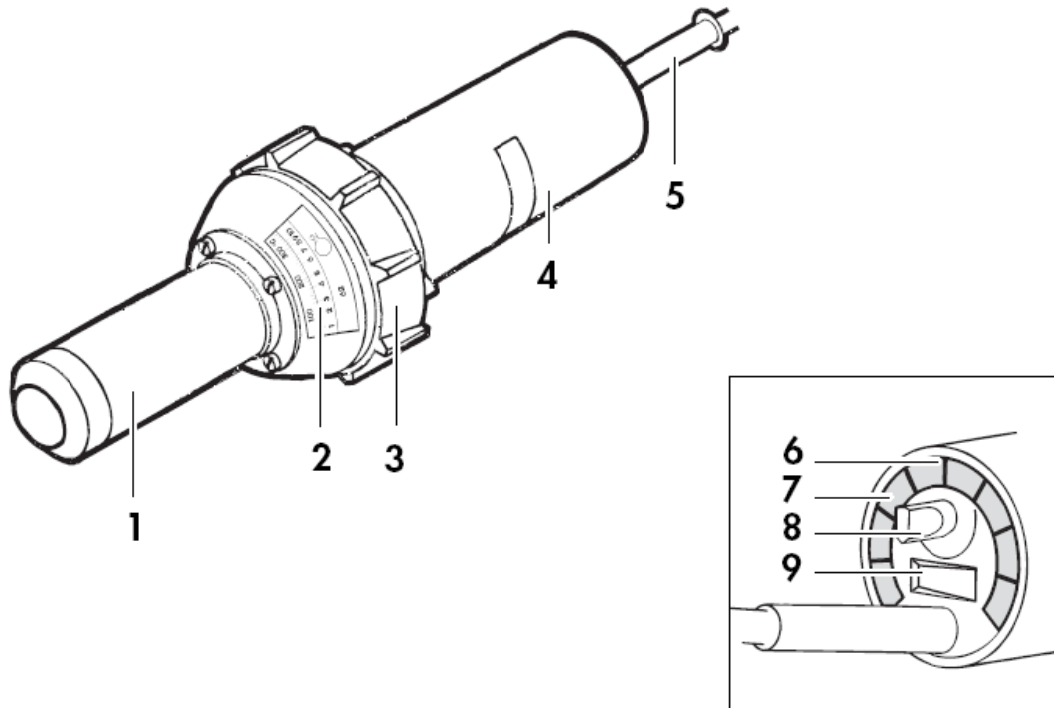
Abb. 4.1

Verdichtete Heizpatronen Typ HLF haben einen Tragkörper, der zentrisch in geringem Abstand vom Rohrmantel angeordnet ist. Der Heizleiter aus der hitzebeständigen Legierung NiCr 8020 ist in einer Lage außen um den Tragkörper gewickelt. Der Zwischenraum ist mit reinem Metalloxid gefüllt und hochverdichtet.

Die Heizelemente haben einen gasdicht eingeschweißten Patronenboden, der Mantel ist auf Feintoleranz geschliffen. Hochleistungsheizpatronen sind auch mit Anschlußlitzen nach Abb. 18.2 mit VDE-Zeichen (Zeichengenehmigungsausweis 15785) lieferbar.

11.5.3 Heißluftfön

Triac S der Firma Leister (www.leister.com)



Technische Daten

		Electron							Mistral			
Spannung	[V]	42	120	200	230	230	230	400	120	200	230	230
Frequenz	[Hz]	50/60							50/60			
Leistung	[W]	1000	2700	3000	2300	3400	4500	5500	2700	3000	2300	3400
Temperatur	[°C]	20 – 650							20 – 650			
	[°F]	70 – 1200							70 – 1200			
Luftmenge (20°C)	[l/min]	320			500				350			
	[cfm]	11.3			17.7				12.4			
Gewicht mit Kabel (3 m)	[kg]	1.5							1.5			
	[lbs]	3.3							3.3			
Abmessungen L x Ø	[mm]	320 x 95, Handgriff Ø 64										
Schutzklasse		II/ III (Doppelt isoliert)										
Emissionspegel L _{PA}	[dB]	65										

Geräteelemente

1. Heizelementrohr 2. Temperaturskala 3. Gummistandfuß 4. Handgriff 5. Netzanschlussleitung 6. Luftschieber
7. Luftfilter 8. Potentiometer für Temperatureinstellung 9. Netzschalter

Daten der einzelnen einstellbaren Heizstufen:

Stufe	Temperatur	Stufe	Temperatur
3	150°C	7	370°C
4	200°C	8	430°C
5	260°C	9	/
6	310°C	10	knapp unter 500°C

11.5.4 Berührungsloser Temperaturfühler

Fluke 61 Infrared Thermometer

Fluke 61 Infrared Thermometer

Technical Data



The Fluke 61 Infrared Thermometer provides quick non-contact temperature measurement in a compact case surrounded with a protective holster. This instrument contains the Fluke tradition of providing rugged and reliable test tools.

Accurate and easy to use

The newest addition to the Fluke family of temperature products is the Fluke 61. This infrared thermometer is the ideal tool for measuring surface temperatures of rotating, hard-to-reach, electrically live, or dangerously hot targets. For preventative maintenance tasks, the Fluke 61 will cut measurement time to almost zero with the ability to take a temperature reading in less than one second.

Just press the green button and it comes alive. Targeting objects is easy with the bright laser beam. Even in the dark, the display is easy to read with its backlit screen.

Fluke 61 product highlights include:

- Bright laser beam provides easy targeting
- Display clearly supplies data at a glance
- Shock-absorbing holster increases ruggedness
- 0.2 °C (0.5 °F) resolution
- Backlight illuminates the screen in the dark
- Automatic sleep mode after 7 seconds extends battery life
- Alkaline batteries provide 4000 typical measurements

Measurement specifications

Range	-38 °C to 275 °C (0 °F to 525 °F)
Resolution	0.2 °C (0.5 °F)
Repeatability	+/- 2% of reading or 2 °C (3.5 °F) whichever is greater
Accuracy	+/- 3 °C (5 °F) for targets between -18 °C (0 °F) to -1 °C (30 °F) +/- 2% of reading or 2 °C (3.5 °F) for targets above -1 °C (30 °F) to 275 °C (525 °F) (with the instrument stable between 23-25 °C)
Optical Resolution	8:1 Distance to Spot Size Ratio
Exisitivity	Fixed at 0.05
Batteries	9 V alkaline, included

11.5.5 Mantelthermoelement Typ K

B+B Thermotechnik

Länge: 50mm, Durchmesser: 1mm

Mantelthermoelemente NiCr-Ni, Typ K
Mineral Insulated Thermocouples NiCr-Ni, type K

isoliert, verschweisst
insulated, welded

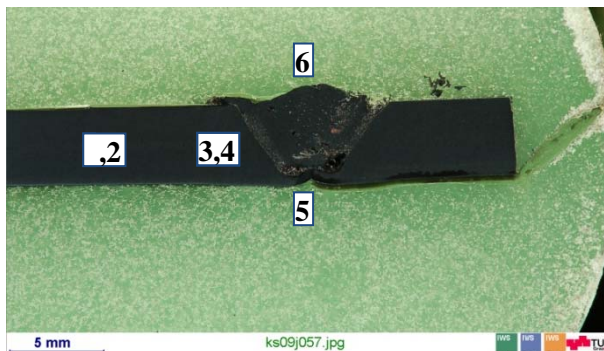
	Beschreibung Description	Genauigkeit Accuracy	Temperaturbereich Range [°C]	Länge Length [mm]	Durchmesser Diameter [mm]	Art.-No.	Nettopreis Net Price
	Mantelthermoelemente Typ K mit Standard-Stecker Mineral Insulated Thermocouples type K with Standard Plug	DIN IEC 584 Klasse 1 Class 1	-200...+1100	50	1,0	0625 1006-01	€ 16,90
					1,5	0625 1006-82	€ 16,90
					3,0	0625 1006-83	€ 17,40
				100	1,0	0625 1006-84	€ 17,20
					1,5	0625 1007-20	€ 17,20
					3,0	0625 1006-85	€ 17,70
	150	1,0	0625 1006-86	€ 17,50			
		1,5	0625 1006-87	€ 17,50			
		3,0	0625 1133-20	€ 18,00			
	250	1,0	0625 1006-88	€ 18,10			
		1,5	0625 1006-89	€ 18,10			
		3,0	0625 1006-04	€ 18,60			
500	1,0	0625 1225-05	€ 19,70				
	1,5	0625 1225-06	€ 19,70				
	3,0	0625 1225-01	€ 20,20				
1000	1,0	0625 1002-10	€ 22,90				
	1,5	0625 1395	€ 22,90				
	3,0	0625 1225	€ 29,10				

