

Entwicklung und prozesstechnische Analyse eines festen und mediendichten Kunststoff - Metall - Verbundes

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Benedict Bonpain

aus

Neunkirchen

Tag der mündlichen Prüfung: 28.03.2017

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe (LPW) an der Universität des Saarlandes sowie dem Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) in den Jahren 2013 bis 2016.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Stommel für den gewährten Forschungsfreiraum sowie die sehr gute Unterstützung in zahlreichen, konstruktiven Gesprächen. Diese trugen entscheidend zum Gelingen der vorliegenden Arbeit bei. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans-Georg Herrmann danke ich für die kritische Durchsicht meiner Arbeit sowie für die Übernahme des Koreferats.

Den Mitarbeitern der Firma MAHLE Behr GmbH möchte ich für die Finanzierung des Projektes sowie die professionelle Zusammenarbeit danken. Insbesondere die Gespräche mit Herrn Michael Moser unterstützten meine Forschungsarbeiten.

Bei allen Mitarbeitern des LPW sowie des ZeMA, speziell Steven Quirin, möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und die hervorragende Arbeitsatmosphäre bedanken. Den Mitarbeitern meiner Arbeitsgruppe, insbesondere Laura Klis und Jonas Rauber, danke ich für die anregenden Diskussionen sowie die fachliche Unterstützung. Ohne sie wäre die Arbeit in der vorliegenden Form nicht möglich gewesen.

Ebenfalls danke ich meiner Lebensgefährtin Anne-Marie, die mir den nötigen Rückhalt während meiner Arbeit gab.

Auch möchte ich mich bei meinen Freunden und Vereinskollegen bedanken, die stets für die erforderliche Abwechslung von der Arbeit sorgten.

Nicht zuletzt danke ich meinen Eltern, die in jeglicher Hinsicht die Grundsteine für meinen Weg gelegt haben.

Neunkirchen, August 2016

Benedict Bonpain

Kurzzusammenfassung

Hybride Kunststoff-Metall-Verbindungen, die direkt durch den Spritzgussprozess gefertigt werden (IMA-Verbindungen), besitzen in der industriellen Fertigung einen immer höheren Stellenwert. Insbesondere in der Automobil- und Luftfahrtindustrie kommen diese aufgrund des geringen Gewichtes und der geringen Anzahl an Fertigungsschritten bei gleicher oder verbesserter Leistungsfähigkeit der Bauteile zum Einsatz. Ein noch junges Themengebiet ist die Konstruktion mediendichter und fester Kunststoff-Metall-Verbunde. Die vorliegende Arbeit greift diese Thematik auf und analysiert die Prozesstechnik zur Fertigung einer solchen Verbindung sowie die mikrostrukturellen Vorgänge an deren Grenzfläche.

In den durchgeführten Untersuchungen zeigt sich, dass eine hohe Qualität der Verbindung durch die Vorbehandlung des Metalls erzielt werden kann. Insbesondere eine Aufrauung und die damit erzielte mikro-mechanische Verklammerung der Fügepartner erweist sich als zielführend. Da eine hohe Rauheit allerdings zu einer hohen Festigkeit aber einer verschlechterten Dichtigkeit der Verbindung führt, wird bei der gleichzeitigen Optimierung ein Kompromiss zwischen den beiden Zielgrößen erzeugt. Dieser ermöglicht die Fertigung einer festen und dichten Verbindung. Eine ebenfalls untersuchte makro-mechanische Verklammerung führt annähernd zur gleichen Qualität der Verbindung. Weitere Analysen lassen erkennen, dass die Festigkeit und Dichtigkeit ebenfalls durch eine Prozessparameteroptimierung des Spritzgussprozesses sowie eine zielgerichtete Konstruktion des Probekörpers verbessert werden kann.

Abstract

Hybrid plastic-metal-joints, which are joined directly through the injection molding process (IMA-joints), are getting more and more common in industrial applications. Because of their excellent lightweight properties and the reduction of the assembly effort whereas the efficacy is equal or even better, especially the automotive- and aerospace industry have a huge interest in the application of these joints. A new topic is the construction of strong and media tight plastic-metal-joints. This thesis contributes to this topic and analyses the process technology to manufacture such a joint as well as the microstructural processes at the interface.

The results of carried out researchs indicate that a high quality of the joint can be reached by pretreatment of the metal. Especially roughening and the hereby achieved micro-mechanical interlocking of the joining partners are appropriate. As a rough surface leads to a high strength, but low tightness of the joint, a simultaneous improvement leads to a compromise. Thus, a strong and tight joint is achieved. An as well analyzed macro-mechanical interlocking leads to a similar quality of the joint. Further investigations exhibit the beneficial influence of a process parameter optimization of the injection molding process and a purposeful specimen construction.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VII
Formelzeichen und Abkürzungen	VIII
1 Einleitung und Motivation	1
2 Physikalische und prozesstechnische Grundlagen	4
2.1 Grundlagen der Adhäsion	4
2.1.1 Mechanisches Adhäsionsmodell	4
2.1.2 Spezifische Adhäsionsmodelle	7
2.1.3 Schlussfolgerungen für Kunststoff-Aluminium-Verbunde	10
2.2 Herstellung von Kunststoff-Metall-Verbindungen	11
2.2.1 In-Mould Assembly	12
2.2.2 Post Moulding Assembly	16
2.2.3 Fazit	17
2.3 Verfahren zur Modifikation der Metalloberfläche zur Verbesserung der Qualität einer IMA-Verbindung	18
2.3.1 Übersicht	18
2.3.2 Evaluation im konkreten Fall	25
2.3.3 Vorversuche	25
3 Relation zwischen Oberflächenrauheit und Verbundfestigkeit	33
3.1 Stand der Technik	33
3.1.1 Geklebte Verbunde	33
3.1.2 IMA-Verbunde	35
3.2 Zielsetzung	37
3.3 Aufbau und Durchführung experimenteller Untersuchungen	39
3.3.1 Probekörper zur Bestimmung der Scherfestigkeit	39
3.3.2 Probekörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit	40
3.3.3 Fertigung der geklebten und der IMA-Probekörper	42
3.4 Versuchsergebnisse	43
3.4.1 Rauheitsmessungen	43

3.4.2	Rauheits-Festigkeitskurven	44
3.4.3	Diskussion	47
3.5	Simulation	51
3.5.1	Modellerstellung	52
3.5.2	Diskussion	54
3.6	Zusammenfassung	57
4	Analyse der Oberflächenbearbeitung auf die Mediendichtigkeit	58
4.1	Stand der Technik	58
4.2	Zielsetzung	61
4.3	Aufbau und Durchführung experimenteller Untersuchungen	62
4.3.1	Probekörpergestaltung	62
4.3.2	Aufweitung und Oberflächenstrukturierung des Aluminiumrohres zur Verbesserung der Adhäsion	63
4.3.3	Herstellung der Probekörper	69
4.3.4	Durchführung der Dichtigkeitsprüfung	70
4.4	Ergebnisse und Diskussion	71
4.4.1	Abrasiv Oberflächenbearbeitung	71
4.4.2	Laserstrukturierung	75
4.5	Zusammenfassung	81
5	Verbund zur simultanen Optimierung der Festigkeit und Dichtigkeit	82
5.1	Zielsetzung und methodisches Vorgehen	82
5.2	Vorbehandlung des Aluminiums	83
5.3	Prozessparameteranalyse anhand statistischer Versuchsplanung	89
5.3.1	Herstellung und Prüfung der Probekörper	90
5.3.2	Methodisches Vorgehen	90
5.3.3	Screening	91
5.3.4	Quadratischer Versuchsplan und Bestimmung der optimalen Parameter	92
5.4	Lebensdaueruntersuchungen der Kunststoff-Metall-Verbindungen	95
5.4.1	Konditionierung	96
5.4.2	Alterung	96
5.5	Minimierung der Kunststoff-Anbindung	98
5.6	Vergleich der beiden Vorbehandlungen des Aluminiums	104
6	Erweiterung des kombinierten Probekörpers	106
6.1	Zielsetzung und Methode	106

6.2	Simultane Herstellung von fünf Anbindungen in einem Probekörper	106
6.2.1	Konstruktion, Fertigung und Prüfung des Probekörpers	106
6.2.2	Prozessparameteranalyse	108
6.2.3	Vergleich 1-Rohr-Verbund und 5-Rohr-Verbund	111
6.3	Konzept eines Bauteils mit einer Vielzahl von Anbindungen	112
6.4	Zusammenfassung	114
7	Zusammenfassung und Ausblick	115
	Literaturverzeichnis	118
	Anhang A: Technische Zeichnungen	129
	Anhang B: Werkstoffdaten	139
	Anhang C: Versuchspläne und Ergebnisse	152

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufteilung der Adhäsion in ihre Erklärungsmodelle	5
2.2	Darstellung der mechanischen Verankerung	6
2.3	Einteilung von Oberflächenunebenheiten	6
2.4	Auftretende Bindungsarten im spezifischen Adhäsionsmodell	8
2.5	Einteilung der Verfahren zur Herstellung von Verbindungen nach DIN	12
2.6	Einteilung der Verfahren zur Herstellung von Kunststoff-Metall-Verbindungen	12
2.7	Verstärkung eines Kunststoffbauteils mit Metallgewinden	13
2.8	Beispiele für die Outsert-Technik	14
2.9	Beispiele für die Hybrid-Technik	15
2.10	Schematischer Ablauf beim Silanisieren	21
2.11	Beispiele für die makro-mechanische Verklammerung	22
2.12	Beispiele für die mikro-mechanische Verklammerung infolge chemischer und physikalisch-mechanischer Vorbehandlung	24
2.13	Einfluss stark abrasiver Strahlmedien auf die Qualität der Aluminium-PA 66-Verbindung	28
2.14	Oberflächenvergleich nach abrasiver Strahlung	29
2.15	Querschnitt einer mit Edelmetall gestrahlten und mit PA 66 umspritzten Aluminiumoberfläche	30
2.16	Einfluss verschiedener Oberflächenmodifikationen auf die Qualität einer Aluminium-PA 66-Verbindung	30
2.17	Strahlung mit Glasperlen	31
3.1	Schematische Rauheits-Festigkeitskurve für geklebte Probekörper	36
3.2	Schematische Rauheits-Festigkeitskurve für geklebte sowie IMA-Verbunde	38
3.3	Probekörper zur Bestimmung der Scherfestigkeit eines IMA-Verbundes	40
3.4	Probekörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit eines IMA-Verbundes	41
3.5	Einfluss der konstruktiven Schwindungskompensation auf die innere Formteilqualität	42
3.6	Arithmetischer Mittenrauwert R_a bei verschiedenen Edelmetallkörnungen	44
3.7	Experimentelle Rauheits-Scherfestigkeitskurve für geklebte Verbunde	45

3.8	Experimentelle Rauheits-Zugfestigkeitskurve für geklebte Verbunde	45
3.9	Bruchflächenuntersuchung der geklebten Verbunde	46
3.10	Experimentelle Rauheits-Scherfestigkeitskurve für IMA-Verbunde	47
3.11	Experimentelle Rauheits-Zugfestigkeitskurve für IMA-Verbunde	48
3.12	Bruchflächenuntersuchungen der IMA-Verbunde	49
3.13	Simulierte Proben der Rauheits-Scherfestigkeitskurve	52
3.14	Schematischer Simulationsaufbau	53
3.15	Vergleich der Simulationsergebnisse der letzten adhäsiv versagenden und der ersten kohäsiv versagenden Probe	55
3.16	Auswertung der von-Mises-Spannung im Kunststoff	55
3.17	Kohäsivbruch infolge Rissinitiierung in der Simulation	56
3.18	Kohäsionsbruch des Kunststoffes bei einem experimentellen Probekörper	56
4.1	Erzielte Leckraten von IMA-Verbindungen bei unterschiedlichen Vorbehandlungen von CuSn6 und verschiedenen Kunststoffen	59
4.2	CAD Modell des Dichtprobekörpers	63
4.3	CT des Dichtprobekörpers	64
4.4	Vergleich zwischen Experiment und Simulation beim Aufweiten des Aluminiumrohres	65
4.5	Darstellung der Parameter für die Aufweitung und Konturierung des Aluminiumrohres	66
4.6	Ergebnis der statistischen Versuchsplanung für die Aufweitung und Konturierung	67
4.7	Vergleich der Spanngverteilung im Kunststoff bei einer Aufweitung der Achsen	67
4.8	Geometrieänderung des Aluminiumrohres nach der optimalen Aufweitung . . .	68
4.9	Dickenänderung des Aluminiumrohres infolge der Aufweitung	68
4.10	Parameter der Laserstrukturen	70
4.11	Experimentelle Rauheits-Druckabfallkurve	72
4.12	Schematische Darstellung einer ungefüllten Struktur einer IMA-Verbindung . .	73
4.13	Querschliff der Dichtprobekörper	74
4.14	Ergebnis der statistischen Versuchsplanung für die punktförmigen Laserstrukturen	76
4.15	Oberflächentopographische Aufnahmen von Lochstrukturen	78
4.16	Abstände der Laserlöcher zueinander	79
4.17	Ergebnis der statistischen Versuchsplanung für die linienförmigen Laserstrukturen	79
4.18	Abstände der linienförmigen Laserstrukturen zueinander	80
5.1	Makroverformung des Aluminiumrohres	84
5.2	Zugprüfung von Verbindung 2	85

5.3	CT-Aufnahme von Verbindung 2	85
5.4	Einfluss der Wärmebehandlung des Aluminiumrohres auf die Festigkeit und Dichtigkeit	86
5.5	CT-Aufnahmen bei unterschiedlichen Temperaturen der Wärmebehandlung . .	87
5.6	Zugprüfung von Verbindung 2 mit umgeklappter Stauchung	87
5.7	CT-Aufnahme von Verbindung 2 mit umgeklappter Stauchung	88
5.8	Dickenänderung des Aluminiumrohres infolge der Stauchung	89
5.9	Pareto-Diagramme der beiden Zielgrößen	93
5.10	Beschreibungsfunktionen für die signifikanten Prozessparameter	94
5.11	Ergebnisse der Konditionierung von Verbindung 2 an Luft	97
5.12	Probe nach der Alterung	97
5.13	PPA-Probe nach der Alterung	98
5.14	Beschreibungsfunktionen für die Minimierung der Anbindung	99
5.15	Beschädigung der verkürzten Probekörper bei der Herstellung	100
5.16	Beschädigung des Aluminiumrohres bei der Herstellung des minimalen Probekörpers	101
5.17	Vergleich der Werkzeugeinsätze für die maximale und minimale Anbindung . .	102
5.18	Simulationsmodell des Werkzeugeinsatzes	103
5.19	Ergebnisse der Temperatursimulation der Werkzeugeinsätze	104
6.1	Vorgehen zur Konstruktion des 5-Rohr-Verbundes	107
6.2	Maße zur Klassifikation der Geometrieabweichung und damit der Bindenahtqualität	108
6.3	Pareto-Diagramme der beiden Zielgrößen des 5-Rohr-Verbundes	110
6.4	Beschreibungsfunktionen für die signifikanten Prozessparameter des 5-Rohr-Verbundes	111
6.5	Vergleich des Druckabfalls beim 1-Rohr-Verbund und 5-Rohr-Verbund	112
6.6	Konzept eines Bauteils mit 50 Kunststoff-Metall-Anbindungen	113
6.7	Bionischer Ansatz „Wirbelsäule“ zur Herstellung eines Bauteils mit mehreren Anbindungen.	113