11.6 FSW- Maschinenprogramm

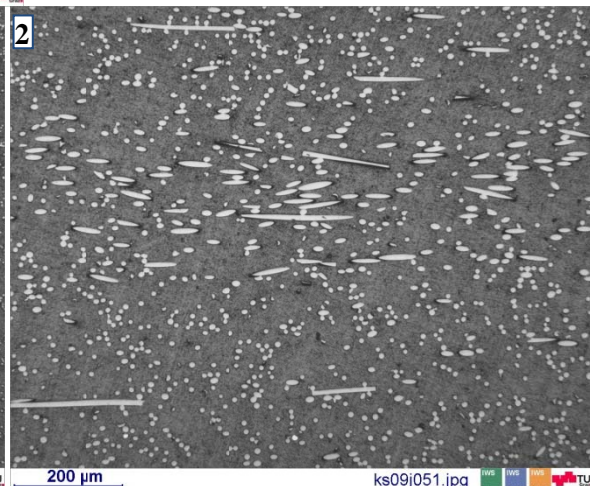
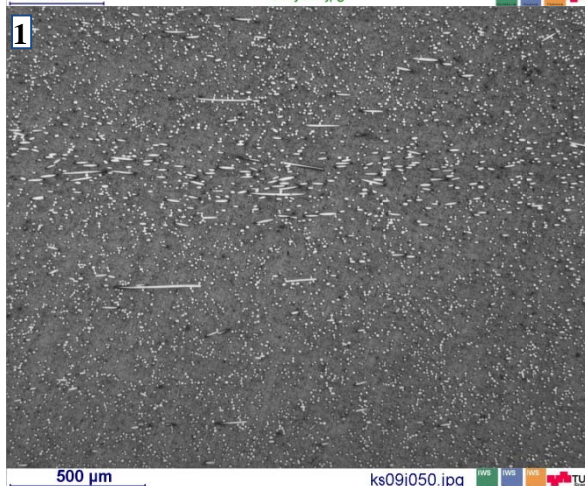
```

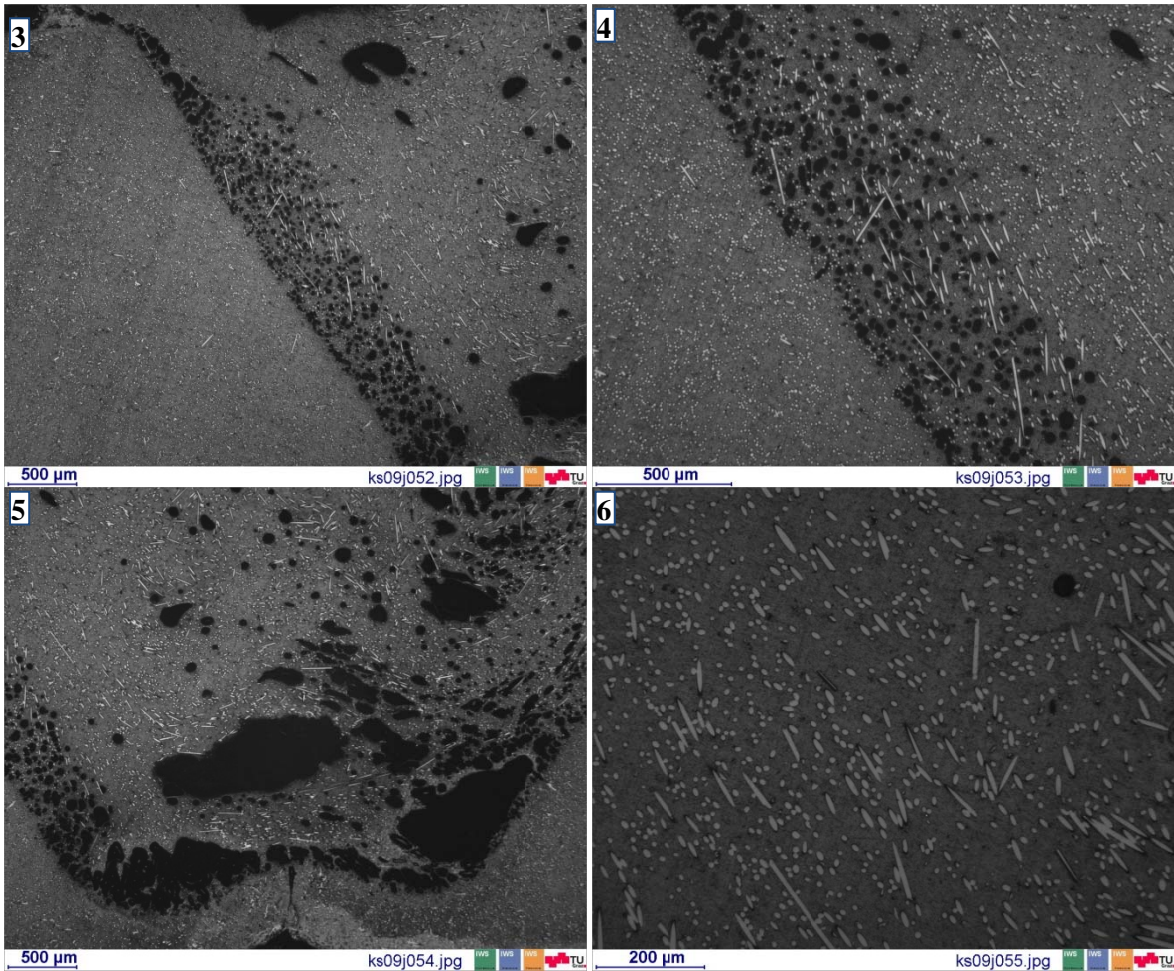
Weld Program Listing:
COORDS/PART
BREAK/"LOS"
FEEDRATE/RATE, 1500, ACCEL, 1000
GOTO/0.0, 0.0, 100.0
FORGEMOVE/POSITION, 2, RATE, 500, ACCEL, 500
DELAY/SEC, 2.0
GOTO/0.0, 0.0, 0.0
FORGEMOVE/TOUCH, 0, FORCE, 0.5, RATE, 12, ACCEL, 100
BREAK/"ALLES PALETTI?"
SPINDLE/RPM, 1500, ACCEL, 1250
DELAY/SEC, 0.0
FORGEMOVE/POSITION, -3.0, RATE, 24, ACCEL, 12, RELATIVE
DELAY/SEC, 0.1
DELAY/SEC, 0.1
FEEDRATE/RATE, 50, ACCEL, 450
GOTO/80.0, -0.6, 0.0
FORGEMOVE/POSITION, 5, RATE, 150, ACCEL, 150, RELATIVE
SPINDLE/RPM, 0, ACCEL, 1250
DELAY/SEC, 2.0
FEEDRATE/RATE, 2000, ACCEL, 1000
GOTO/0.0, 0.0, 150.0
    
```

11.7 Plastographie



Ultramid KS_0902_S009_A
 Werkzeug 2 (Konventioneller Pin)
 Werkzeugwinkel 2,8°;
 Drehzahl: 2500 U/min; v=50mm/min
 Heiz-Platte: 160°C
 Schweißfaktor: 0.11
 1, 2 Grundmaterial
 3,4 Anbindung an der Advancing Side
 5 Bottom Disturbance
 6 Rührzone





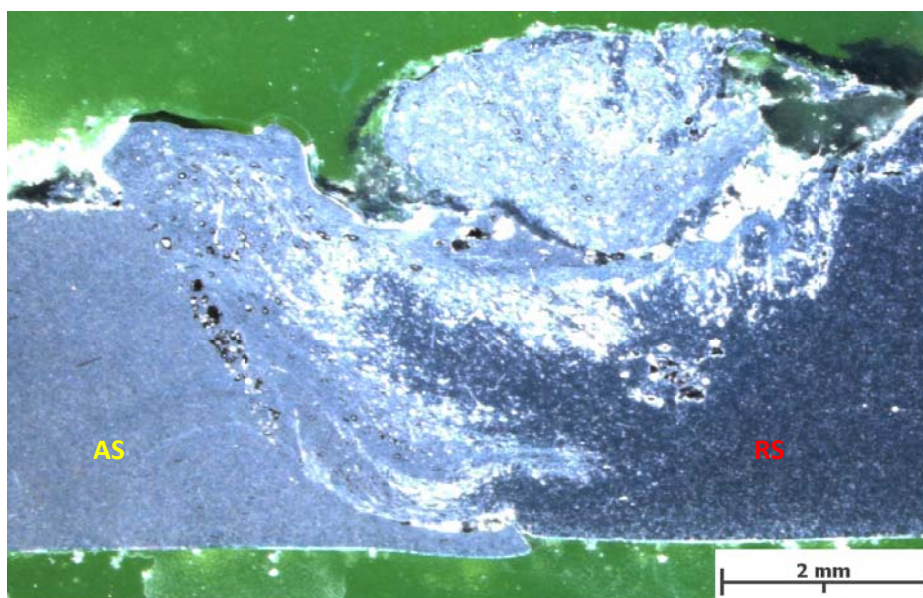
11.7.1 Dissimilar Welding PA6 & PBT;

KS_0907_S002 Ultramid (AS) und Ultradur (RS)

Werkzeug: Pinstift \varnothing 5.2 mm für Prototyp Heizplatte (Kapitel 11.4.3)

Werkzeugwinkel: 0° / Raumtemperatur

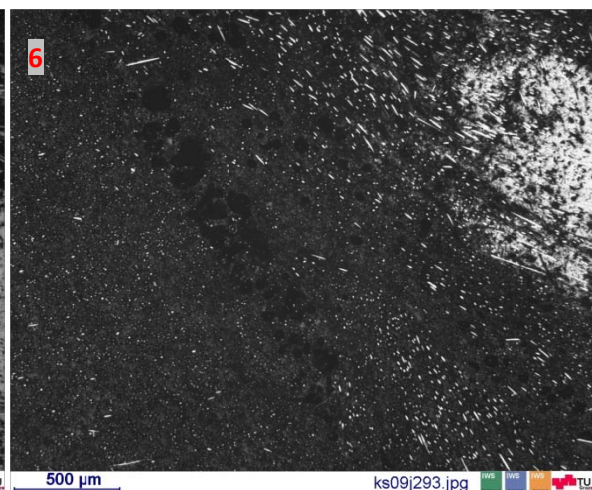
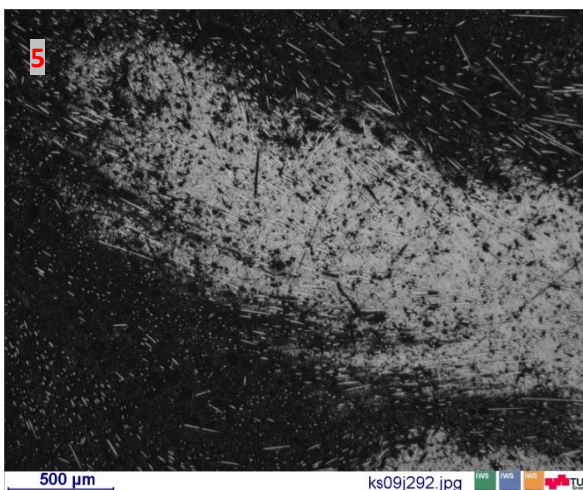
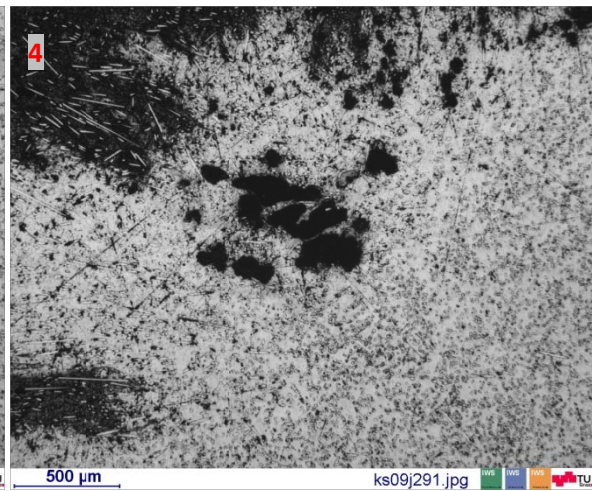
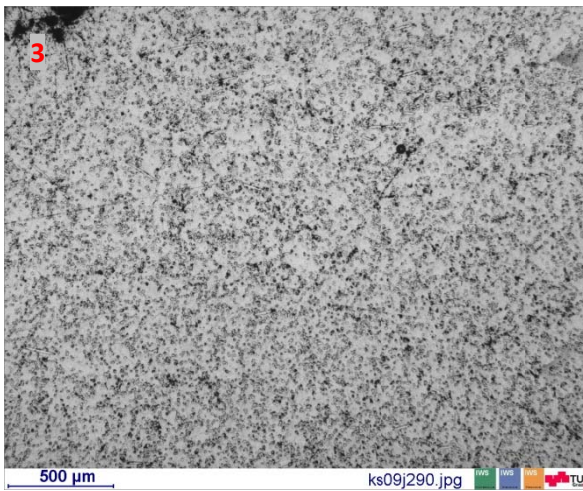
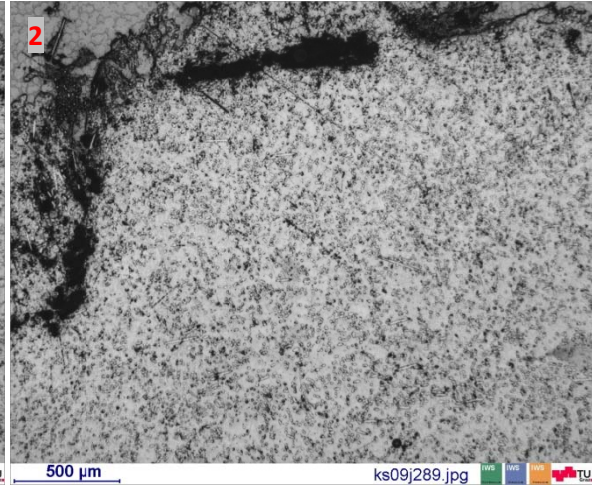
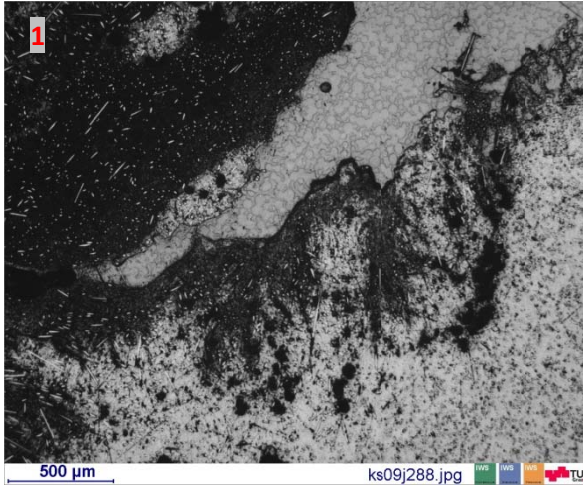
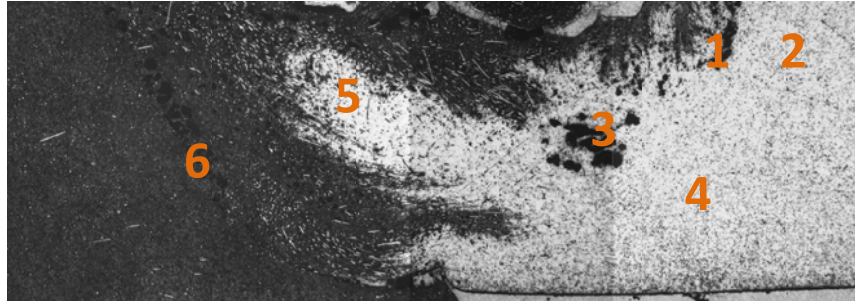
$v=50$ mm/min $n=2500$ U/min Eindringtiefe= 2.7mm



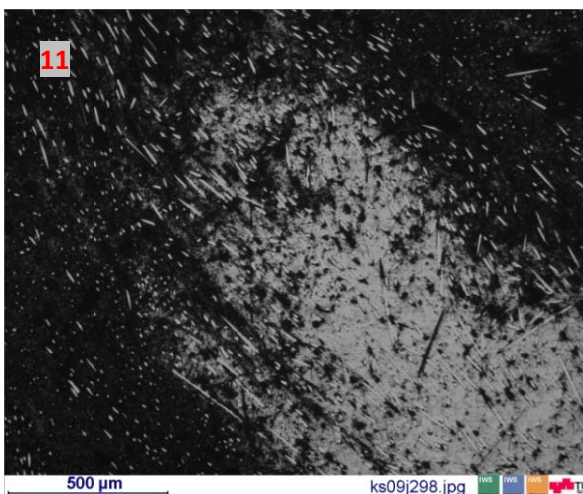
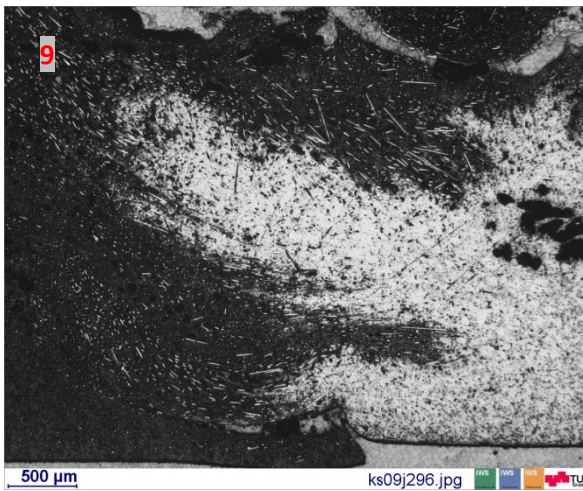
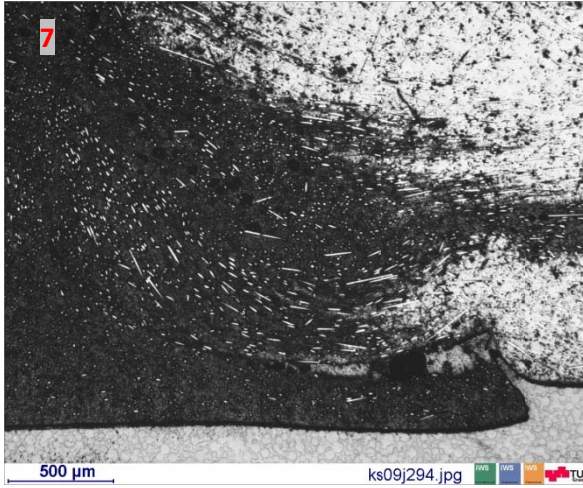
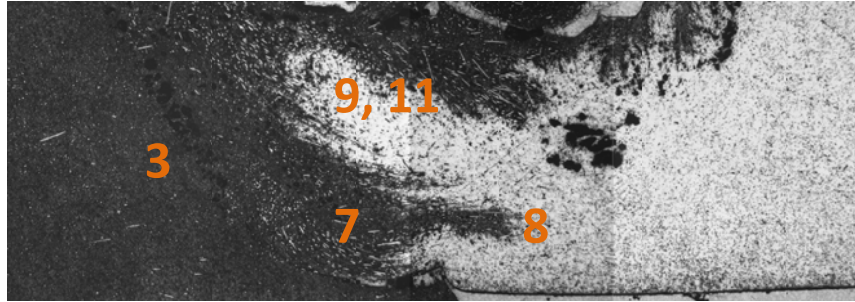
Mikroskopvergrößerung: 15,4x; Bildbreite: 9,06 mm

Bildname: ks09j400.jpg

Übersichtsbild



Übersichtsbild



11.7.2 Übersichtsbilder Prototyp beheizte Schulter

KS_0906_S009 Ultradur

Werkzeug: Pinstift \varnothing 5.2 mm für Prototyp Heizplatte (Kapitel 11.4.3)

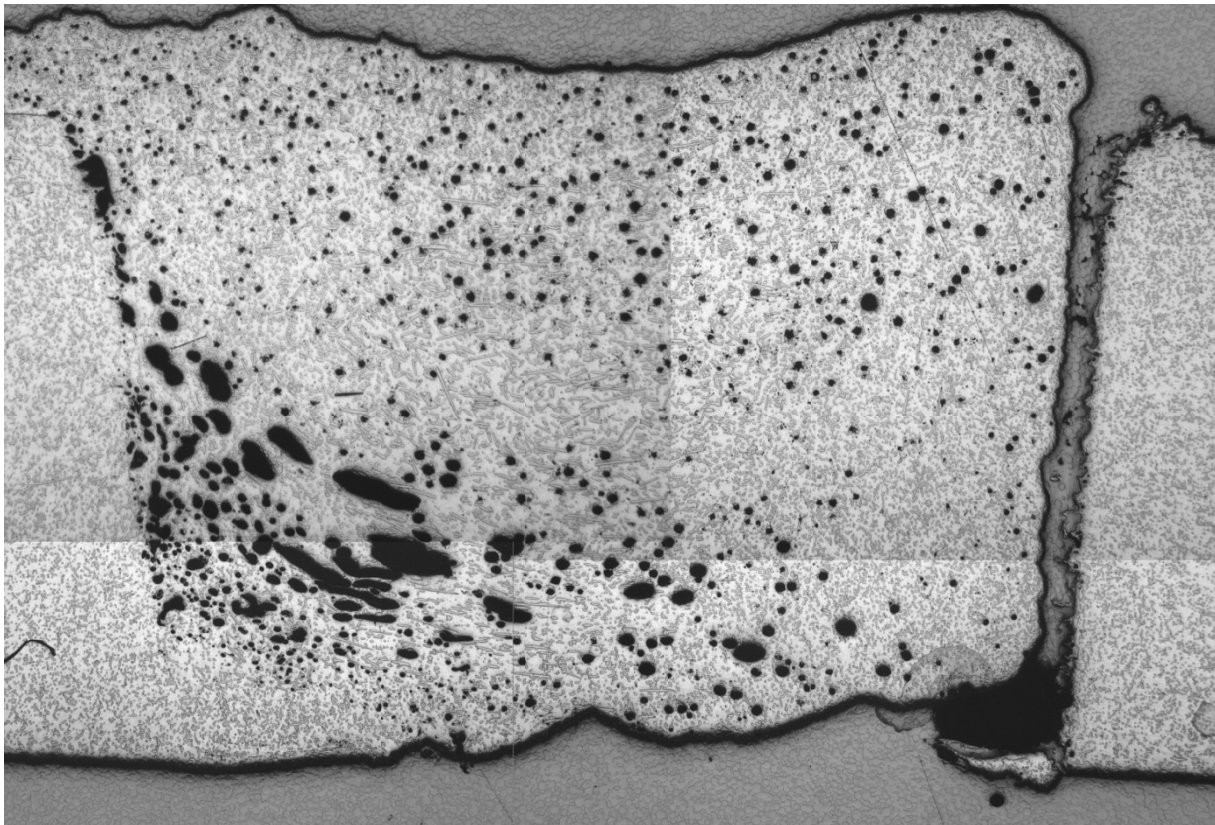
Werkzeugwinkel: 0° / Raumtemperatur

$v=50$ mm/min $n=2500$ U/min Eindringtiefe= 2.1mm

Schweißnahtaussehen



Schliffbild KS_0906_S009



KS_0906_S011 Ultradur

Werkzeug: Pinstift \varnothing 5.2 mm für Prototyp Heizplatte (Kapitel 11.4.3)