Tabellenverzeichnis

3.1	Spritzgussparameter zur Herstellung der IMA-Zug- und Scherprobekörper . . .	43
3.2	Übersicht über die simulierten Scherprobekörper	53
4.1	Grenzwerte für die Aufweitung und Konturierung der Aluminiumrohre	66
5.1	Untersuchte Spritzgussparameter	92
6.1	Untersuchte Spritzgussparameter des 5-Rohr-Verbundes	109

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

R_a	arithmetischer Mittenrauwert
R_m	Zugfestigkeit
σ_n	Normalspannung in der Fügefläche
σ_t	Tangentialspannung in der Fügefläche
T_S	Schmelztemperatur
α_{St}	Wärmeausdehnungskoeffizient von Stahl
ΔL	Längenunterschied
ΔT	Temperaturunterschied

Abkürzungen

IMA	In-Mould Assembly	DLJ	Double-Lap-Joint
PMA	Post Moulding Assembly	CAD	Computer-Aided Design
DIN	Deutsches Institut für Normung	EK	Edelkorund
PA	Polyamid	PPS	Polyphenylensulfid
TTP	Triazine trithiol polymer	GF	Glasfasern
PAA	Phosphoric acid anodizing	CT	Computertomographie
SAA	Sulfuric acid anodizing	PSE	Pseudo-Standard-Fehler
PAD	Post-anodizing dip	PPA	Polyphthalamid
CFRP	Carbon fiber reinforced plastic	1RV	1-Rohr-Verbund
FEM	Finite-Elemente-Methode	5RV	5-Rohr-Verbund
SLJ	Single-Lap-Joint		

1 Einleitung und Motivation

In den letzten Jahren haben Hybridbauteile in der industriellen Anwendung immer größere Bedeutung erlangt. Durch ihren Einsatz werden zum Beispiel in der Automobil- oder Luftfahrtindustrie die steigenden Anforderungen nach Kosteneffizienz und der Minimierung des Kraftstoffverbrauchs durch Gewichtsreduktion bei gleichbleibender Festigkeit erfüllt. Hybridbauteile bestehen aus einem Verbund von mindestens zwei unterschiedlichen Werkstoffen, deren positive Werkstoffeigenschaften gezielt kombiniert werden. So kann bei einem Kunststoff-Metall-Verbund beispielsweise das Kunststoffbauteil durch Metall verstärkt und das Metall durch den Kunststoff von einer korrosiven Umgebung isoliert werden [1, 2]. Häufig werden ein glasfaserverstärkter Kunststoff und ein Leichtmetall wie z. B. Aluminium verwendet.

Durch das Spritzgussverfahren zur Herstellung von Kunststoff-Metall-Verbunden ergeben sich auch neue Herausforderungen. So wird insbesondere die Herstellung eines mediendichten Verbundes zunehmend gefordert. Zur Anwendung kommt dieser bereits bei Steckerkontakten. Hierbei wird die Leitfähigkeit des Metalls mit der isolierenden Wirkung des Kunststoffes kombiniert. Es ist eine dauerhafte Dichtigkeit der Kunststoff-Metall-Verbindung erforderlich, da ansonsten Feuchtigkeit von der Steckerseite in die Elektronik eindringen und Kurzschlüsse oder Korrosion verursachen kann [3]. Ein bisher nicht untersuchtes Einsatzgebiet sind Wärmetauscher, die im automobilen Bereich eingesetzt werden, und die den Gegenstand der vorliegenden Arbeit bilden. Diese können von der Gewichtsreduktion durch die Kunststoff-Metall-Verbindung profitieren. Ferner würde die Kunststoffkomponente eine größere Freiheit bei der geometrischen Gestaltung des ansonsten in der Regel eben ausgeführten Wärmetauschers erlauben. Während der Lebensdauer des Bauteils darf jedoch keine Undichtigkeit entstehen, da ansonsten Kühlmittel austreten kann. Zusätzlich ist auch die Festigkeit der Verbindung von Interesse, da die Wärmetauscher hohen statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt ist.

Zur Fertigung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen existiert eine Vielzahl an Verfahren. Nicht alle sind jedoch zur Herstellung von festen und mediendichten Verbunden geeignet. Die Herausforderung liegt insbesondere darin, zwei Materialien mit unterschiedlichen mechanischen und thermischen Eigenschaften zu verbinden. Die Verbindung kann z. B. mechanisch (Schrauben, Nieten), physisch (Schweißen) oder chemisch (Kleben) erfolgen. Diese Verfahren, bei denen die Verbindung erst nach dem Urformprozess des Kunststoffes erfolgt, werden als PMA-Verfahren (Post Moulding Assembly) bezeichnet. Insbesondere das Kleben weist einige Vorteile auf, z. B. keine Spannungskonzentration an den Bohrungen für die Schrauben, keine thermische Be-

einflussung und eine konstante Spannungsverteilung. Allerdings existieren auch entscheidende Nachteile, wie z. B. die Notwendigkeit eines weiteren Werkstoffes mit spezifischen Eigenschaften oder die Aushärtezeiten des Klebstoffes [4].

Die Verbindung von Kunststoff und Metall kann auch direkt durch den Spritzgussprozess erzeugt werden (In-Mould Assembly, IMA). Dazu wird das Metall in das Spritzgusswerkzeug eingelegt und mit Schmelze umspritzt. Beim Abkühlen des Kunststoffes schrumpft dieser auf das Metall auf und erzeugt eine feste Verbindung. Zur Verbesserung dieser Verbindung kann die Oberfläche des Metalls vorbehandelt werden [5]. Diese Fügung gleicht einer Klebverbindung, wobei der Kunststoff sowohl die Funktion des Klebstoffes als auch die einer Träger- und/oder Funktionskomponente erfüllt. So können mit geringem Fertigungsaufwand die Vorteile einer Klebeverbindung bei gleichzeitiger Minimierung der Nachteile erzielt werden.

Ungeachtet dieser Vorteile existieren im aktuellen Stand der Technik jedoch erst wenige Erkenntnisse zu einem mediendichten und festen IMA-Verbund. Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung eines Spritzgussverfahrens, um Kunststoff und Metall zu einem Probekörper mit den folgenden Eigenschaften zu verbinden:

- Der Probekörper soll eine Vielzahl an mediendichten und festen Kunststoff-Metall-Verbindungen aufweisen sowie stabil gegenüber thermischer Beanspruchung sein.
- Die Funktionalität der Verbindung soll über die typische Lebensdauer einer Komponente im Automobilbereich sichergestellt sein.
- Die Verbindung soll keine funktionelle Unterstützung durch ein Zusatzmaterial erhalten.
- Die Fertigung des Probekörpers soll upscale-fähig und mit wenig Aufwand in bestehende Prozessketten integrierbar sein.

Zur Realisierung der aufgestellten Anforderungen werden zunächst Teilziele festgelegt. Diese ergeben die folgenden Themenkomplexe, die durch die einzelnen Kapitel gegliedert werden:

Im ersten Schritt werden zunächst die grundlegenden chemischen, physikalischen und prozesstechnischen Eigenschaften einer Kunststoff-Metall-Verbindung analysiert. Basierend auf diesen Ergebnissen, werden Verfahren zur Verbesserung der Anhaftung vorgestellt. Das wird insbesondere über die Vorbehandlung des Metalls erzielt. In Vorversuchen werden diese Vorbehandlungen für den konkreten Fall bewertet und eine Auswahl für weiterführende Untersuchungen getroffen.

Zur Beurteilung der Auswirkungen einer Vorbehandlung des Metalls auf die Festigkeit der Verbindung wird zunächst der Stand der Technik betrachtet. Da nur wenige Ergebnisse zu IMA-Verbindungen vorhanden sind, werden Ergebnisse für geklebte Verbunde auf den vorliegenden Fall übertragen. Die Entwicklung und Auswertung von Probekörpern ermöglicht Vergleiche mit

der Literatur und eine detaillierte Analyse der mikrostrukturellen Vorgänge. Durch den Aufbau eines numerischen Simulationsmodells können die experimentellen Erkenntnisse verifiziert und erweitert werden.

Die Untersuchungen zur Mediendichtigkeit erfolgen nach einer vergleichbaren Methode: in Anlehnung an den Stand der Technik werden experimentelle Untersuchungen durchgeführt, durch die die Auswirkungen von Oberflächenmodifizierungen auf die Leckage und die Vorgänge an der Grenzfläche beschrieben werden können. Aufbauend auf den Ergebnissen der einzelnen Untersuchungen der Festigkeit und Dichtigkeit werden diese in einem Probekörper kombiniert. Durch die gleichzeitige Optimierung der beiden Zielgrößen ergeben sich neue Herausforderungen und Fragestellungen. Zudem wird eine Prozessparameteranalyse des Spritzgussprozesses durchgeführt. Durch die Methoden der statistischen Versuchsplanung wird der Versuchsaufwand der Analyse reduziert und statistisch abgesichert. Zur Sicherstellung der dauerhaften Funktionalität der Verbindung werden Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt.

Abschließend wird aus den Ergebnissen der simultanen Optimierung ein Probekörper mit einer Vielzahl an Kunststoff-Metall-Verbindungen entwickelt. Die Ergebnisse sollen u. a. eine Applikation des Probekörpers als industrielle Komponente ermöglichen.

2 Physikalische und prozesstechnische Grundlagen

2.1 Grundlagen der Adhäsion

Werden zwei beliebige Körper gefügt, entsteht zwischen ihnen eine Grenzfläche. Die an dieser Grenzfläche auftretenden interatomaren und intermolekularen Wechselwirkungen werden als Adhäsion bezeichnet [6]. Die Haftfestigkeit eines Verbundes wird durch diese Vorgänge an der Grenzfläche beeinflusst. Daher ist es das Ziel von Arbeiten, die sich schwerpunktmäßig mit dem Thema der Adhäsion beschäftigen, die Ausbildung und die Festigkeit adhäsiver Bindungen zu beschreiben. Dazu werden die thermodynamischen Grundlagen der Benetzung, der Oberflächen- und Grenzflächenenergie sowie die auftretenden chemischen und/oder zwischenmolekularen Bindungen betrachtet [4].

Bei realen Bauteilen wird die Adhäsion durch komplexe Mechanismen beschrieben, die bislang nicht vollständig verstanden sind [7]. Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Quellen zum Thema der Adhäsion zeigen, dass es bislang nicht gelungen ist, eine allgemeingültige Adhäsionstheorie zu entwickeln. Adhäsion wird derzeit als Mischung aus zwei Adhäsionsmodellen beschrieben, vgl. Abbildung 2.1: Das *spezifische Adhäsionsmodell*, das die physikalischen, chemischen und thermodynamischen Vorgänge in der Zwischenschicht berücksichtigt, und das *mechanische Adhäsionsmodell*, das auf den physikalisch-mechanischen Kräften der Zwischenschicht basiert [2, 4, 8]. Als zusätzliches Adhäsionsmodell existiert weiterhin noch die Autoadhäsion. Diese tritt allerdings nur bei der Vereinigung kautschukelastischer Polymerschichten des gleichen Materials auf [4].

2.1.1 Mechanisches Adhäsionsmodell

Das Modell der mechanischen Adhäsion ist eine der ältesten Adhäsionstheorien und wurde erstmals 1925 von MacBain vorgestellt [12]. Mechanische Adhäsion entsteht durch das Eindringen eines flüssigen Fügepartners (z. B. Klebstoff) in die Poren, Hinterschneidungen oder Kapillaren einer porösen Oberfläche. Wie in Abbildung 2.2 (a) und (b) dargestellt, wird dieser beim Erstarren durch die Entstehung einer formschlüssigen mechanischen Verankerung mit der Oberfläche an einem Herausgleiten unter Belastung gehindert. Gemäß [13] existieren drei

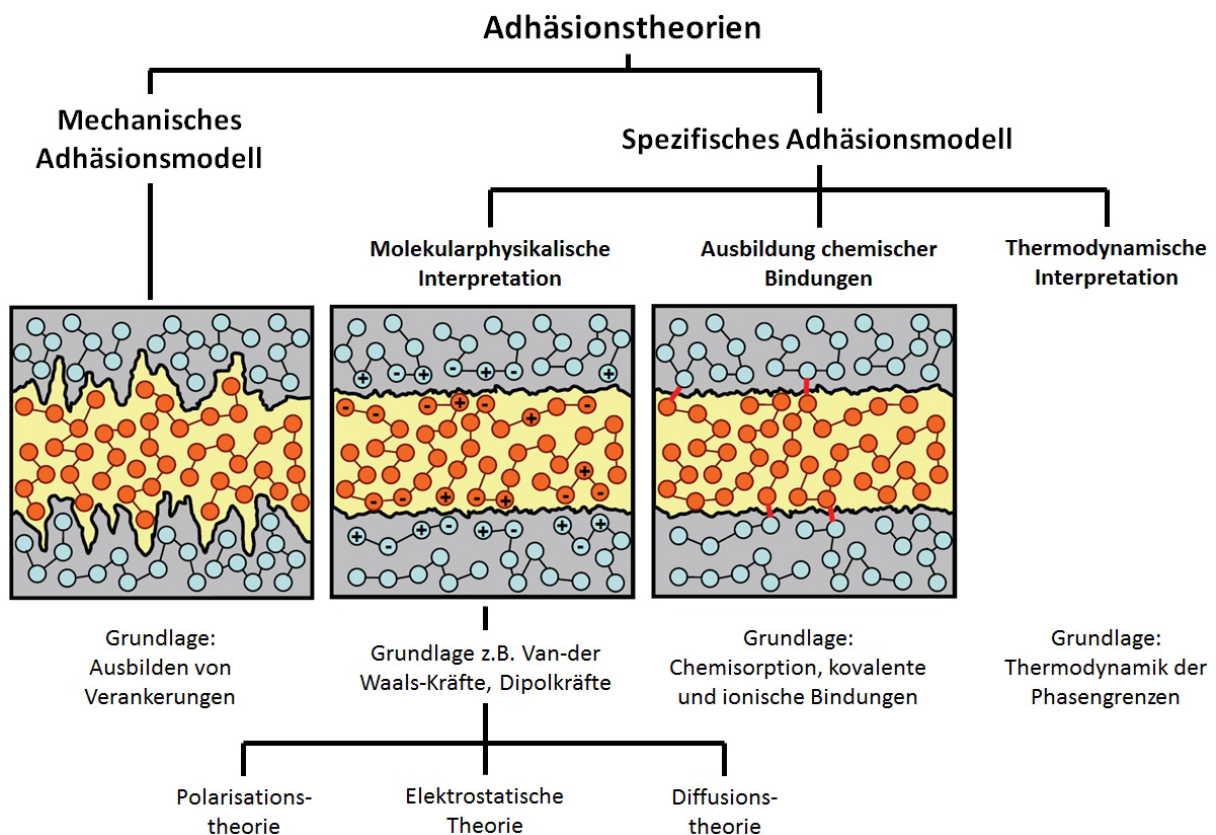


Abbildung 2.1: Aufteilung der Adhäsion in ihre Erklärungsmodelle nach [9–11]

Arten von Oberflächenunebenheiten, vgl. Abbildung 2.3. Jedoch ermöglicht nur Variante (b) eine mechanische Verklammerung im eigentlichen Sinne, bei Variante (a) oder (c) hängt die Stärke der Verklammerung von der Belastungsrichtung ab. So kann bei einer Beanspruchung senkrecht zur Oberfläche ohne zusätzliche Betrachtung der spezifischen Adhäsion nur eine Lastübertragung stattfinden [2, 4, 14].