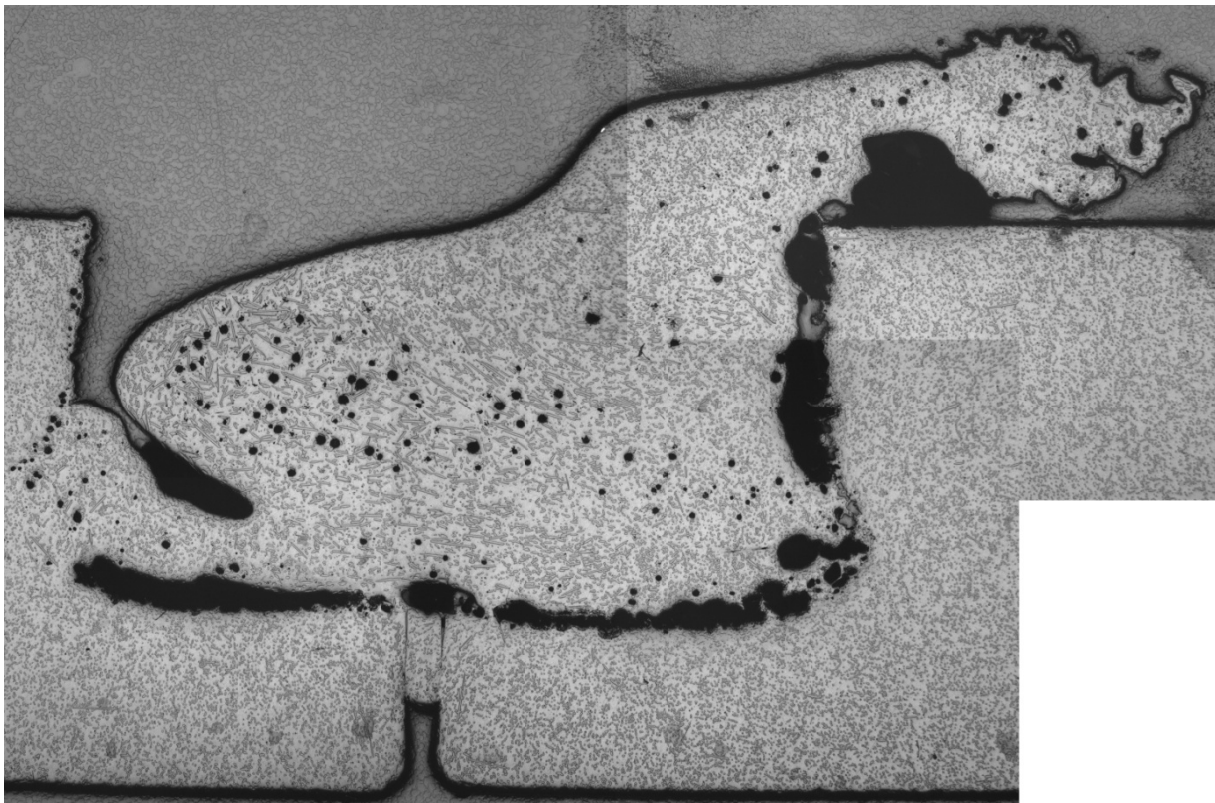
Werkzeugwinkel: 0° / Heiztemperatur: 200°C

$v=50$ mm/min $n=2500$ U/min Eindringtiefe= 2.1mm

Schweißnahtaussehen



Schliffbild KS_0906_S011



KS_0906_S016 Ultradur

Werkzeug: Pinstift \varnothing 5.2 mm für Prototyp Heizplatte (Kapitel 11.4.3)

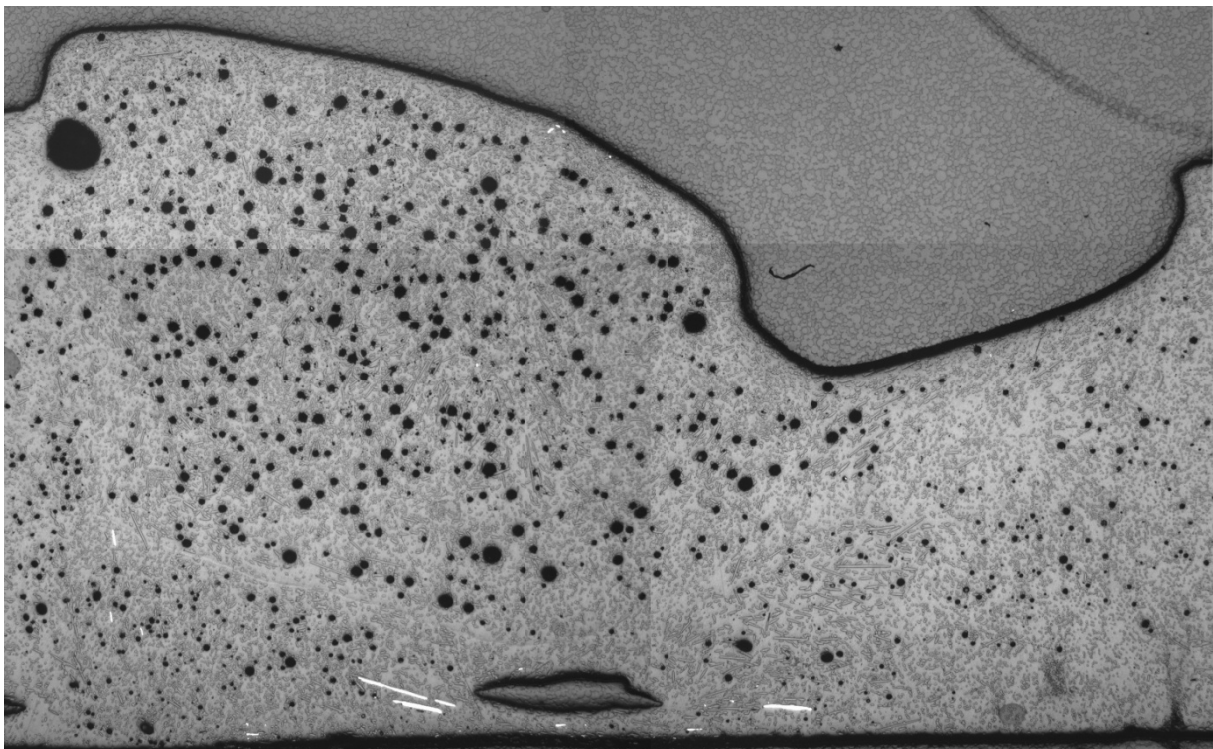
Werkzeugwinkel: 1° / Heiztemperatur: ca. 200°C

$v=50$ mm/min $n=2500$ U/min Eindringtiefe= 2.1mm

Schweißnahtaussehen

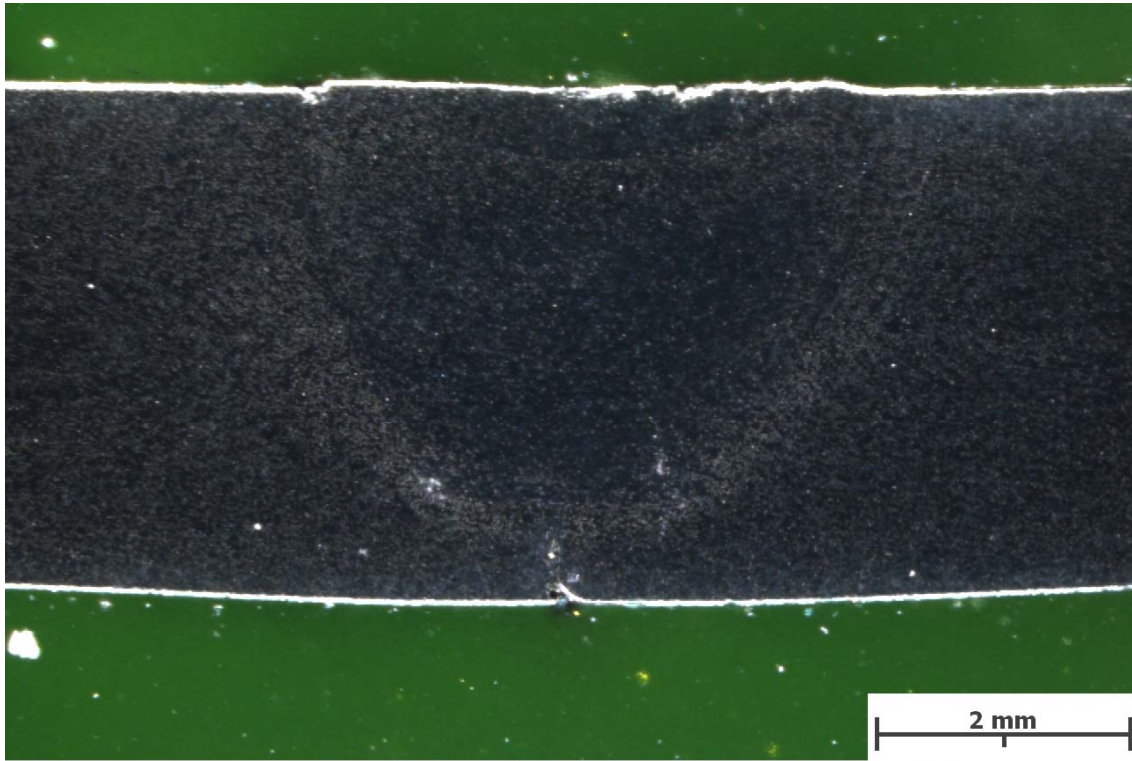


Schliffbild KS_0906_S016



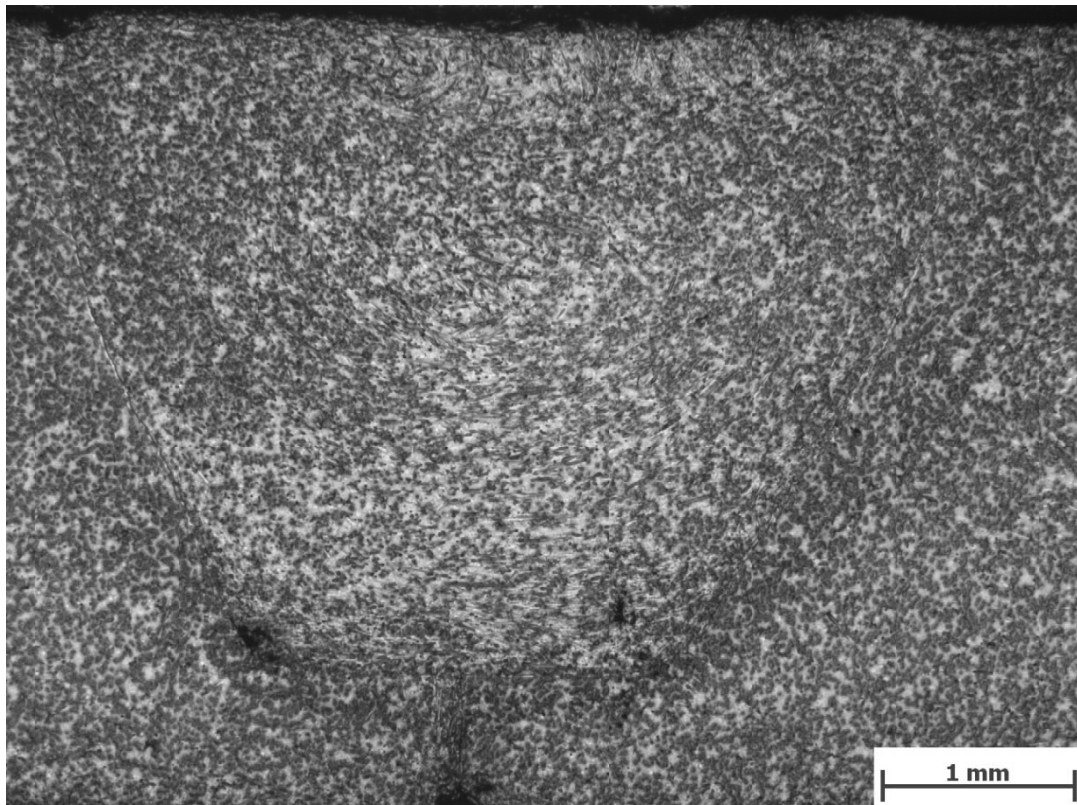
11.7.3 Stehende, beheizte Schulter Ultramid

KS_0910_S004



Mikroskopvergrößerung: 15,6x; Bildbreite: 8,93 mm

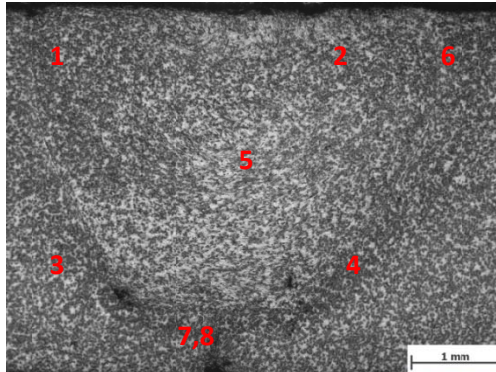
Bildname: [ks09j498.jpg](#)



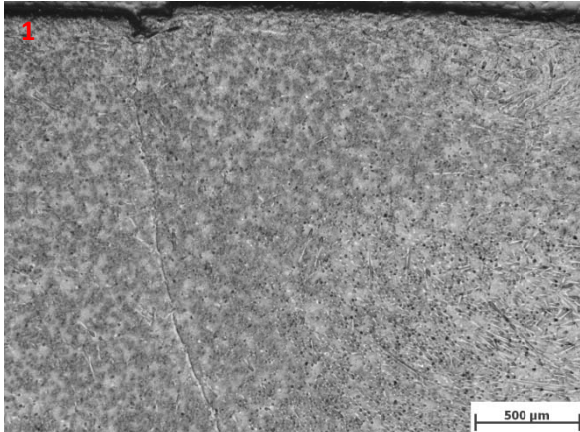
Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm

Bildname: [ks09j500.jpg](#)

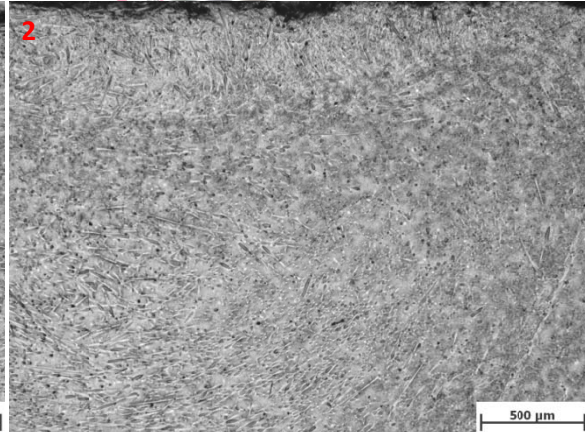




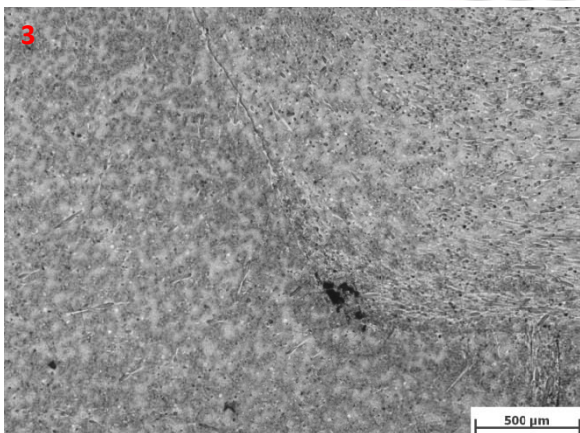
Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5,58 mm
 Bildname: ks09j500.jpg



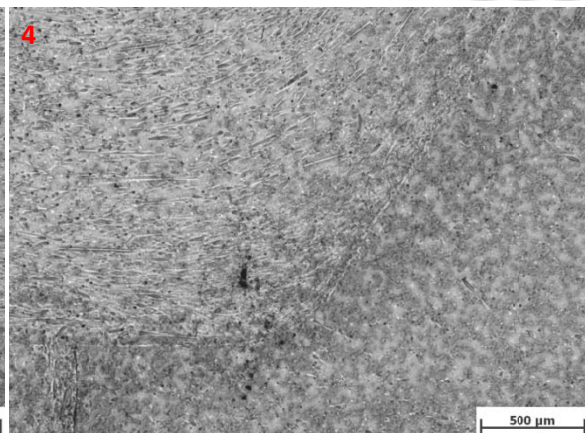
Mikroskopvergrößerung: 50x; Bildbreite: 2789,08 µm
 Bildname: ks09j501.jpg



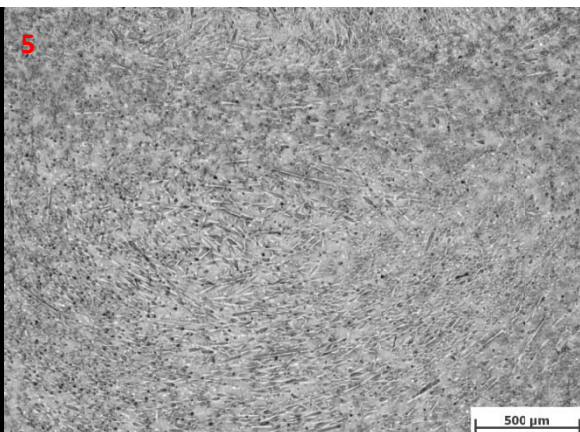
Mikroskopvergrößerung: 50x; Bildbreite: 2789,08 µm
 Bildname: ks09j504.jpg



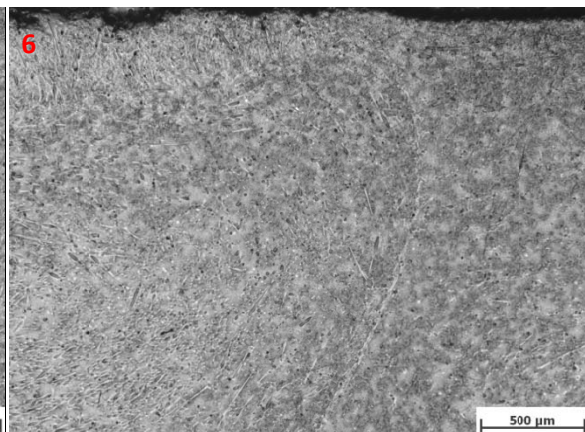
Mikroskopvergrößerung: 50x; Bildbreite: 2789,08 µm
 Bildname: ks09j502.jpg



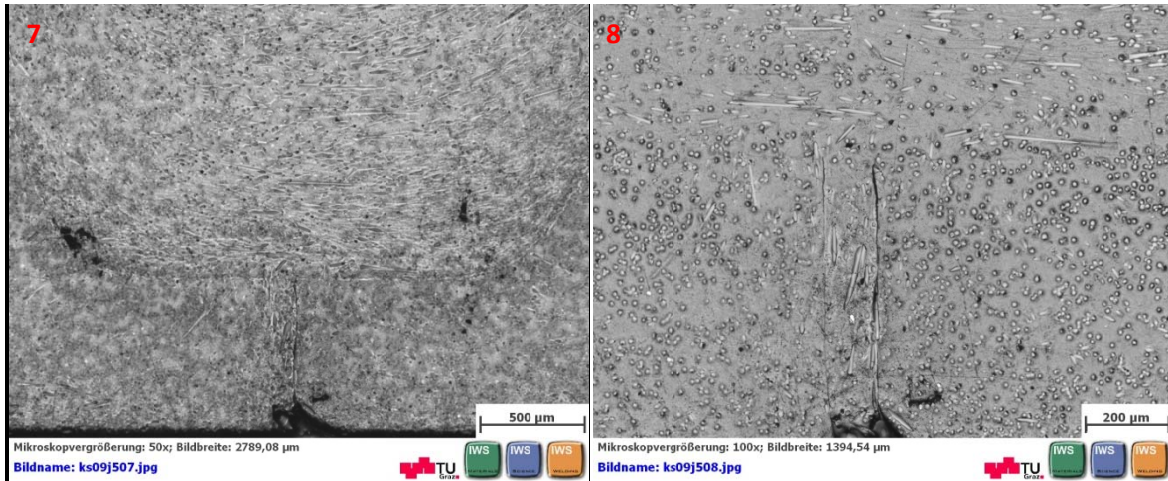
Mikroskopvergrößerung: 50x; Bildbreite: 2789,08 µm
 Bildname: ks09j503.jpg