Da die mechanische Adhäsion stark von der Struktur, Benetzbarkeit und Größe der Oberfläche des festen Fügepartners abhängig ist, kann diese zur Verbesserung der Haftung z. B. physikalisch oder chemisch modifiziert werden. Dabei wird die Oberfläche gereinigt, aktiviert und/oder vergrößert. Die Vergrößerung begünstigt die Adhäsion, da sich mehr Verankerungen bilden können [14]. Diese Aussage ist jedoch noch nicht vollständig geklärt. So gibt es die Theorie, dass durch die Vergrößerung der Oberfläche nicht die Verhakungen zu einer Verbesserung der Haftfestigkeit führen, sondern dass eine vergrößerte Oberfläche lediglich mehr Verbindungsmöglichkeiten für die spezifische Adhäsion erzeugt. Awaja [15] bietet einen detaillierten Überblick über diese unterschiedlichen Ansichten.

Unter der Voraussetzung, dass der flüssige Fügepartner über günstige rheologische Eigenschaften verfügt, um in die Poren des Substrates einzudringen bevor er aushärtet, kann die

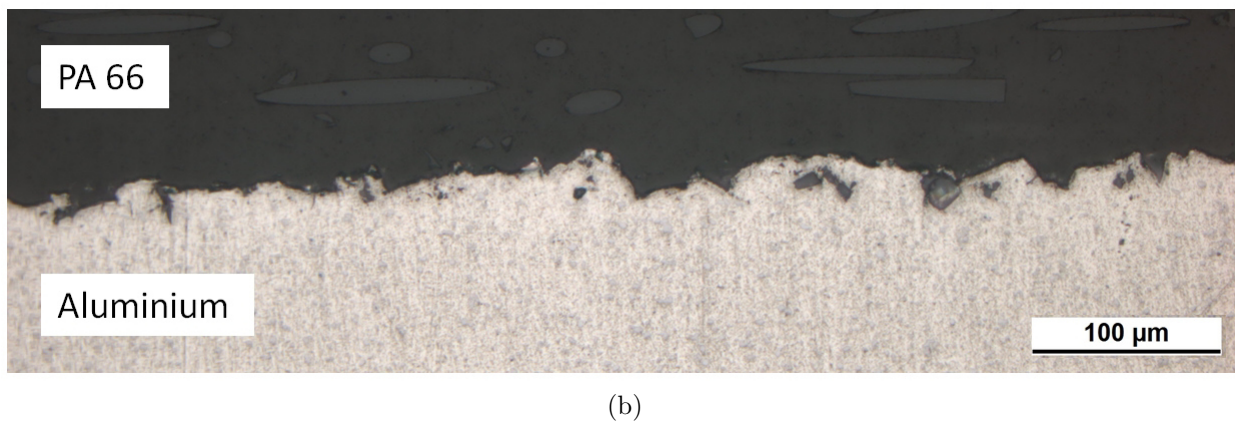
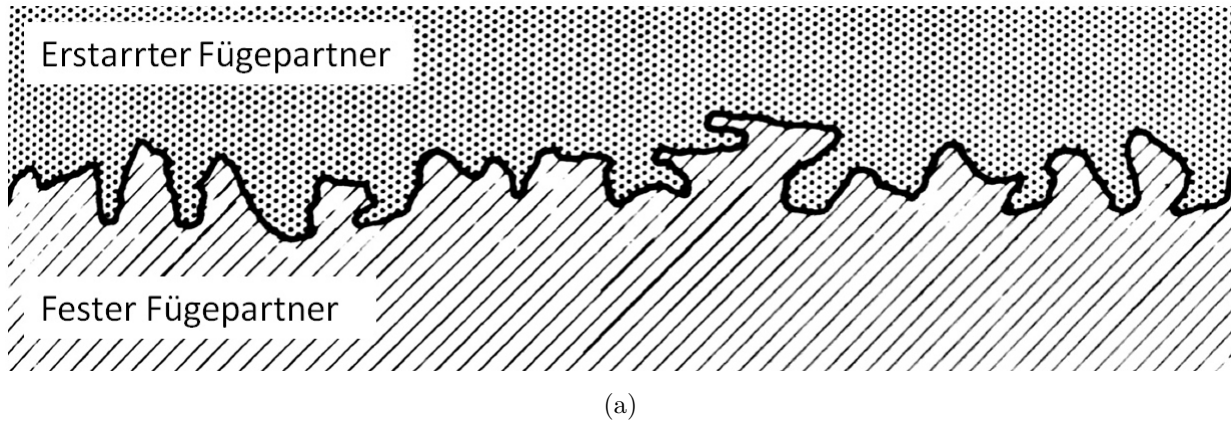


Abbildung 2.2: Darstellung der mechanischen Verankerung: (a) schematisch nach [4] und (b) reale Aufnahme einer Direktanspritzung von PA 66 auf Aluminium

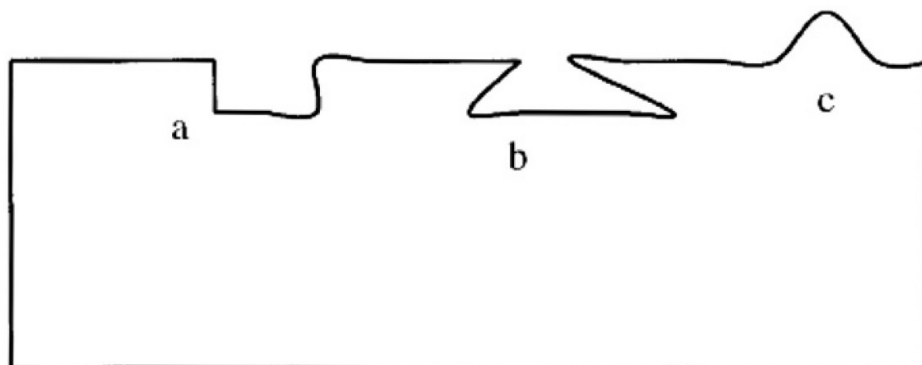


Abbildung 2.3: Einteilung von Oberflächenunebenheiten. Nur Variante (b) ermöglicht eine mechanische Verklammerung im eigentlichen Sinne.

Oberflächenrauheit des Fügepartners zur Bestimmung der Güte der Adhäsion verwendet werden. Auch die Reibungseigenschaften der Fügepartner beeinflussen die Haftstärke [16].

Zu beachten ist, dass durch Oberflächenmodifikationen ebenfalls die Mechanismen der spezifischen Adhäsion verändert werden, z. B. wird durch die Aktivierung der Oberfläche die Thermodynamik in der Grenzschicht beeinflusst. Von daher ist nur eine kombinierte Betrachtung von mechanischer und spezifischer Adhäsion möglich [14]. Dies gilt insbesondere, da das Modell der mechanische Adhäsion an haftenden, glatten Oberflächen (z. B. Glastropfen an einer Glasscheibe) versagt. Weiterhin werden durch Betrachtung der mechanische Adhäsion keine Vorgänge auf molekularer Ebene berücksichtigt. Sie kann daher nur als Teil des Gesamtkomplexes „Adhäsion“ betrachtet werden [16].

2.1.2 Spezifische Adhäsionsmodelle

Da sich allein durch die mechanische Theorie nicht alle auftretenden Adhäsionsphänomene erklären lassen, wurden spezifische Adhäsionsmodelle entwickelt. Diese basieren auf Adhäsionskräften infolge interatomarer und intermolekularer Wechselwirkungen und lassen sich anhand der an der Grenzfläche auftretenden Phänomene einteilen [11].

Bindungsarten

Ursache für die Haftfestigkeit zwischen zwei Körpern sind relativ schwache und schnell mit dem Abstand abfallende Wechselwirkungskräfte, auch als Adhäsionskräfte bezeichnet. Bei starken Bindungen ist die Wechselwirkung ein Austausch von Elektronen zwischen Atomen der chemischen Bindung (interatomar, Hauptvalenzbindungen). Schwache Bindungen werden durch die Polarität zwischen den Molekülen erklärt (intermolekular, Nebervalenzbindungen). Die Haftfestigkeit zweier Körper kann bei ideal glatten (Rauheiten von wenigen Nanometern) und äußerst sauberen Materialien nur infolge der atomaren Wechselwirkungen hohe Werte annehmen. So können sich bei einer Kontaktfläche von 1 cm^2 Haftfestigkeiten von $10 \cdot 10^6 \text{ N}$ ausbilden. Bei Rauheiten von $1 \text{ }\mu\text{m}$ ist diese direkte Adhäsionskraft jedoch bereits verschwindend gering [17]. Eine Übersicht der möglichen auftretenden Bindungsarten ist in Abbildung 2.4 dargestellt [4].

Hauptvalenzbindungen

Hauptvalenzbindungen sind deutlich stärker als Nebervalenzbindungen. Es werden drei Bindungsarten unterschieden [2, 4]:

- Die *kovalente Bindung*, auch homöopolare Bindung, Atombindung oder unpolare Bindung genannt, entsteht durch das Austauschen von Valenzelektronen der Bindungspart-

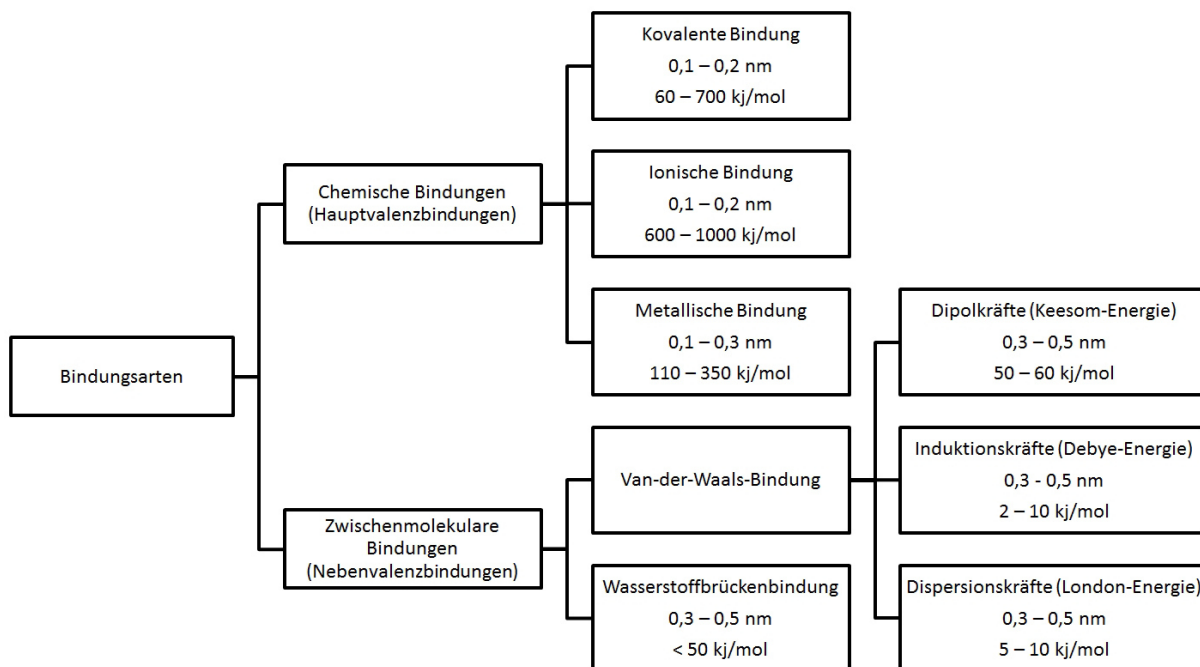


Abbildung 2.4: Auftretende Bindungsarten im spezifischen Adhäsionsmodell nach [4]. Die erste Zahl gibt die Reichweite der Bindungskräfte, die zweite die Bindungsenergie an.

ner. Sie lässt sich durch die Vorbehandlung der zu fügenden Oberflächen teils deutlich verbessern.

- Die *ionische Bindung*, auch heteropolare Bindung, elektrostatische Bindung oder polare Bindung genannt, ist eine chemische Bindung, die auf der elektrostatischen Anziehung positiv und negativ geladener Ionen basiert. Es gibt keine reine ionische Bindung, weil immer zusätzlich eine kovalente Komponente existiert.
- Eine *metallische Bindung* stellt den Bindungstyp von Metallen und Legierungen dar und entsteht durch den Austausch von Valenzelektronen des Metalls.

Nebervalenzbindungen

Nebervalenzbindungen beruhen auf Anziehungs- und Abstoßungskräften, die zwischen valenzmäßig ungesättigten Molekülen wirksam werden. Die Anziehungskräfte werden als Van-der-Waals-Kräfte bezeichnet und setzen sich aus Dipolkräften (Keesom-Energie), Induktionskräften (Debye-Energie) und Dispersionskräften (London-Energie) zusammen. Diese Kräfte treten in jeder Verbindung auf, sind aber nur über sehr geringe Abstände von wenigen Nanometern wirksam. Auf ihnen beruht die hohe Haftfestigkeit bei sehr glatten Körpern [17]. Weiterhin können sich je nach vorhandenen Molekülen Wasserstoffbrückenbindungen bilden. Diese basie-

ren auf einer anziehenden Wechselwirkung eines kovalent gebundenen Wasserstoffatoms mit einem freien Elektronenpaar eines Atoms einer Atomgruppierung. Voraussetzung sind Wasserstoffatome, die mit besonders elektronegativen und kleinen Atomen verbunden sind, oder Polymere, die in Kontakt mit einer oxidierten Fügepartneroberfläche treten (d.h. eine Oberfläche, die Sauerstoffatome enthält oder auch über adsorbierte Wassermoleküle verfügt) [2, 4].

Für reale Bauteile sind diese vier Bindungskräfte aufgrund der geringen Stärke nur von sekundärem Interesse. Da sich ohne Vorbehandlung der Oberflächen jedoch praktisch nur Nebenvale-
nzenbindungen ausbilden, wird zur Erzeugung einer stärkeren Bindung daher fast immer eine Vorbehandlung der Fügepartner angestrebt [2, 4].

Modelle zur Erklärung der spezifischen Adhäsion

Anhand der Phänomene an der Grenzfläche lassen sich drei Modelle unterscheiden: die molekularphysikalische Interpretation der Grenzflächenvorgänge, die Ausbildung chemischer Bindungen bei der Adhäsion und die thermodynamische Interpretation der Grenzflächenvorgänge.

Molekularphysikalische Interpretation

Bei der molekularphysikalischen Interpretation der Grenzflächenvorgänge wird die Entstehung einer Haftung durch unterschiedliche physikalische Aspekte beschrieben. Diese wird in drei Theorien untergliedert:

- Die **Polarisationstheorie** wurde 1935 von de Bruyne entwickelt [18]. Sie beruht auf den Wechselwirkungen zwischen Dipolen der an der Fügung beteiligten Atome bzw. Moleküle. Die Adhäsion unpolarer Körper kann durch sie nicht erklärt werden.
- Ausgehend von Ladungsverschiebungen kommt es zur Bildung einer elektrisch geladenen Zone an der Grenzfläche zwischen zwei Körpern [19]. Auf dieser basiert die **elektrostatische Theorie**. Das Modell kann nur bei inkompatiblen Materialien (z. B. Kunststoff und Metall) angewendet werden [20].
- Bei der **Diffusionstheorie** (Voyutskii 1960) wird die Adhäsion durch mikrobrownsche Molekülbewegungen in beiden Phasengrenzflächen erklärt. Voraussetzungen sind die Affinität der Fügepartner zueinander und eine ausreichende Bewegungsmöglichkeit der Moleküle [21]. Metallklebungen können durch die Theorie nicht beschrieben werden.

Ausbildung chemischer Bindungen

Grundlage der Entstehung chemischer Bindungen ist das Auftreten von Chemisorption, wobei starke Hauptvalenzbindungen (z. B. kovalenten Bindungen) zwischen den Fügepartnern

entstehen [11]. Deren Entstehung ist u. a. die Erklärung für die hohen Festigkeitswerte der Grenzschicht beim Auftreten von Kohäsionsbrüchen, d. h. dem Bruch eines Fügepartners [4]. Kovalente Bindungen können nicht nur bei den naheliegenden Kunststoff-Kunststoff-Verbindungen, sondern auch bei Kunststoff-Aluminium-Verbindungen auftreten [22]: Tritt der flüssige Kunststoff (z. B. Kleber) in Kontakt mit adsorbierten Wassermolekülen der Aluminiumoberfläche, reagieren diese über Wasserstoffbrückenbindungen mit den Kunststoffmolekülen und werden so der Oberfläche entzogen. In einem weiteren Schritt gehen die verbleibenden Metalloxid-Verbindungen mit dem Kunststoff ein.

Thermodynamische Interpretation

Die thermodynamische Interpretation der Grenzflächenvorgänge geht von den Überlegungen zur Benetzung der Oberfläche aus [23]. Von Bedeutung ist hierbei die Betrachtung der resultierenden Grenzflächenenergie zwischen der Oberflächenenergie des zu benetzenden Fügepartners und der flüssigen Phase des Fügepartners. Für eine gute Benetzung muss diese eine geringere oder gleichgroße Oberflächenenergie wie die Kontaktfläche des Festkörpers aufweisen. Von Bedeutung sind hierbei vor allem die Struktur der Grenzflächenschicht und die Adsorption [11]. Weiterhin sind die Van-der-Waals-Bindungen von Interesse, denn zur Bestimmung der Oberflächenenergie werden diese in zwei Komponenten aufgeteilt [24]: Dispergierende Kräfte (London-Energie) und Nicht-dispergierende Kräfte (Debye- und Keesom-Energie). Dabei weisen die Nicht-dispergierenden (polaren) Wechselwirkungen deutlich größere Bindungsenergien auf. Als alleinige Erklärung der Adhäsion ist die Theorie jedoch nicht ausreichend, da die für thermodynamische Berechnungen erforderliche Reversibilität nicht gegeben ist. Häufig kann die Haftfestigkeit jedoch durch eine Optimierung der Oberflächenenergie verbessert werden [2, 4].

Die vorgestellten Modelle geben lediglich einen kurzen Überblick über die verbreitetsten Modelle der spezifischen Adhäsionstheorie. Neben diesen gibt es noch weitere, z. B. die Weak Boundary Layer Theorie [25] oder die Säure-Base-Theorie [26]. Für eine detaillierte Übersicht sei auf die Ausführungen von Awaja [15] und Baldan [16] verwiesen.

2.1.3 Schlussfolgerungen für Kunststoff-Aluminium-Verbunde

Für den in dieser Arbeit betrachteten Fall, die direkte Anhaftung von Kunststoff an Aluminium, lassen sich die folgenden Punkte festhalten:

- Das mechanische Adhäsionsmodell eignet sich sehr gut zur Beschreibung, da der Kunststoff in die Rauheit des Aluminiums eindringen kann. Dadurch ist die Oberflächenrauheit ein Mittel zur Beschreibung der Güte der Verbindung.

- Oberflächenmodifizierungen bieten sich an, um die Qualität der Verbindung weiter zu verbessern.
- Da Kunststoff und Metall zueinander inkompatible Materialien sind, können elektrostatische Anziehungskräfte wirken.
- Die Ausbildung von kovalenten Bindungen und Wasserstoffbrückenbindungen ist durch das Vorhandensein von Sauerstoff an der Aluminiumoberfläche möglich. Daher werden auch die deutlich schwächeren Van-der-Waals-Kräfte nicht weiter berücksichtigt.
- Da flüssige Polymerschmelze auf das Aluminium aufgebracht wird, ist eine gute Benetzung Voraussetzung für eine hohe Verbundqualität. Aufgrund der zu erwarteten schlechten Verhältnisse der Oberflächenenergie können zur Verbesserung der Adhäsion spritzgusstypische Parameter (Einspritzdruck, Werkzeugwandtemperatur) betrachtet werden.

2.2 Herstellung von Kunststoff-Metall-Verbindungen

Die Herstellung von Kunststoff-Metall-Verbindungen kann für beliebige Materialpaarungen gemäß DIN 8593-0 [27] in neun Gruppen von Fertigungsverfahren der Fertigungshauptgruppe „Fügen“ eingeteilt werden, vgl. Abbildung 2.5. Eine Klassifikation für Kunststoff-Metall-Verbindungen ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Hierbei werden die Herstellungsverfahren in simultane bzw. konsekutive und sequentielle Verfahren eingeteilt [2, 28]:

- Simultane bzw. konsekutive Verfahren werden als IMA-Verfahren bezeichnet (**In-Mould Assembly**). Die Verbindung wird hierbei im Urformprozess des Kunststoffes (z. B. im Spritzgießwerkzeug) geschaffen. Sie können weiter in die Insert-, Outsert- und Hybrid-Technologie unterteilt werden.
- Sequentielle Verfahren werden als PMA-Verfahren (**Post Moulding Assembly**) zusammengefasst. Die Verbindung wird nach dem Urformprozess durch mechanische Montage, Kleben oder thermisches Fügen geschaffen.

Die beiden Verfahren sollen im Folgenden näher vorgestellt werden. Es ist anzumerken, dass die Qualität einer Kunststoff-Metall-Verbindung in der Literatur fast ausschließlich über die Festigkeit des Verbundes bewertet wird. Daher können die einzelnen Verfahren größtenteils nur in ihrem Nutzen zur Festigkeitssteigerung vorgestellt werden.

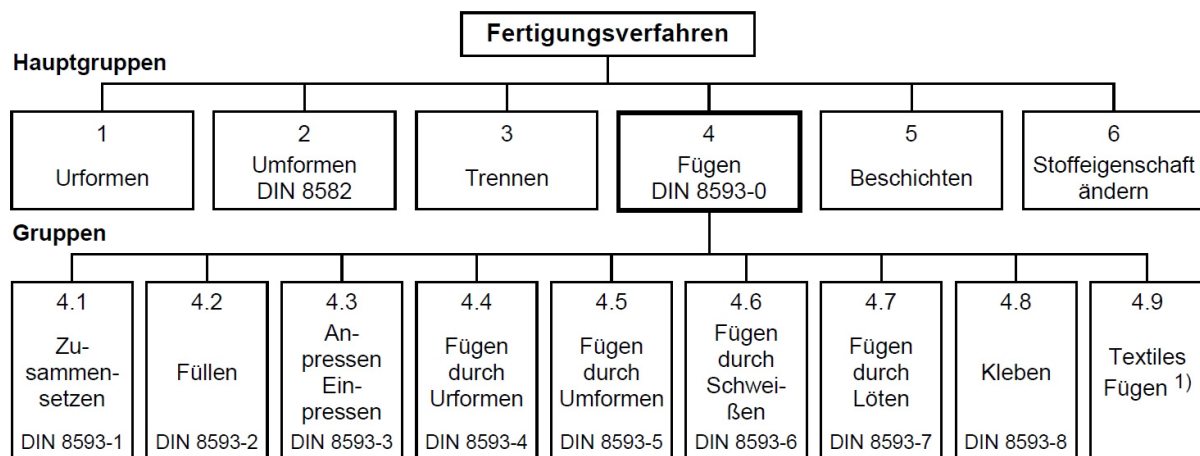


Abbildung 2.5: Einteilung der Verfahren zur Herstellung von Verbindungen nach DIN 8593-0 [27]

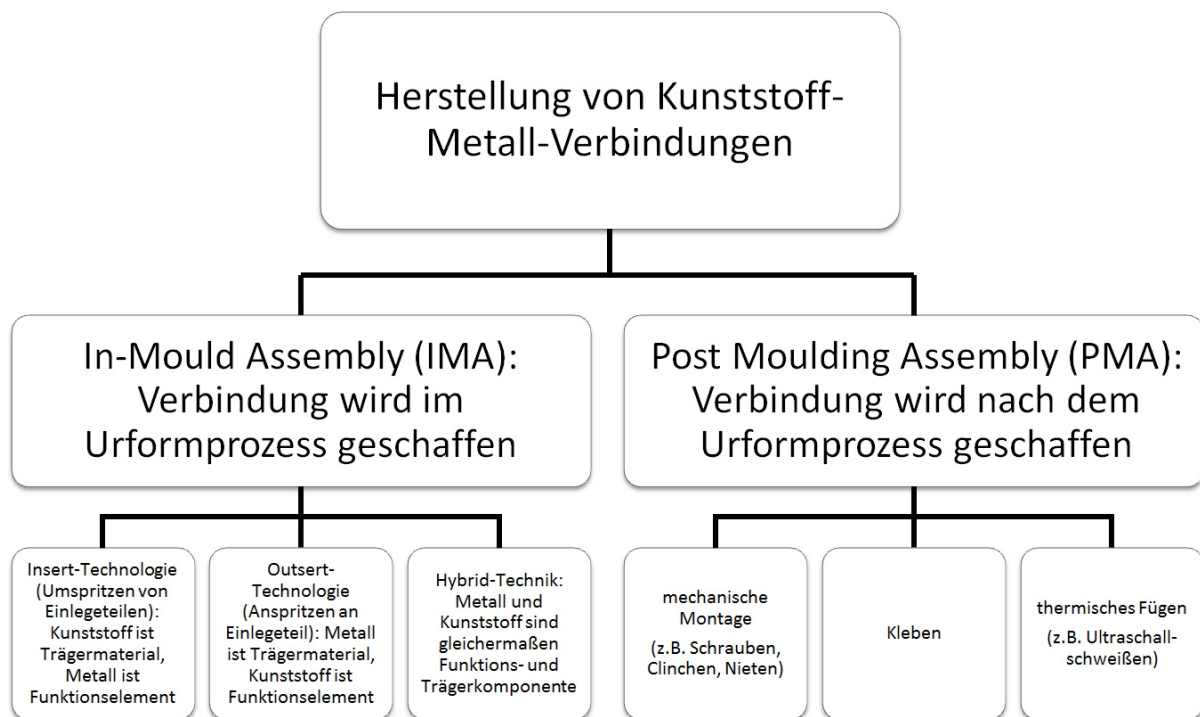


Abbildung 2.6: Einteilung der Verfahren zur Herstellung von Kunststoff-Metall-Verbindungen

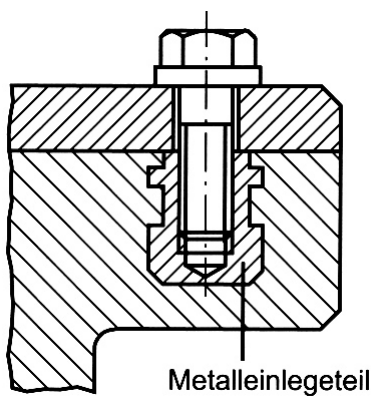
2.2.1 In-Mould Assembly

Entsteht die Verbindung zwischen Kunststoff und Metall bereits im Urformprozess des Kunststoffes, wird das Verfahren als In-Mould Assembly bezeichnet. Dabei wird immer ein Einlegeteil an- oder umspritzt. Das Verfahren lässt sich in die Insert-, Outsert- und Hybridtechnologie un-

tergliedern [2, 29]. Während mit der Insert- und Outserttechnik kleinere Platinen und Bauteile ohne hohe Festigkeitsanforderungen gefertigt werden, kommt die Hybridtechnologie hauptsächlich zur Herstellung großflächiger, hochbeanspruchter Bauteile zum Einsatz [30].