Mikroskopvergrößerung: 50x; Bildbreite: 2789,08 µm
 Bildname: ks09j506.jpg

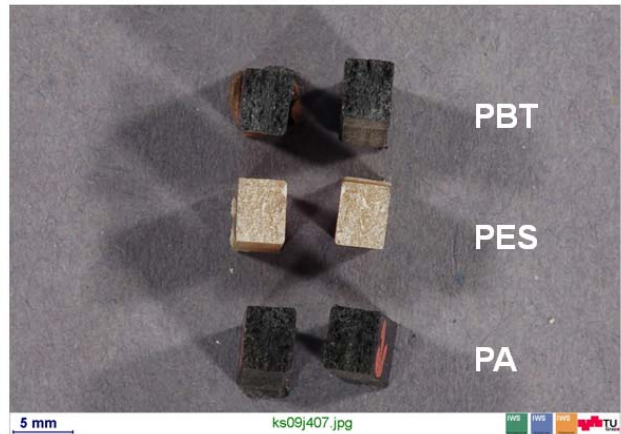


Mikroskopvergrößerung: 50x; Bildbreite: 2789,08 µm
 Bildname: ks09j505.jpg

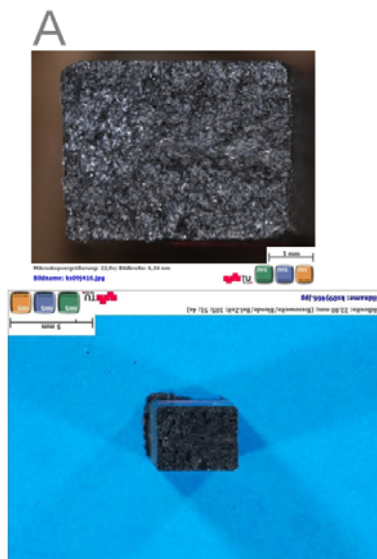


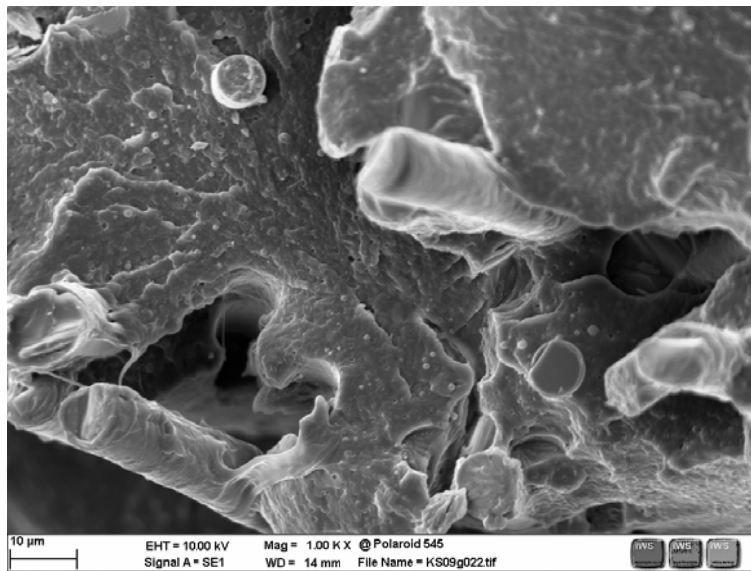
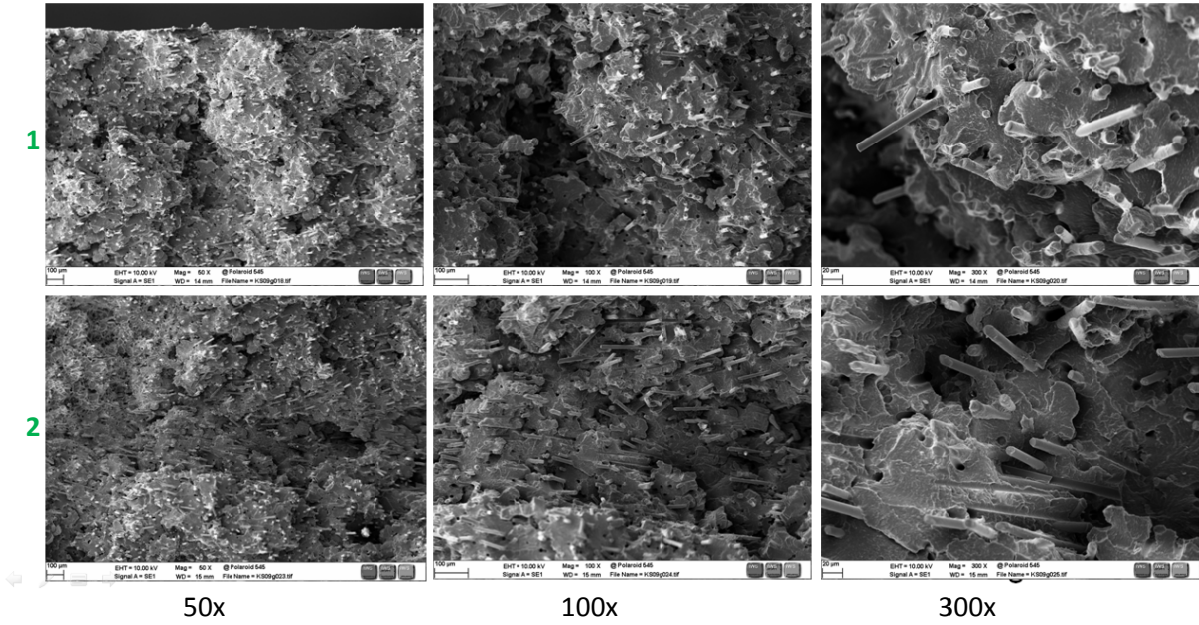
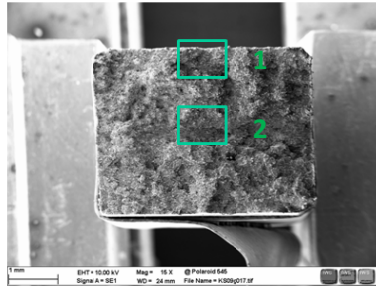
11.8 Rasterelektronenmikroskopie

11.8.1 REM Grundmaterial



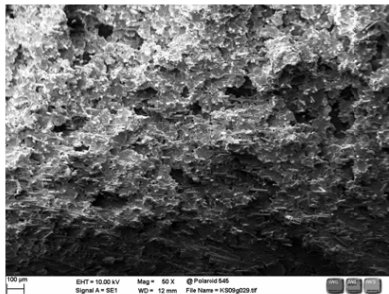
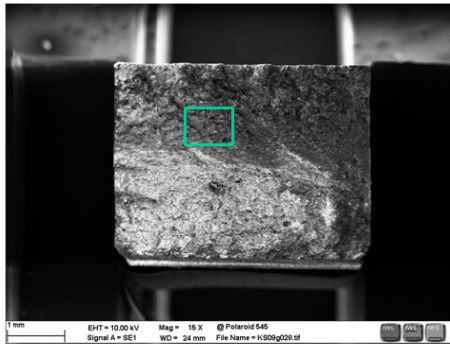
Grundwerkstoff PA_02



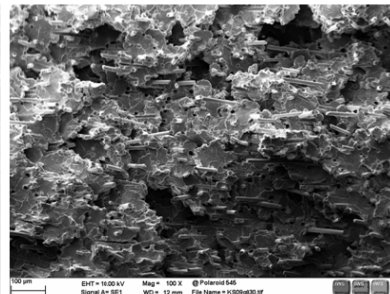


1000x

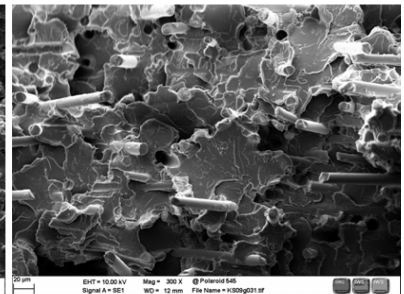
Grundwerkstoff PES_01



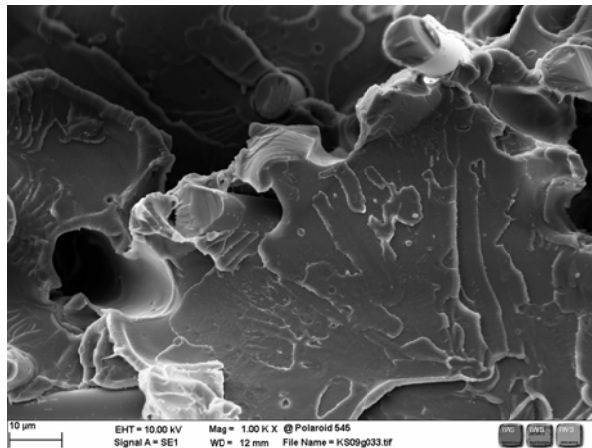
50x



100x

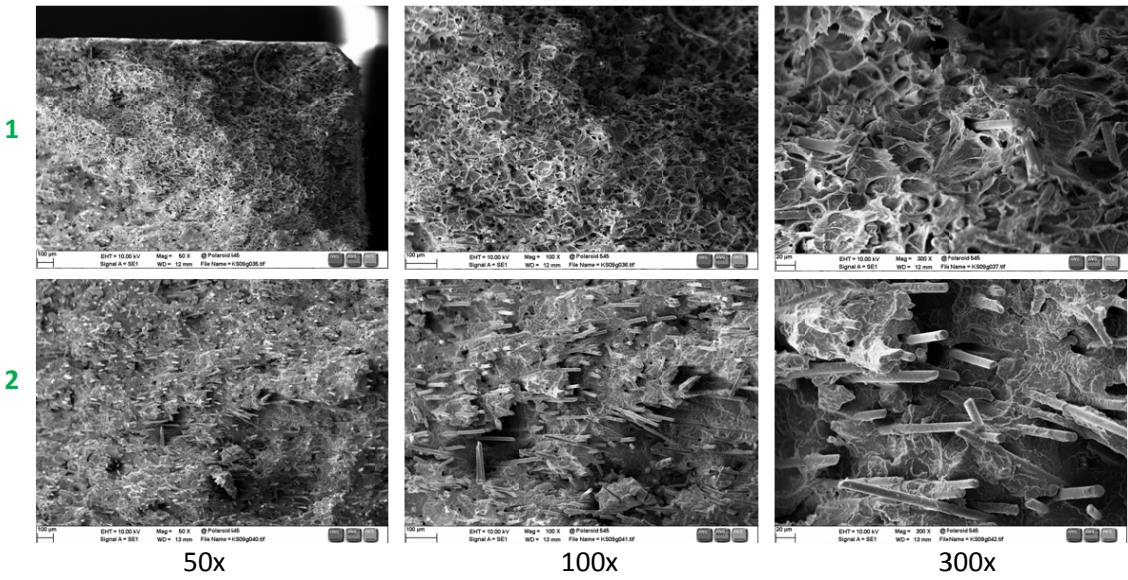
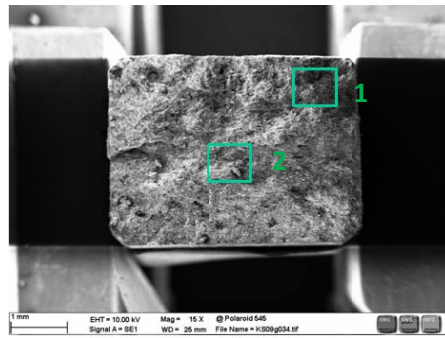


300x



1000x

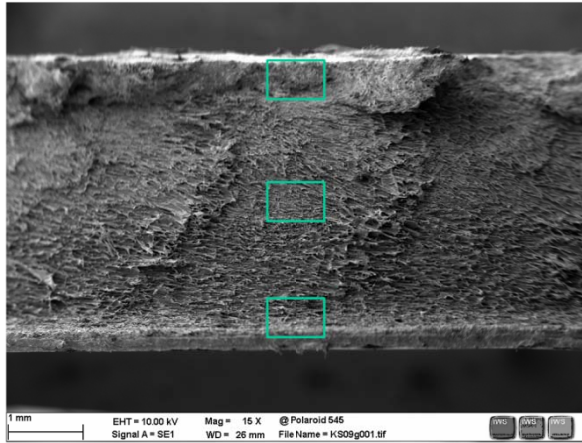
Grundwerkstoff PBT_02



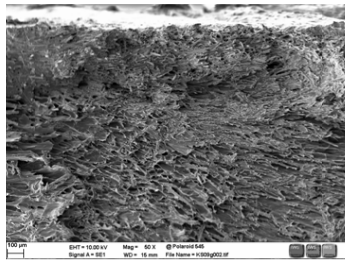
11.8.2 REM verschweißte Probe

KS_0902_S005

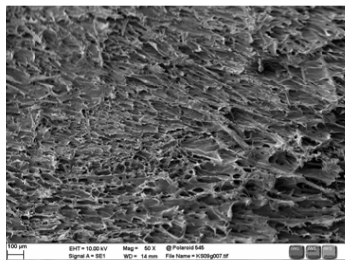
PA6



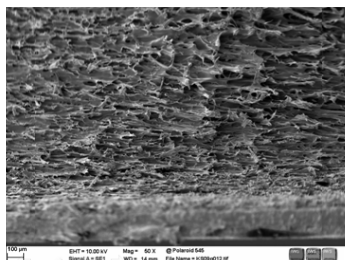
1



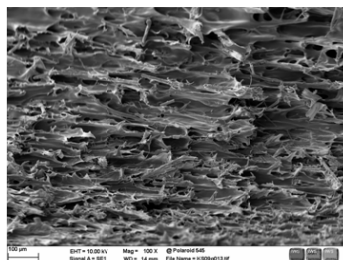
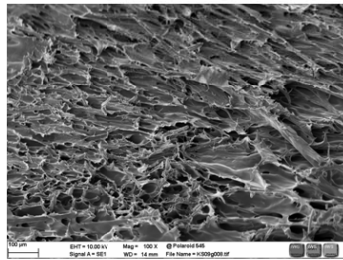
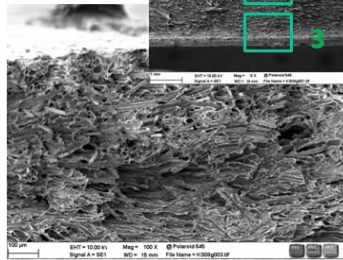
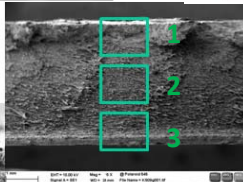
2