Insert-Technik

Das Umspritzen von Metallbauteilen (Inserts) mit Kunststoff wird unter anderem verwendet, um örtlich hohe Kräfte in ein Kunststoffbauteil einzuleiten [30]. Wie in Abbildung 2.7 dargestellt werden dazu z. B. präzise Metallgewindebuchsen in ein Kunststoffteil eingebracht. Weitere Einsatzgebiete sind beispielsweise die Erzeugung elektrisch leitfähiger Kunststoffteile, die Versteifung von Kunststoff oder das ergonomische Umhüllen von Metallteilen mit Kunststoff (z. B. Schraubendreher). Allen Anwendungen ist gemeinsam, dass der Kunststoff als



(a)



(b)

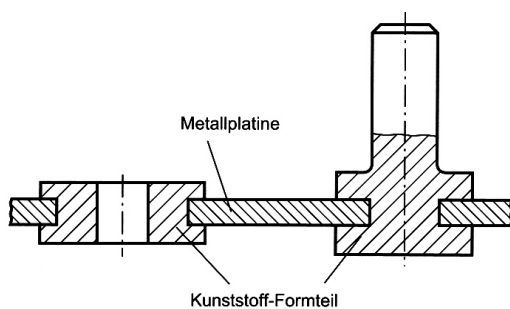
Abbildung 2.7: Verstärkung eines Kunststoffbauteils mit Metallgewinden (a) schematisch [2], (b) Kühlmittelverteiler von Ford [31]

Trägermaterial für ein Funktionsbauteil aus Metall dient bzw. das Kunststoffteil in Gewicht und Volumen das Metall überwiegt und den strukturellen Zusammenhalt des Verbundes bildet. Die Haftung entsteht infolge einer rein kraftschlüssigen Verbindung (Aufschrumpfen des Kunststoffes infolge Schwindung auf das Metall), einer form- und kraftschlüssigen Verbindung (Durchfließen von dafür vorgesehenen Aussparungen im Metall) und/oder einer stoffschlüssigen Verbindung (Anbindung des Kunststoffes infolge der spezifischen Adhäsion) [5, 32, 33]. Bei der Insert-Technik werden hohe Anforderungen an die geometrischen Toleranzen des Inserts gestellt, da dieses evtl. eine abdichtende aber trotzdem entlüftende Funktion gegenüber der Schmelze aufweisen muss. Zudem erfordern die Inserts häufig eine präzise Position im Bauteil. Weiterhin muss die Schwindung des Kunststoffes kontrolliert werden. Eine Vorbehandlung der

Inserts ist nicht immer erforderlich, kann aber die Anhaftung verbessern. Die Insert-Technik kann auch mit dem Umformen des Metalls durch die Schmelze kombiniert werden, wodurch sich die evtl. notwendigen Vorbehandlungsschritte des Inserts reduzieren [29].

Outsert-Technik

Bei der Outsert-Technik fungiert das Metall als Trägermaterial, an das ein Funktionselement aus Kunststoff gespritzt wird [34]. Wie Abbildung 2.8 zeigt sind durch die gleichzeitige Fertigung und Montage mehrerer Funktionselemente beidseitig an eine Trägerplatte komplexe und kostengünstige Bauteile möglich. Die Haftung entsteht wie bei der Insert-Technik kraftschlüssig, kraft- und formschlüssig und/oder stoffschlüssig. Durch die Outsert-Technik können entweder Ganzmetallbauteile durch gezielte Substitution verbessert oder der Montageaufwand von Kunststoff-Metall-Platinen reduziert werden, z. B. aufgrund der Verringerung des Handlings, dem Wegfall der Nacharbeit etc. Dadurch sind Bauteilreduzierungen von bis zu 65 % und Kostenvorteile von 50 % möglich [35]. Die Outsert-Technik wird hauptsächlich für kleine Bauelemente eingesetzt und weist hohe Anforderungen an die Gestaltung und Toleranz der Bauteile auf. Wie bei der Insert-Technik ist die Schwindung zu kontrollieren: so ist eine hohe Schwindung zwar vorteilhaft für den Kraftschluss, kann aber zur Zerstörung der Funktionselemente führen [2, 35].



(a)



(b)

Abbildung 2.8: (a) Outsert-Technik schematisch [2], (b) Kleintriebe einer Spritzenpumpe, hergestellt mit der Outsert-Technik [35]

Hybrid-Technik

Im Gegensatz zur Insert- und Outsert-Technik können mit der Hybrid-Technik auch großflächige, steife und mechanisch vielfältig belastete Bauteile gefertigt werden [30, 36]. Die Herstellung erfolgt ähnlich der Insert-Technik: ein Blechteil wird in das Spritzgusswerkzeug eingelegt und mit Schmelze angespritzt oder umspritzt. Diese fließt dabei in dafür vorgesehene eingestanzte Öffnungen. Dadurch bilden sich wie bei der Insert- und Outsert-Technik kraftschlüssige, form- und kraftschlüssige und/oder stoffschlüssige Verbindungen. So werden nicht nur die positiven Werkstoffeigenschaften (hohe Festigkeit und Steifigkeit des Metalls, geringes Gewicht und Gestaltungsfreiheit des Kunststoffes) kombiniert, sondern auch die wirtschaftlichsten Methoden der Massenfertigung (Metall-Tiefziehen und Kunststoff-Spritzgießen) zur Erzeugung zuverlässig reproduzierbarer Fertigungstoleranzen. Zur Anwendung kommt die Hybridtechnologie, z. B. um umgeformte Metallbleche, die als tragende Komponente fungieren, mit Verstärkungselementen wie Rippen oder Funktionselementen aus Kunststoff zu verbinden, vgl. Abbildung 2.9. Dieses wird auch häufig mit dem Umspritzen von Metallinserts kombiniert. Eine rein optische

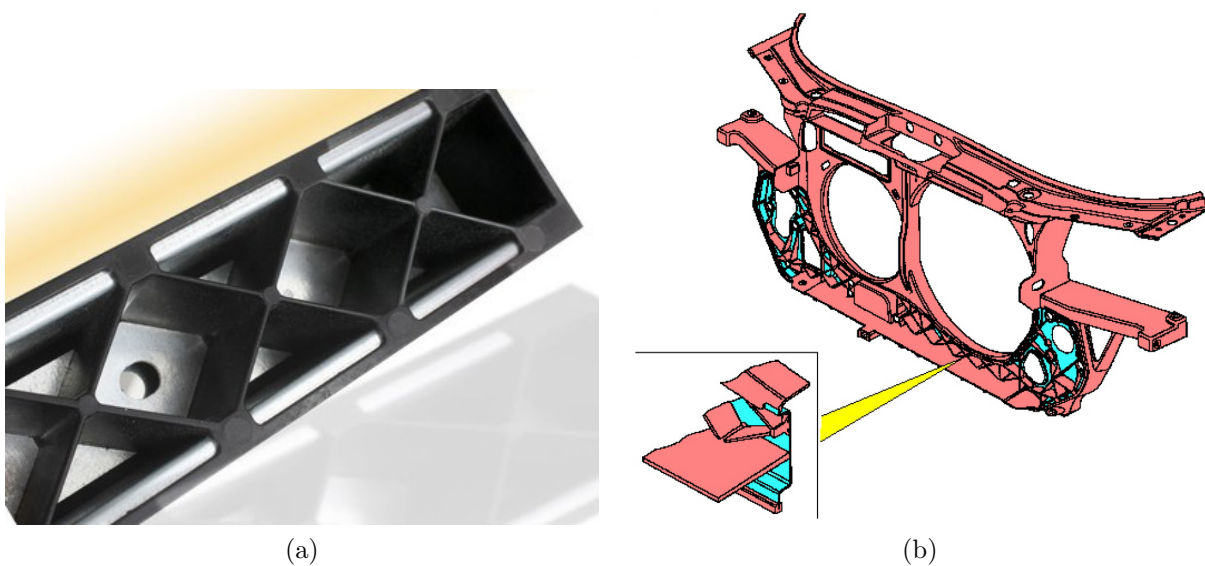


Abbildung 2.9: Beispiele für die Hybrid-Technik: (a) Rippenversteifung eines Metallprofils [37], (b) Frontendträger des Audi A6 (Blechstruktur: grün, Kunststoff: rot) [38]

bzw. Designfunktion des Kunststoffes ist ebenfalls möglich, z. B. die Umspritzung eines steifen Stahlrahmens mit einem „Kunststoffkleid“. Ein weiteres Beispiel ist das „Montieren im Werkzeug“ (ähnlich der Outsert-Technik). Hierbei wird nicht ein einzelnes Blech angespritzt, sondern mehrere Bleche werden durch Umspritzen mit Kunststoff verbunden. Metall und Kunststoff sind bei der Hybrid-Technologie daher gleichermaßen Funktions- und Trägerkomponente. Hybridbauteile können bei korrekter Konstruktion trotz geringeren Gewichtes belastungsfähiger

und torsionssteifer als reine Metallprofile sein. Auch die Knickgefahr von dünnen Belchprofilen kann deutlich reduziert werden. Insbesondere die hohe Fertigungsgenauigkeit des Spritzgusswerkzeugs muss jedoch beachtet werden und stellt hohe Anforderungen an die Konstruktion und den Verarbeiter [2, 29, 38].

2.2.2 Post Moulding Assembly

Wie bereits erwähnt, zeichnen sich Post Moulding Assembly Verfahren dadurch aus, dass die Herstellung der Verbindung zwischen Kunststoff und Metall erst nach dem Urformprozess des Kunststoffes erfolgt. Diese kann durch mechanische Montage, Kleben oder thermisches Fügen erfolgen. Auch eine Kombination der Verfahren ist möglich, z. B. das Einschweißen von Metallteilen in den Kunststoff mittels Ultraschall, welche anschließend für Verschraubungen genutzt werden [2, 28].

Mechanische Montage

Bei der mechanischen Montage wird die Verbindung zwischen Kunststoff und Metall z. B. mittels Verschraubungen, Schnappverbindungen, Nieten, Falzen oder Kragfügen realisiert. Diese besitzen den Vorteil, dass die Haftfestigkeit durch einen makroskopischen Form- bzw. Kraftschluss entsteht. Dadurch entfällt die Problematik der Adhäsion zweier unterschiedlicher Fügepartner. Weiterhin sind lösbare Verbindungen möglich. Je nach Verfahren wirkt sich jedoch das vergrößerte Gewicht der Verbindung durch Schrauben, Nieten o. ä., die Notwendigkeit mehrerer Fertigungsschritte, das Einbringen von Kerben in das Material und eine hohe Anforderung an die Gestaltung der Fügepartner nachteilig aus [2].

Kleben

Das Klebverfahren ermöglicht die Verbindung gleicher oder artfremder Fügepartner durch einen Zusatzwerkstoff. Dieser kann auf organischen oder anorganischen Verbindungen basieren. Grundlage der Haftung ist eine stoffschlüssige Verbindung infolge der spezifischen Adhäsion und eine formschlüssige Verbindung aufgrund der mechanischen Adhäsion. Da folglich eine gute Benetzung beider Fügepartner durch den Klebstoff erforderlich ist [39], wird der Klebprozess häufig durch eine adhäsionsverbessernde Vorbehandlung unterstützt. Dazu zählen z. B. die Reinigung der Oberflächen sowie mechanische oder chemische Oberflächenbearbeitungen gemäß DIN EN 13887 [40]. Vorteile des Klebens sind wie bereits erwähnt die Verbindung artfremder Fügepartner, der Ausgleich von Passungstoleranzen durch den Klebstoff sowie keine Schädigung der Fügepartner z. B. durch Löcher für Nieten oder infolge der thermischen Belastung beim Schweißen. Dadurch entsteht auch eine gleichmäßige Spannungsverteilung in

der Fügefläche. Weiterhin sind mediendichte Verbindungen möglich. Dem stehen der Aufwand für die Vorbehandlung der Oberflächen gegenüber, die Notwendigkeit der genauen Einhaltung der Prozessparameter, die teils langen Aushärtezeiten und geringen Festigkeiten sowie Steifigkeiten der Klebstoffe, die Zeitabhängigkeit der Klebverbindung (z. B. infolge der Alterung) und die geringe thermische Beständigkeit ($\approx 250 \text{ }^\circ\text{C}$) des Klebstoffs [2, 4, 41]. Ferner muss ein zusätzlicher Werkstoff und eine weitere Grenzschicht bei der Gestaltung von Verbindungen berücksichtigt werden.

Thermisches Fügen

Beim thermischen Fügen von Kunststoff-Metall-Verbindungen können die bekannten Verfahren, wie z. B. das Schweißen nicht, oder nur mit Einschränkungen eingesetzt werden. Dies begründet sich darin, dass die Schmelztemperatur des Metalls deutlich höher ist als die des Kunststoffes und beide Werkstoffe chemisch unverträglich sind. Allerdings lassen sich die Verfahren teilweise übertragen. So kann durch Energiezufuhr der Kunststoff plastifiziert werden und anschließend wie beim Kleben das Metall benetzen. Nach dem Erstarren entsteht ebenfalls eine form- und stoffschlüssige Verbindung. Die am meisten verwendeten Verfahren sind das Laserstrahlfügen, das Infrarotfügen, das Induktionsfügen, das Ultraschallschweißen und das Reibnieten. Je nach eingesetztem Verfahren sind sehr kurze Prozesszeiten ($<1 \text{ s}$) bei gleichzeitig hoher Verbundfestigkeit möglich. Eine Vorbehandlung des Metalls ist nicht zwingend erforderlich, kann aber zur weiteren Verbesserung erfolgen. Allerdings ist nicht jedes Verfahren für jeden Kunststoff geeignet, das Material wird thermisch beeinflusst und es werden hohe Anforderungen an die Konstruktion gestellt, um eine optimale Erwärmung der Fügenaht zu ermöglichen [2, 28, 42, 43].

Auch eine Kombination aus IMA- und PMA-Verfahren ist möglich. So stellen z. B. Abibe et al. [44] das Injectionsclinchen vor, in welchem zuerst ein Loch in einer Metallplatte von Kunststoff durchflossen wird und einen formschlüssigen Bolzen formt. In einem zweiten Schritt wird der Bolzen erhitzt und zusammengepresst, um den Formschluss zu verbessern.

2.2.3 Fazit

Die vorgestellten IMA- und PMA-Verfahren weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf. PMA-Verbindungen ermöglichen eine hohe Gestaltungsfreiheit der Komponenten, vor allem im Hinblick auf eine beanspruchungsgerechte und funktionale Konstruktion. Sie erfordern jedoch mehrere Fertigungs- und Montageschritte oder Zusatzmaterial (Kleber, Nieten etc.). IMA-Verbindungen dagegen reduzieren oder vermeiden die erforderlichen Fertigungs- und Mon-

tageschritte sowie das benötigte Zusatzmaterial, was zu kürzeren Zykluszeiten, geringerem Gewicht und damit zu geringeren Kosten führt. Jedoch sind die Anforderungen an die Konstruktion und den Verarbeiter deutlich höher, da die Toleranzen von Metalleinlegeteil und Spritzgusswerkzeug sowie die Schwindung des Kunststoffes deutlich stärker berücksichtigt werden muss [1, 32, 45].

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Kunststoffe mit Metall ohne Zusatzmaterial zu einem mediendichten und festen Bauteil zu verbinden bei gleichzeitiger Minimierung der Fertigungsschritte. Dieses Ziel kann nur durch die Applikation eines IMA-Verfahrens erreicht werden. Die Fügung gleicht hierbei der vorgestellten PMA-Verbindung „Kleben“. Da allerdings der Kunststoff sowohl die Funktion des Klebstoffes als auch die einer Träger- und/oder Funktionskomponente besitzt, werden die Vorteile der Klebung bei gleichzeitiger Minimierung der Nachteile erzielt.

2.3 Verfahren zur Modifikation der Metalloberfläche zur Verbesserung der Qualität einer IMA-Verbindung

Da die Herstellung der angestrebten mediendichten Kunststoff-Metall-Verbindung im IMA-Verfahren erfolgt, ist zu beachten, dass eine einfache, kraftschlüssige Verbindung durch Aufschumpfen des Kunststoffes an das Metall nur sehr selten zu einer funktionsgerechten Anbindung führt. Da die Oberfläche der Einlegeteile bei IMA-Verbunden entscheidend für die Qualität der Verbindung ist, kommt der Oberflächenmodifikationen des Metalls eine entscheidende Bedeutung zu.

2.3.1 Übersicht

In der Literatur sind Vorbehandlungen häufig nur zur Vorbereitung von Klebungen klassifiziert, z. B. in DIN EN 13887 [40]. Diese können daher nicht immer übertragen werden, da z. B. eine Oberflächenvorbehandlung des Kunststoffes unmöglich ist. Zudem ist eine Polymerschmelze deutlich viskoser als ein Klebstoff. Grujicic et al. [5] geben dagegen zwar eine Einteilung für die Direkt-Adhäsion von Kunststoff an Metall an, einige dem Stand der Technik entsprechende Verfahren lassen sich damit jedoch nicht klassifizieren. Es soll daher im Folgenden eine Einteilung vorgenommen werden, die die bekanntesten Vorbehandlungen umfasst.

Reinigung

Die Reinigung ist der wichtigste Schritt einer Oberflächenvorbehandlung, da nur fettfreie Oberflächen eine optimale Benetzung ermöglichen [4]. Sie wird bei fast jedem IMA-Verfahren angewendet und häufig mit anderen Oberflächenvorbehandlungen kombiniert. Die Reinigung erfolgt direkt vor dem Umspritzen und auch vor einer eventuellen zusätzlichen Vorbehandlung. Sie dient dem Entfernen von öl- oder fetthaltigen Rückständen und Überresten anderer Vorbehandlungen auf der Oberfläche. Dazu werden vor allem wässrige, nicht-ionische Reinigungsmittel eingesetzt. Je nach Material kann das Reinigungsmittel auch erwärmt, elektrochemisch unterstützt oder in Dampfbädern eingesetzt werden. Bei kleinen Bauteilen erfolgt häufig eine Ultraschallreinigung [40].

Oberflächentemperatur

Um das Erstarren bzw. die Erhöhung der Viskosität der heißen Schmelze beim Kontakt mit einer deutlich kälteren Oberfläche zu verlangsamen, bis eine optimale Benetzung vorliegt, wird häufig die Oberflächentemperatur des Metalls erhöht. Zu hohe Oberflächentemperaturen verkomplizieren und verlängern jedoch den Herstellungsprozess und können den Kunststoff beschädigen. Die optimale Temperatur hängt daher insbesondere von den verwendeten Werkstoffen, Geometrien und Prozessdaten ab.

So geben z. B. Lucchetta et al. [46] optimale Oberflächentemperaturen von 450 °C für Verbindungen aus Aluminium und Polyphenylensulfid mit Glasfaserverstärkung an. Bei Fabrin et al. [47] besitzt das Aluminium dagegen nur eine Oberflächentemperatur von 70 °C, bevor es mit Styrol-Ethylen-Butylen-Styrol überspritzt wird. Ramani und Moriarty [48] erreichen eine Steigerung der Festigkeit zwischen Stahl 1018 und Polycarbonat um ca. 50 % durch Erhöhung der Temperatur von 170 °C auf 204 °C. Eine deutliche Festigkeitsverbesserung erzielen Mitschang et al. [49] zwischen Stahl und PA 6. Während ohne Vorwärmung keine Haftung vorliegt, können bei 240 °C Festigkeiten von 12 MPa erreicht werden. Auch die Mediendichtigkeit zwischen Kupfer und Ultramid kann durch eine Temperaturerhöhung auf 280 °C um den Faktor 10 verbessert werden [50].

Chemische Modifizierung des Polymers

Die chemische Modifizierung des Polymers kann sich auf den polymeren Kunststoff, sein Monomer oder generell auf die Kunststoff-Metall-Haftungsverbesserung beziehen. Zu diesen Lösungsansätzen sind in der Literatur allerdings nur wenige Informationen verfügbar. So können z. B. bei der Verwendung von Polyamid durch dessen Modifizierung mit einem Poly-(ester-amid) Blockcopolymer hohe Festigkeiten auch bei verschmutzter Oberfläche erreicht werden. Eine weitere Möglichkeit ergibt sich bei dem Verbinden von Styrol mit Aluminium: das Monomer

des Styrol-Harzes wird mit einem Styrol-Silan-Haftvermittler modifiziert. Dies führt zu einer direkten Anbindung des Kunststoffes an Aluminium bei der Polymerisation. Je nach Styrol-Silan Konzentration wird die Dicke der Haftungsgrenzfläche und damit die Haftfestigkeit beeinflusst. Die Veränderung der bekannten Kunststoffparameter kann jedoch zu einem deutlich aufwendigeren Spritzgussprozess führen. So haften diese Bauteile sehr stark an der Werkzeugwand, was die Verwendung und regelmäßige Erneuerung einer Trennmittelschicht erfordert. Wird das Monomer modifiziert, werden zudem lange Aushärtezeiten im Werkzeug benötigt. Weiterhin liegt der Ursprung dieser Verbindungen in einer nicht-kovalenten Bindung, welche empfindlich gegenüber Feuchte, hohen Temperaturen und Ermüdung ist [5, 51].

Beschichtung der Oberfläche

Die Beschichtung von Oberflächen vor dem Umspritzen hat das Ziel, kovalente Bindungen zwischen Metall und Kunststoff zu erzeugen oder zu verbessern. Dazu können Haftvermittler eingesetzt werden. Diese werden optimalerweise direkt vor dem Spritzgussprozess möglichst dünn auf die Metalloberfläche durch Sprühen, Tauchen oder Walzen aufgetragen. Die am meisten eingesetzten Haftvermittler sind auf der Basis siliziumorganischer Verbindungen (Silan), die mit ihren Amino- und Vinylgruppen als „Adhäsionsvermittler“ zwischen organischen und anorganischen Materialien dienen. Der verkürzte, schematische Ablauf bei der Reaktion ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Zunächst erfolgt eine Hydrolyse der Alkoxy-Gruppe unter Entstehung von Wasserstoff, wodurch Wasserstoffbrückenbindungen an der Grenzfläche zwischen Kunststoff und Metall gebildet werden. Als Folge entsteht eine Grenzflächenkondensation der funktionellen Gruppen. Schließlich wird durch chemische Reaktionen an der Grenzfläche zwischen Kunststoff und Metall die Bindung erzeugt [52, 53]. Durch den Einsatz von Haftvermittlern können Festigkeitssteigerungen um bis zu 50 % erzielt werden. Darüber hinaus ist die Verbindung durch die entstehenden kovalenten Bindungen unempfindlicher gegenüber erhöhten Temperaturen. Zudem besitzt diese Resistenzen gegen feuchte Umgebungen aufgrund der hydrophoben Eigenschaften der bei der Hydrolyse entstandenen Polymere. Nachteilig ist jedoch der hohe Zeitaufwand für die Applikation der Beschichtung: neben einer gründlichen Vorreinigung muss die aufgetragene Beschichtung und das fertige Bauteil lange Aushärten. Dies kann von wenigen Minuten bis zu einigen Stunden dauern [54]. Weiterhin stellt die Verarbeitung hohe Anforderungen an Präzision sowie Arbeitsschutz und setzt grundlegende chemische Kenntnisse voraus. Neben Silan gibt es noch weitere Haftvermittler, z. B. Zirkonaluminat, Triazin Trithiol (triazine trithiol polymer, TTP) [55] oder Haftvermittler auf Basis von epoxifunktionellen Anthrachinonverbindungen [4, 5, 54, 56]. Auch das Chromieren der Oberfläche zählt zu diesen Verfahren. Aufgrund des Chromverbotes in der Automobilindustrie wird es jedoch nicht mehr eingesetzt.

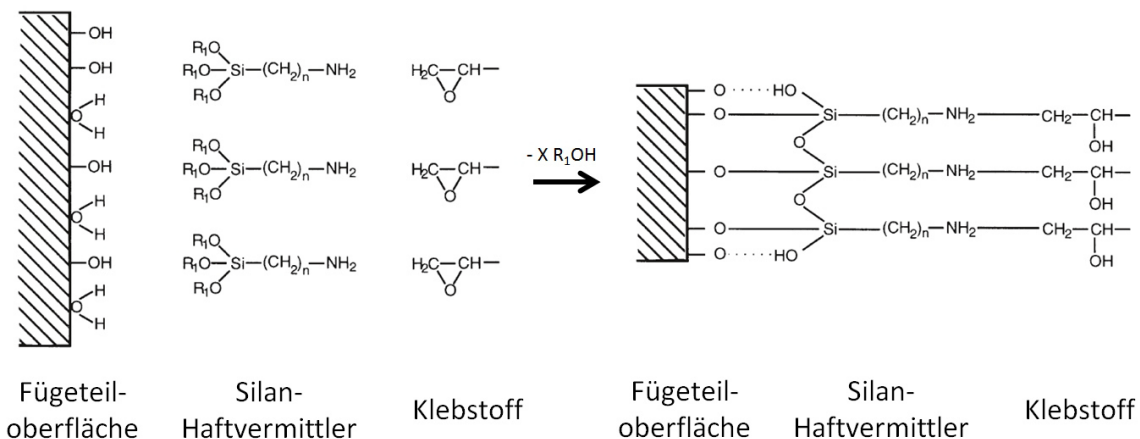


Abbildung 2.10: Schematischer Ablauf beim Silanisieren nach [4]. Die Reaktion ist zwischen der Oberfläche eines beliebigen anorganischen Fügepartners und einem polymeren Klebstoff dargestellt und lässt sich daher auf IMA Verbindungen übertragen.

Makro-mechanische Verklammerung

Das Ziel bei der makro-mechanischen Verklammerung ist es, einen Formschluss statt eines Stoffschlusses zwischen Kunststoff und Metall zu erzeugen. Dazu wird das Metall vor dem Umspritzen konturiert, damit der umspritzte Kunststoff in einen Hinterschnitt fließt und sich dort verhaken kann. Mögliche Konturen sind z. B. Bohrungen, Einprägungen, Haken etc., vgl. Abbildung 2.11. Ergebnisse der aktuellen Forschung belegen, dass zur Erhöhung der Festigkeit eine größere Formschlussfläche und Formschlussanzahl wichtiger ist als die Form des Formschlusses (Quadrat, Ellipse etc.). Diese Erhöhung ist jedoch nicht proportional zur Querschnittszunahme. Bei richtiger Gestaltung wird mit der makro-mechanischen Verklammerung der Schwachpunkt einer Kunststoff-Metall-Verbindung von der Grenzfläche in den schwächsten Fügepartner (häufig der Kunststoff) übertragen. Dadurch können hohe Festigkeiten, auch bei dynamischer Belastung und unter erhöhten Temperaturen, erreicht werden. Weiterhin sind die Verbindungen je nach Kontur kostengünstig, einfach herstellbar (es ist meist keine Reinigung und nur eine geringe Vorbearbeitung der Metallkomponente erforderlich) und können ohne viel Aufwand in Serienfertigungen integriert werden. Bei der Konstruktion ist jedoch zu beachten, dass durch die notwendigen Umformungen das Metall neue Eigenschaften aufweist. So können z. B. Verfestigungen im Metall oder Störungen des Kraftflusses (infolge von Kerben) auftreten, die die Festigkeit des Metalls respektive die des Verbundes beeinflussen. Zudem kann eine Makroverklammerung nicht an jedem Bauteil erfolgen, da z. B. die Kontur aufgrund der Metallgeometrie oder -größe nicht umsetzbar ist [32, 57, 58].