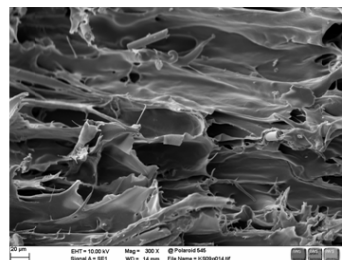
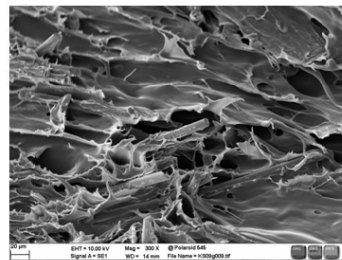
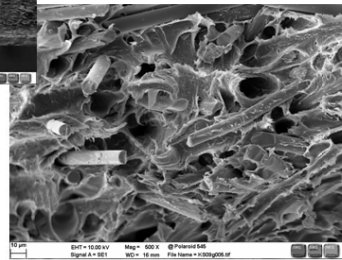
3



50x



100x



300x

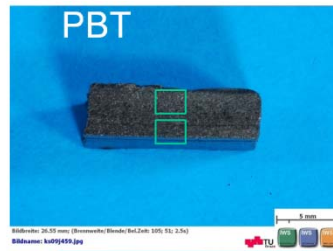
Similar



KS_0908_S004



KS_0908_S004

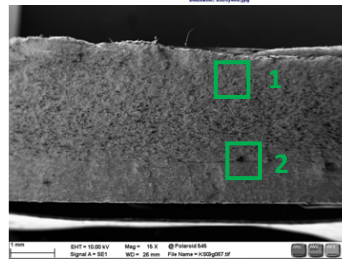


I
RS

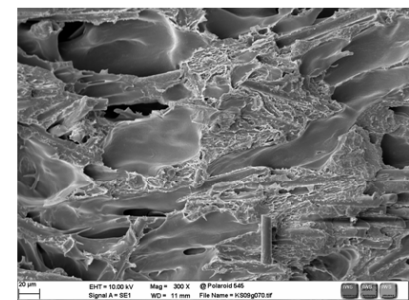
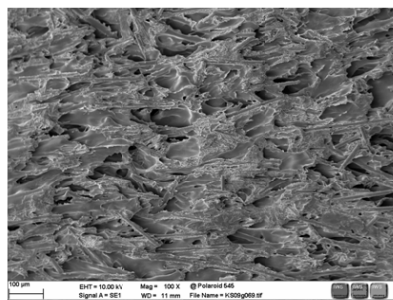
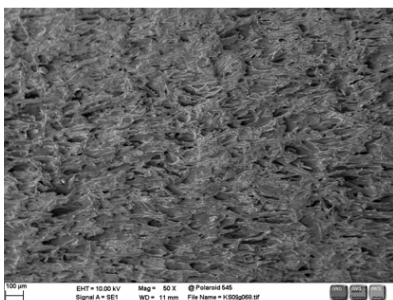


II
AS

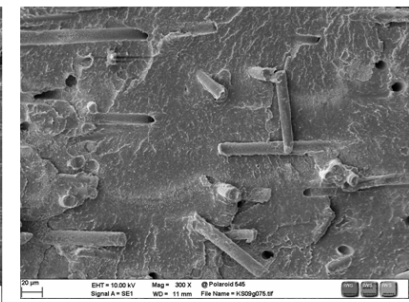
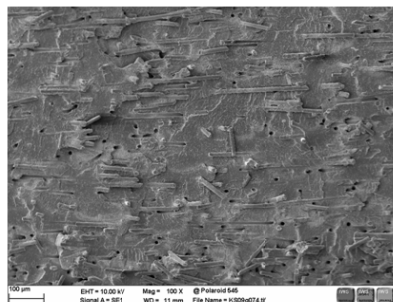
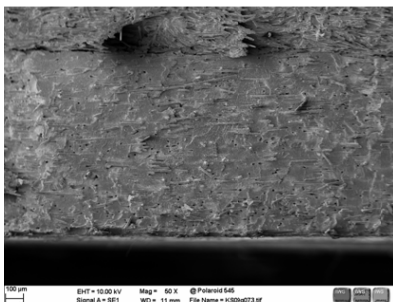
AS



1



2



50x

100x

300x

Probenpräparation KS_0910_S004



Bildbreite: 112.81 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1/1.6s)

Bildname: ks09j435.jpg



Bildbreite: 26.90 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1/2.0s)

Bildname: ks09j436.jpg

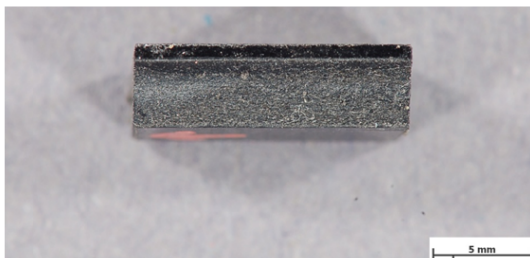


Bildbreite: 151.10 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 18; 1/3s)

Bildname: ks09j468.jpg



RS



Bildbreite: 26.55 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1/1.3s)

Bildname: ks09j514.jpg

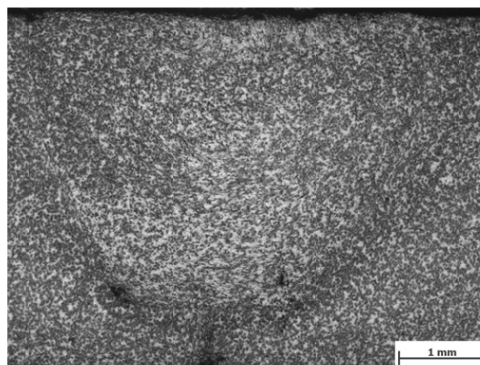


AS



Bildbreite: 24.49 mm; (Brennweite/Blende/Bel.Zeit: 105; 16; 1/1.3s)

Bildname: ks09j513.jpg

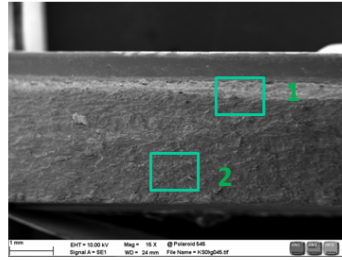


Mikroskopvergrößerung: 25x; Bildbreite: 5.58 mm

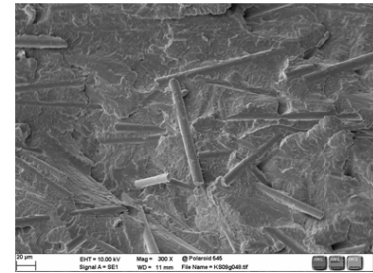
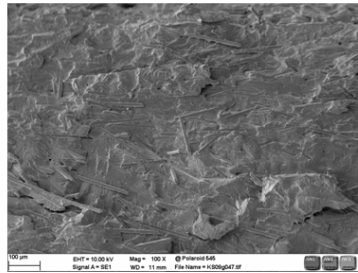
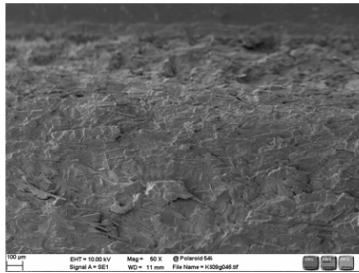
Bildname: ks09j500.jpg



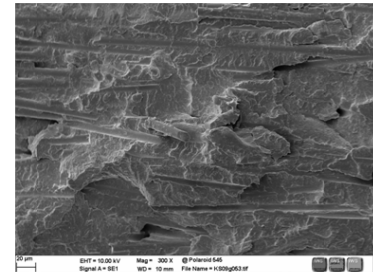
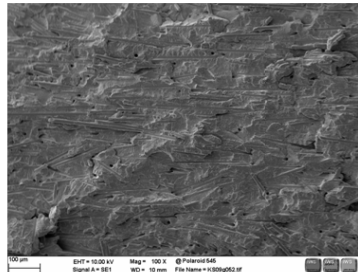
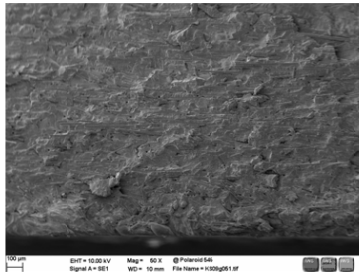
04



1



2

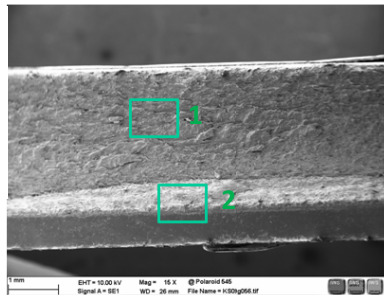


50x

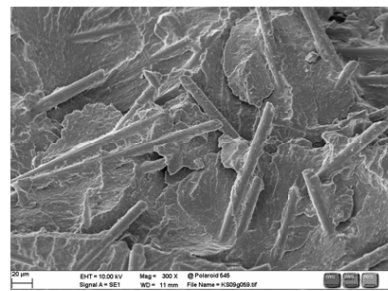
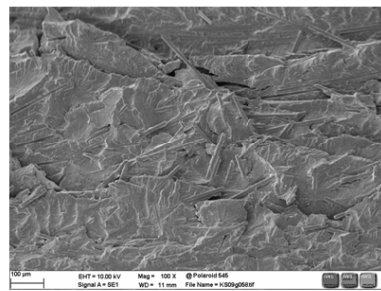
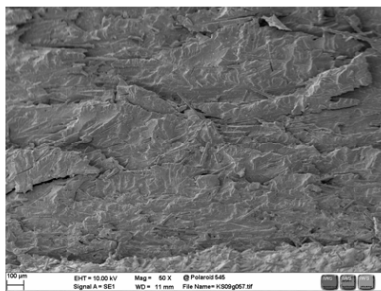
100x