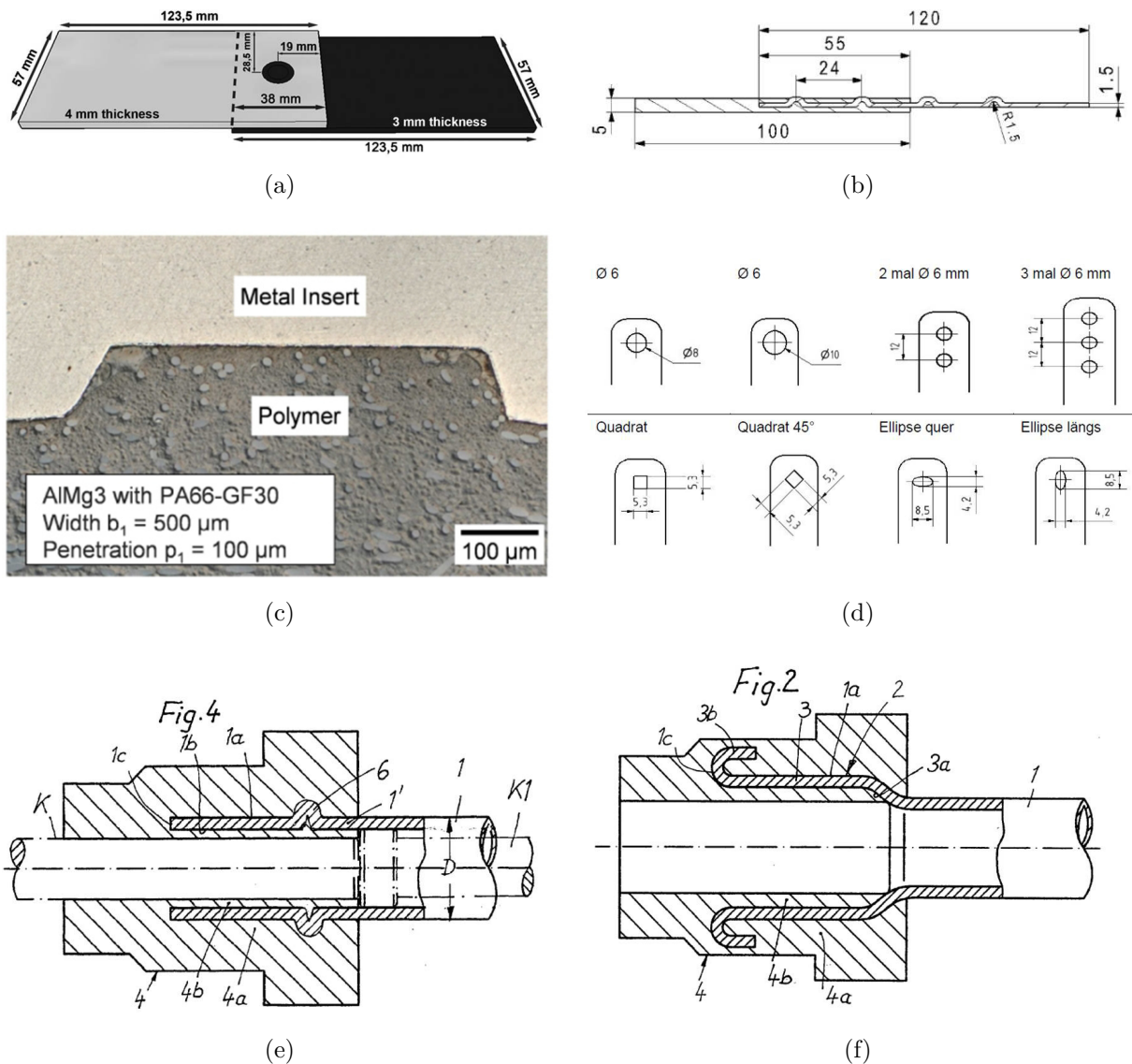


Abbildung 2.11: Beispiele für die makro-mechanische Verklammerung: (a) Durchfließen einer Bohrung [44], (b) und (c) Umfließen von Einprägungen im Stahl [57] bzw. nach [58], (d) Verklammerung an unterschiedlichen Konturen [32], (e) und (f) Umfließen eines gestauchten bzw. umgebördelten Rohres [59]

Mikro-mechanische Verklammerung

Die mikro-mechanische Verklammerung basiert auf der mechanischen Adhäsion (vgl. Kapitel 2.1.1) und wirkt bei jeder Materialpaarung. Ausnahmen sind lediglich Fügepartner mit nahezu ideal glatten Oberflächen. Diese bilden allerdings aufgrund atomarer Wechselwirkungen so hohe Haftfestigkeiten aus, dass keine Adhäsionsverbesserung mehr erforderlich ist (vgl. Kapitel 2.1.2). Ziel bei dieser Oberflächenmodifikation ist es, die Verklammerung des Kunststoffes mit dem Metall infolge einer Vergrößerung und/oder Aktivierung der Oberfläche zu verbessern. Die

Verfahren zur Erzeugung der mikro-mechanischen Verklammerung können auf Grundlage von DIN EN 13887 [40] in chemische, physikalisch-nichtmechanische und physikalisch-mechanische Verfahren eingeteilt werden:

Zu den *chemischen Verfahren* werden vor allem nass-chemische Verfahren wie das Ätzen und elektrochemische Ätzen [47, 60–64]) gezählt. Die *physikalisch-mechanischen Verfahren* enthalten das Schleifen [41, 65], Strahlen [46, 48, 66, 67] und die Laserablation [68–70]. Wie Abbildung 2.12 zeigt, erzeugen beide Verfahrensgruppen eine aufgeraute, stark zerklüftete Oberfläche des Metalls mit Hinterschneidungen, Poren etc., in denen sich der Kunststoff verklammern kann (formschlüssige Verbindung). Durch das Aufschrumpfen des Kunststoffes auf das Metall wird zudem eine kraftschlüssige Verbindung erreicht. Zusätzlich werden durch die Veränderung der Oberfläche (z. B. durch das „Aufbrechen“ der Aluminiumoxidschicht) chemische Bindungen ermöglicht oder verbessert (stoffschlüssige Verbindung). Das Aufrauen ist fast immer geeignet, um die Haftung zu verbessern. Ätzen und Strahlen können auch bei komplizierten Geometrien angewendet werden. Sie benötigen zwar eine Vor- bzw. Nachbehandlung, diese kann jedoch kurz ausfallen. Die Laserablation findet dagegen Anwendung, wenn sehr präzise Strukturierungen erforderlich sind, verursacht jedoch hohe Kosten. Insbesondere das Strahlen ist eine Möglichkeit, einfach und schnell unterschiedlichste Oberflächeneigenschaften zu erzeugen. Je nach Strahlmittel (z. B. metallisch, mineralisch oder organisch) existieren viele Möglichkeiten, die Oberfläche von leicht polierend bis stark aufrauend zu beeinflussen. Es ist jedoch zu beachten, dass im Füge teil Eigenspannungen sowie Mikrorisse initiiert werden können und bei dünnen Bauteilen das Risiko einer ungewollten Umformung besteht [4, 32].

Bei den *physikalisch-nichtmechanischen Verfahren* wie der Plasmabehandlung [71, 72] oder dem Beflammen wird keine Vergrößerung der Oberfläche angestrebt. Stattdessen wird die stoffschlüssige Verbindung und die Benetzung verbessert, z. B. durch die chemische Modifizierung der Oberfläche (Erzeugung von freien Radikalen, Oxidationsprozesse, Einbringen neuer chemischer Elemente etc.). Ein Zusatzmittel (Säure, Strahlmittel) ist nie und eine Reinigung oftmals nicht erforderlich. Es existieren allerdings zahlreiche Verfahrensparameter, die genau zu ermitteln und zu kontrollieren sind. Des Weiteren besitzen die Umgebungsbedingungen einen großen Einfluss und es wird empfohlen, das Metall direkt nach der Modifizierung zu umspritzen [40]. Je nach Verfahren können unterschiedlich hohe Haftfestigkeiten erreicht werden. Diese reichen von 0,97 MPa [46] bis 40 MPa [48]. Häufig werden auch Kombinationen der Vorbehandlungen verwendet, z. B. Aufrauen kombiniert mit Plasmareinigung [73].

Weitere Vorbehandlungsarten

Neben den genannten Oberflächenmodifikationen gibt es noch einige weitere, die sich nicht klassifizieren lassen. Dazu gehören z. B. das an der Universität Erlangen-Nürnberg entwickelte

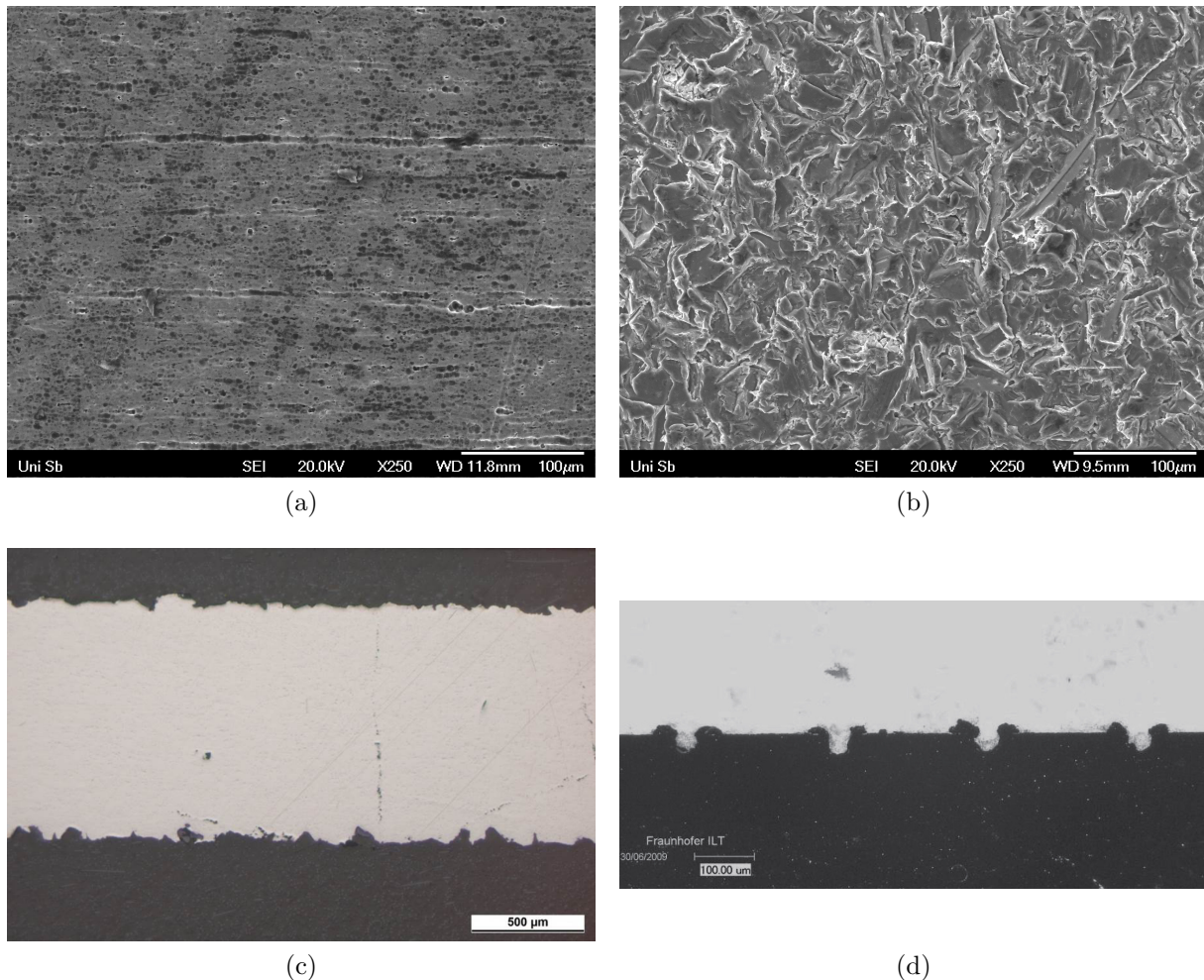


Abbildung 2.12: Beispiele für die mikro-mechanische Verklammerung infolge chemischer und physikalisch-mechanischer Vorbehandlung: (a) geätzte Aluminiumoberfläche, (b) edelkorunggestrahlte Aluminiumoberfläche, jeweils vor dem Umspritzen, (c) Strahlung mit Edelkorund, (d) Laserablation nach [69], jeweils nach dem Umspritzen

MK²-Verfahren [74]. In diesem werden ein metallisches und ein thermoplastisches Insert in das Spritzgusswerkzeug eingelegt, mit Plasma vorbehandelt und anschließend durch das Anspritzen einer Zwischenschicht verbunden. Das Verfahren wird derzeit hauptsächlich für flache Inserts und daher gering beanspruchte Design-Elemente verwendet.

Da im aktuellen Stand der Technik für viele Anwendungen spezielle Verfahren und daher eine enorme Vielfalt an Oberflächenmodifikationen existieren, kann die vorgestellte Übersicht keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben. Daher sei an dieser Stelle auf weiterführende Literatur, insbesondere die Ausführungen von Awaja et al. [15], Grujicic et al. [5] sowie Critchlow und Brewis [75], verwiesen.

2.3.2 Evaluation im konkreten Fall

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Oberflächenmodifikation des Metalls ein weit erforschtes Feld mit zahlreichen Einsatzmöglichkeiten bietet. Viele Erkenntnisse im Bereich der IMA-Verfahren basieren auf Ergebnissen der Klebforschung. Speziell die Verbesserung der mikro-mechanischen Verankerung ist oft Gegenstand der Forschung, da sie durch die Kombination aus Kraft-, Form- und Stoffschluss zu weitreichenden Anwendungsmöglichkeiten führt. Zudem können mit ihr viele unterschiedliche Oberflächentopographien und -eigenschaften mit geringem Aufwand erzeugt werden. Sie kann darüber hinaus meist problemlos in bereits bestehende Werkzeuge integriert werden.

Insbesondere die Oberflächenvergrößerung durch Erhöhung der Rauheit wurde jedoch bisher nur bis zu einem gewissen Grad betrachtet. Zu große Rauheiten führen aufgrund der geringen Festigkeit des Klebstoffes zu dessen kohäsivem Versagen unter Belastung und werden daher nicht angewendet. Dieses Problem einer „schwachen“ Zwischenschicht existiert bei IMA-Verbunden nicht. Dennoch ist nicht bekannt, wie sich hier große Rauheiten auswirken. Weiterhin gibt es bislang nur wenige Erkenntnisse zu einem mediendichten IMA-Verbund. Erste Ergebnisse werden zwar in den Arbeiten von Byskov-Nielsen et al. [76] und Fedler [77] präsentiert, diese beantworten das Thema jedoch nicht ausreichend.

Eine andere Problematik existiert bei der makro-mechanischen Verankerung. Obwohl diese viele Vorteile bietet, existieren auch hier nur wenige Erkenntnisse im Hinblick auf eine mediendichte Anwendung. Dies ist vermutlich darin begründet, dass eine makro-mechanische Verankerung bei Klebungen nicht bzw. nur sehr eingeschränkt eingesetzt werden kann.