300x

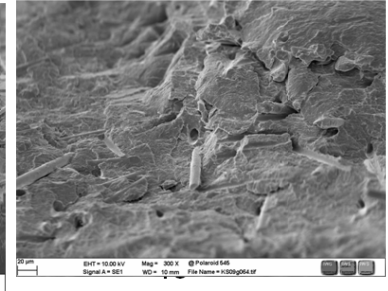
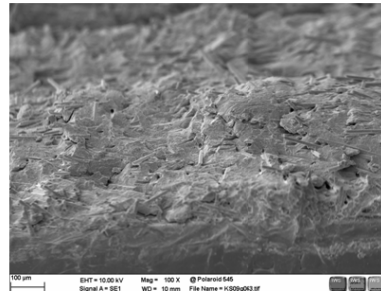
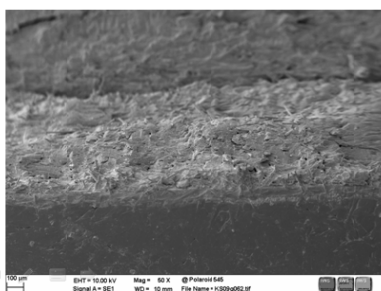
04



1



2



50x

100x

300x

KS_0903_S015 b

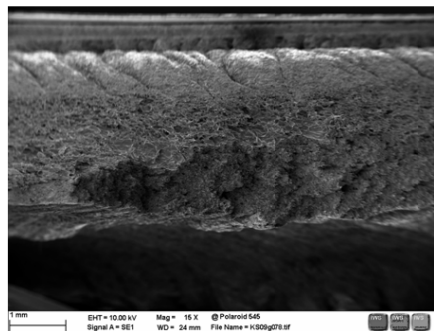
PES

Bruch auf der AS

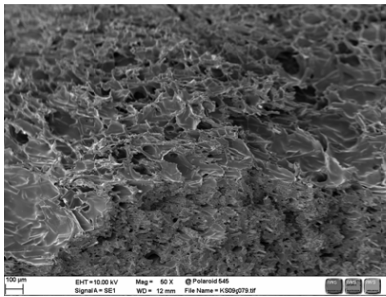


I RS

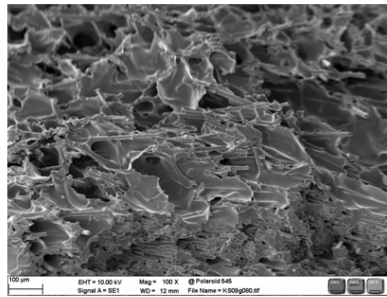
II AS



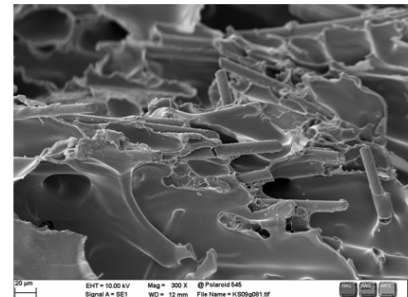
PES



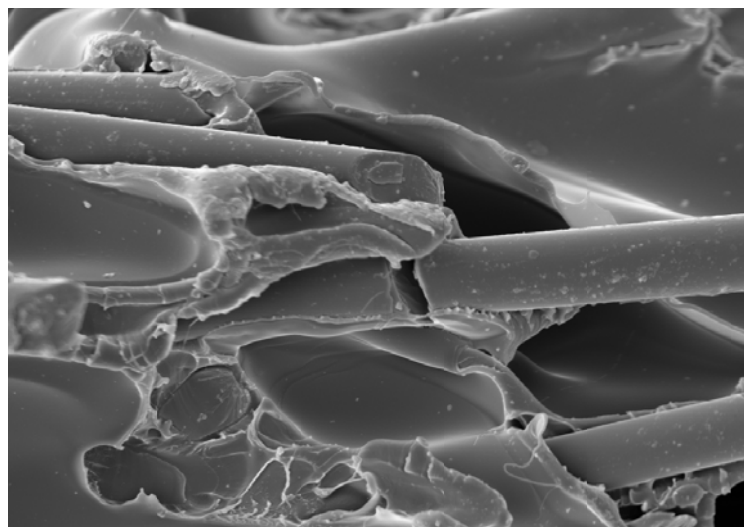
50x



100x

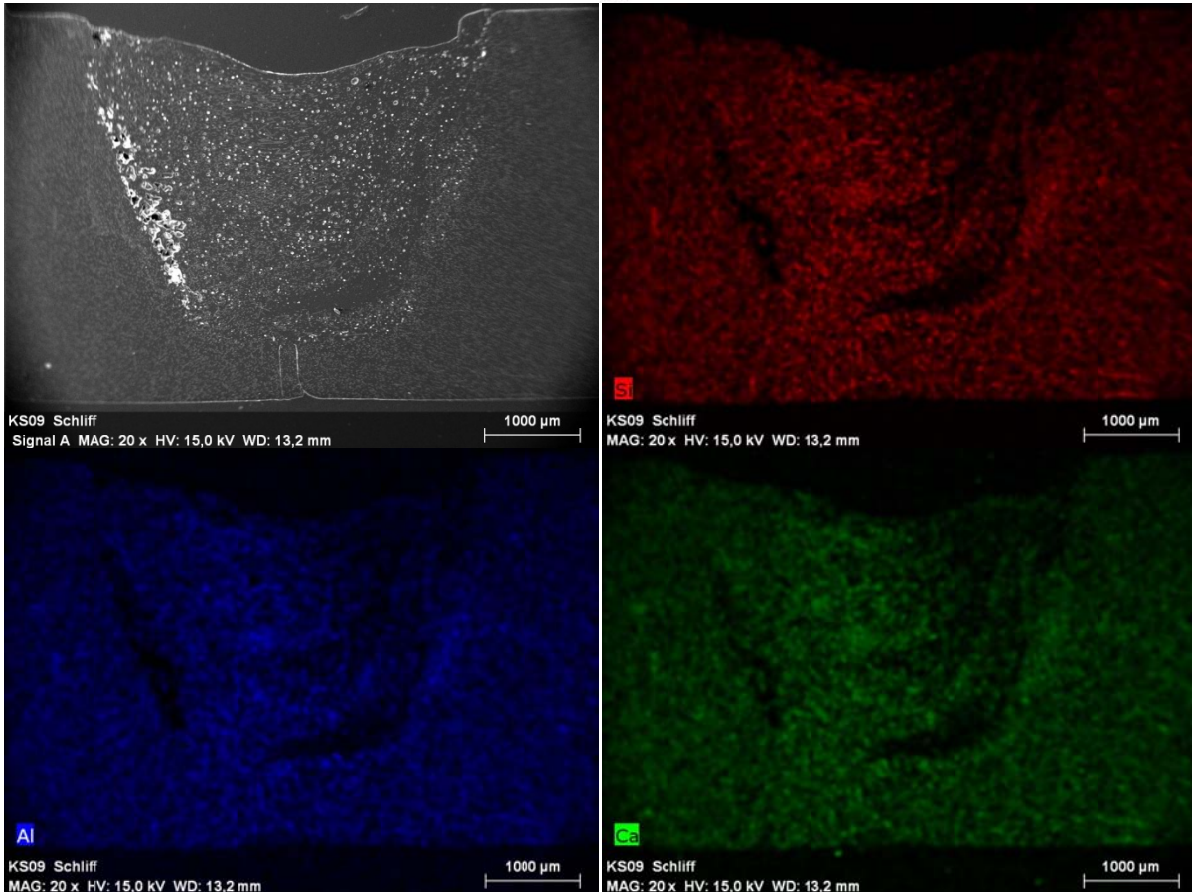
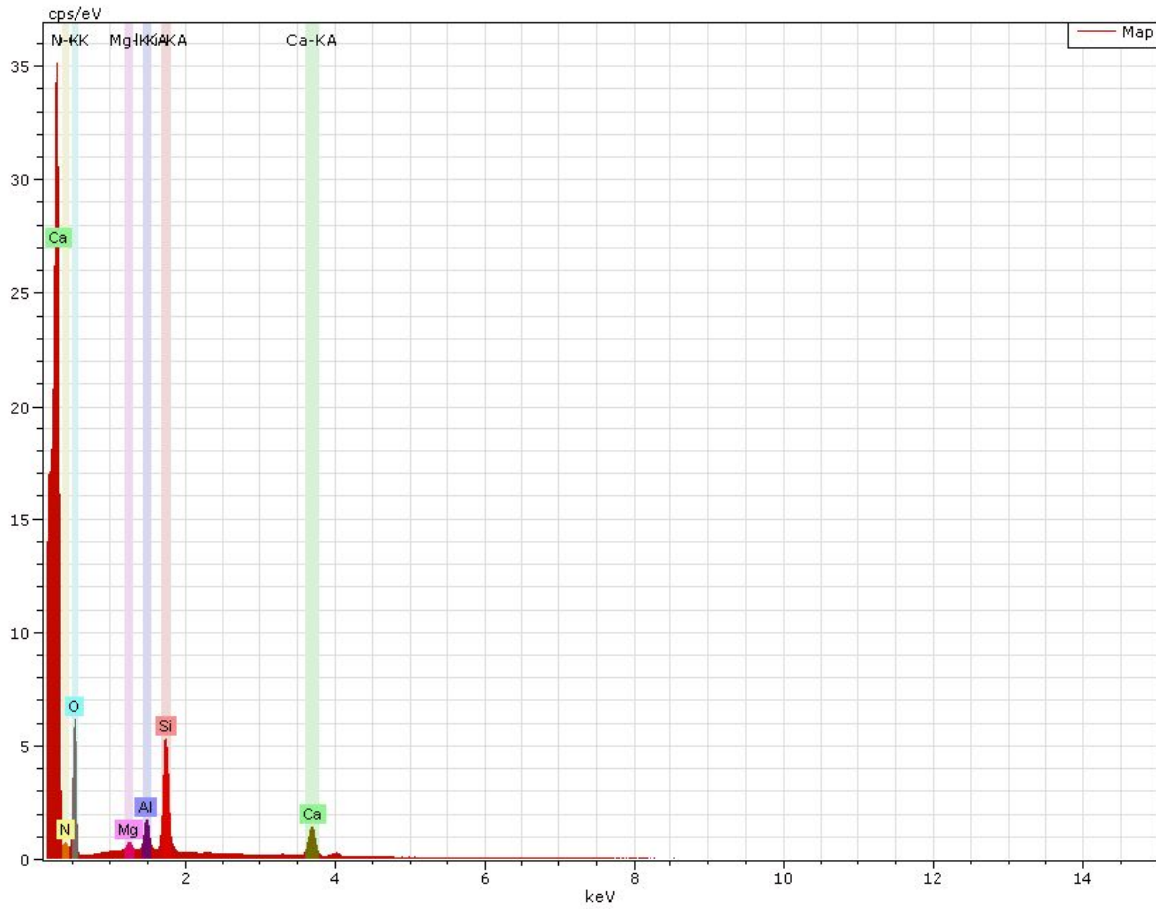


300x



1000x

11.8.3 Energiedispersive Röntgenanalyse (EDX)



11.8.4 Back-Scattered Electrons BSC