Folglich gibt es bei IMA-Verbunden noch offene Fragen zur Anwendung dieser beiden Vorbehandlungen. Die Auswirkungen der mikro-mechanischen Verankerung sollen daher in dieser Arbeit im Hinblick auf erzielbare Festigkeiten und Mediendichtigkeiten betrachtet werden. Zum Vergleich wird zusätzlich eine makro-mechanische Verankerung untersucht.

2.3.3 Vorversuche

Da die mikro-mechanische Verankerung hauptsächlich für Klebungen untersucht wurde und eine Vielzahl an Verfahren existiert, sind Vorversuche erforderlich. Diese sollen zweckmäßige Oberflächenmodifikationen hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Festigkeit und Mediendichtigkeit einer IMA-Verbindung qualifizieren. Besonders geeignete Oberflächenmodifikationen werden dann detaillierter betrachtet. Weiterhin wird untersucht, ob eine Kombination mit anderen Vorbehandlungen (z. B. Reinigung, Temperierung) erforderlich ist. Folgende Oberflächenmodifikationen des Metalls werden analysiert:

- Das Ätzen und das Strahlen mit verschiedenen Strahlmitteln werden aufgrund der vorteilhaften Kombination aus Oberflächenvergrößerung und -aktivierung sowie der Möglichkeit, verschiedene Oberflächen bzw. Rauheiten zu erzeugen, betrachtet. Insbesondere das Strahlen wird untersucht, da es eine sehr geeignete Vorbehandlung ist, um die Oberflächenrauheit und damit die Verbindungsqualität zu beeinflussen [78].
- Da auch der Einfluss einer ausschließlich aktivierten Oberfläche geprüft werden soll, wird zudem die Plasmabehandlung untersucht.

Als Fügepartner kommen eine Aluminium-Mangan-Legierung (EN-AW 3103) und ein Polyamid mit 30 % Glasfasern (PA 66 GF 30 %) zur Anwendung. Zur Bestimmung der Festigkeit wird ein Metallblech mit Kunststoff angespritzt (vgl. Unterabschnitt 3.3.1) und die Auszugsfestigkeit in MPa gemessen. Die Bestimmung der Mediendichtigkeit erfolgt durch Innendruckprüfung eines mit Kunststoff umspritzten Rohres (vgl. Unterabschnitt 4.3.1). Dabei wird der Druckabfall in Pa ausgewertet.

Durchführung

Beim Strahlen werden zwei Gruppen von Strahlmittel untersucht: stark abrasive Strahlmittel (Edelkorund, Glasbruch, Granatsand) mit jeweils feiner (Korndurchmesser bis 150 μm), mittlerer (bis 425 μm) und grober (bis 840 μm) Körnung zur Erzeugung unterschiedlicher Rauheiten sowie polierende bzw. reinigende Strahlmittel (Mais, Glasperlen). Die Proben werden vor und nach dem Strahlen mit Aceton im Ultraschallbad gereinigt. Um den Einfluss der Oberflächentemperatur der Proben bei der Verarbeitung auf die Eigenschaften des Verbundes zu bestimmen, werden die mit stark abrasiven Strahlmittel bearbeiteten Proben sowohl mit Temperaturen von 130 °C als auch bei 50 °C (Werkzeugwandtemperatur) in das Spritzgießwerkzeug eingelegt und anschließend mit Kunststoff überspritzt.

Die Ätzung erfolgt anhand der Ausführungen von [47, 60, 61, 79] mithilfe einer Eisensulfat-Schwefelsäure-Lösung (P2). Diese wird sowohl allein getestet, als auch in Kombination mit dem Anodisieren in Phosphorsäure (PAA), dem Anodisieren in Schwefelsäure (SAA) und dem Eintauchen in Phosphorsäure (PAD). Da hier bereits Ergebnisse für erzielbare Festigkeiten im IMA-Verbund vorliegen, werden nur die Auswirkungen auf die Mediendichtigkeit untersucht. Es erfolgt keine zusätzliche Reinigung oder Temperierung.

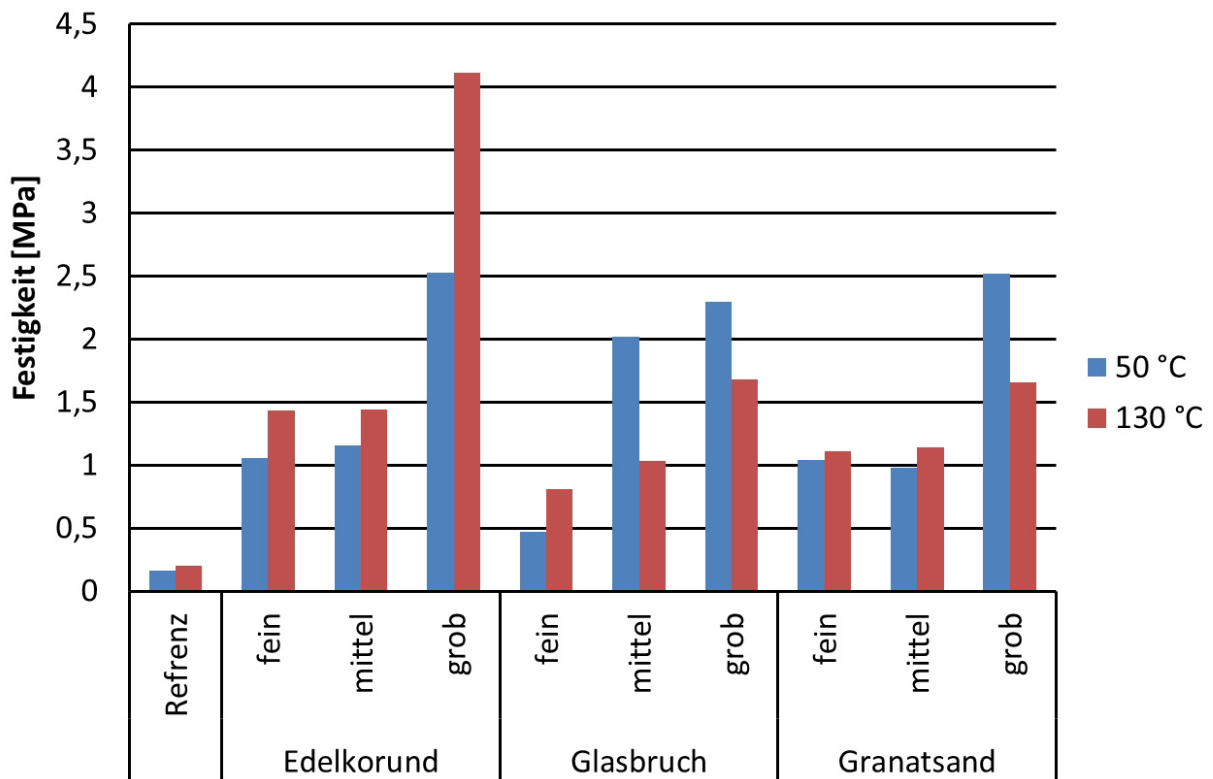
Eine Plasmabehandlung wird bei der Firma Plasmatrete nach der PlasmaPlus[®] Beschichtung [71] durchgeführt. Auch hier wird keine zusätzliche Reinigung oder Temperierung verwendet. Zusätzlich werden auch nicht vorbehandelte Referenzprobekörper bei 50 °C und 130 °C hergestellt.

Ergebnisse

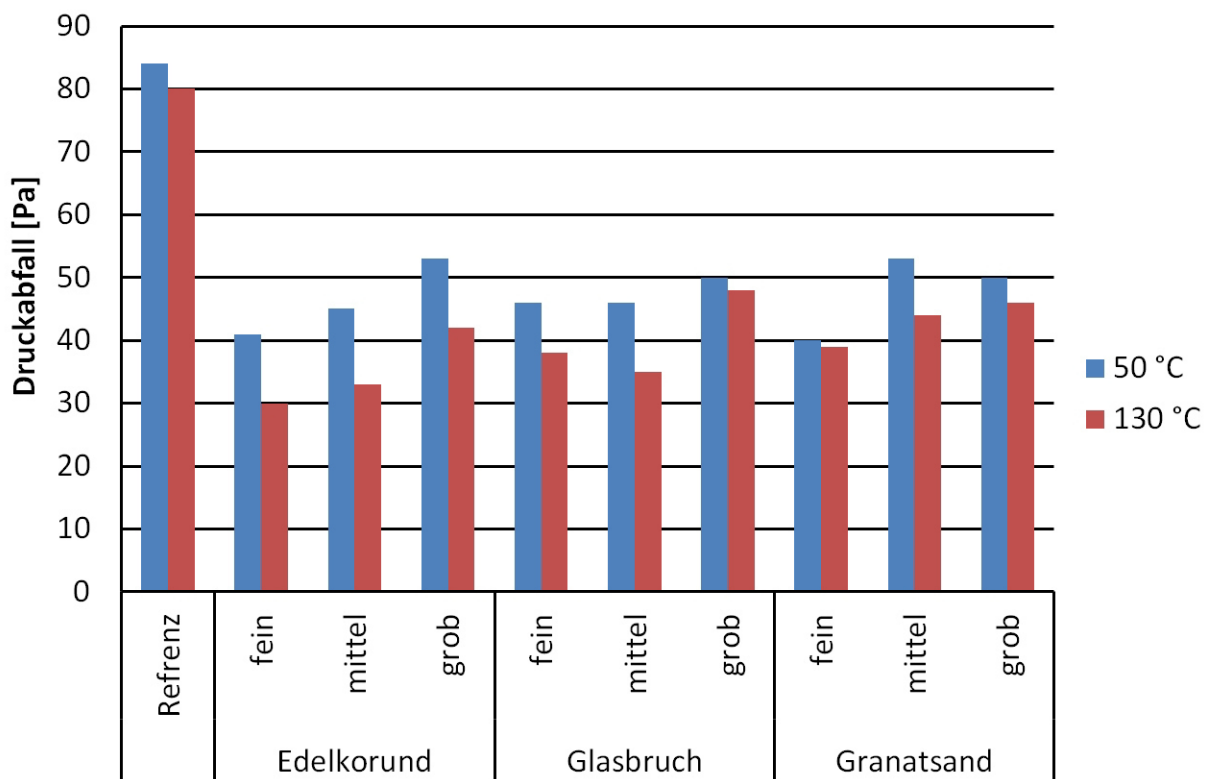
Die Vorbehandlungen besitzen sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Qualität des Verbundes. Abbildung 2.13 zeigt den Einfluss der drei stark abrasiven Strahlmittel Edelkorund, Glasbruch und Granatsand bei Proben, die vor der Verarbeitung auf Werkzeugwand bzw. bei erhöhter Temperatur erwärmt wurden. Alle weisen denselben, signifikanten Einfluss auf die Festigkeit und Dichtigkeit des Verbundes auf: Feine Rauheiten führen zu geringen Festigkeiten aber sehr guten Dichtigkeiten, grobe Rauheiten dagegen zu hohen Festigkeiten aber schlechten Dichtigkeiten. Der Vergleich ihrer Oberflächen, wie in Abbildung 2.14 dargestellt, zeigt, dass alle drei Strahlmittel zu einer annähernd gleichen zerklüfteten Oberfläche führen. Diese kann sehr gut benetzt werden, was in einer sehr guten mikro-mechanischen Verklammerung resultiert, vgl. Abbildung 2.15. Es wird angenommen, dass bei gröberen Strahlmitteln und damit größeren Rauheiten die Festigkeit infolge einer besseren Verhakung ansteigt. Die Dichtigkeit nimmt jedoch aufgrund der größeren, schwieriger auszufüllenden Poren ab. Während die Temperaturerhöhung nur bei einigen Proben zur Steigerung der Festigkeit beiträgt, wird die Dichtigkeit im Schnitt um ca. 15 % verbessert.

Wie Abbildung 2.16 zeigt, weisen dagegen reinigende bzw. polierende Strahlmittel (Mais, Glasperlen), die leicht abrasiven Ätzverfahren oder die Plasmabehandlung einen deutlich anderen Einfluss auf: Obwohl die Festigkeit bei allen untersuchten Proben sinkt, wird die Dichtigkeit je nach Verfahren verbessert. So führt die Strahlung mit Glasperlen oder Mais zur Undichtigkeit und einer geringen Festigkeit der Proben. Dieser Effekt lässt sich anhand der Oberflächentopographie erklären. Wie Abbildung 2.17 zeigt, führen Glasperlen zu winzigen kalottenartigen Einschlägen [80]. Diese Oberfläche kann vom Kunststoff nur schwer benetzt werden, was in Spalten zwischen Metall und Kunststoff resultiert. Bei einer Strahlung mit Mais wird angenommen, dass durch die polierte Oberfläche ohne Kapillaren oder Vertiefungen ebenfalls keine gute Anbindung und infolgedessen Spalte zwischen den Fügepartnern entstehen.

Das Ätzen liefert nur in Kombination mit elektrochemischem Ätzen sehr gute Ergebnisse, andernfalls kann die Dichtigkeit sogar verschlechtert werden. Wird es mit dem Anodisieren in Schwefelsäure kombiniert, muss zwingend eine Nachbehandlung mit Phosphorsäure erfolgen. Beim Anodisieren mit Phosphorsäure wird dadurch jedoch nur eine unwesentliche Verbesserung der Dichtigkeit erreicht. Eine Behandlung der Oberfläche mit Phosphorsäure allein ist dagegen nicht zielführend. Erklären lassen sich diese Ergebnisse ebenfalls durch eine Oberflächenanalyse: Durch die P2-Ätzung wird zwar eine porenartige Oberfläche erzeugt, in der sich der Kunststoff gut verankern kann. Gemäß Digby und Packham [60] bildet sich jedoch ein geringer Eisenanteil auf der Oberfläche. Durch diesen wird die Benetzung verschlechtert. Durch die Anodisierung werden diese Eisenpartikel entfernt, wobei durch die Verwendung von Schwefelsäure die Poren verkleinert werden. Diese Poren sind zu klein für eine optimale Benetzung. Mit Hilfe der ab-



(a)



(b)

Abbildung 2.13: Einfluss stark abrasiver Strahlmedien auf die Qualität der Aluminium-PA 66-Verbindung: (a) Festigkeit, (b) Dichtigkeit. Fein, mittel und grob gibt die Körnung des Strahlgutes an.

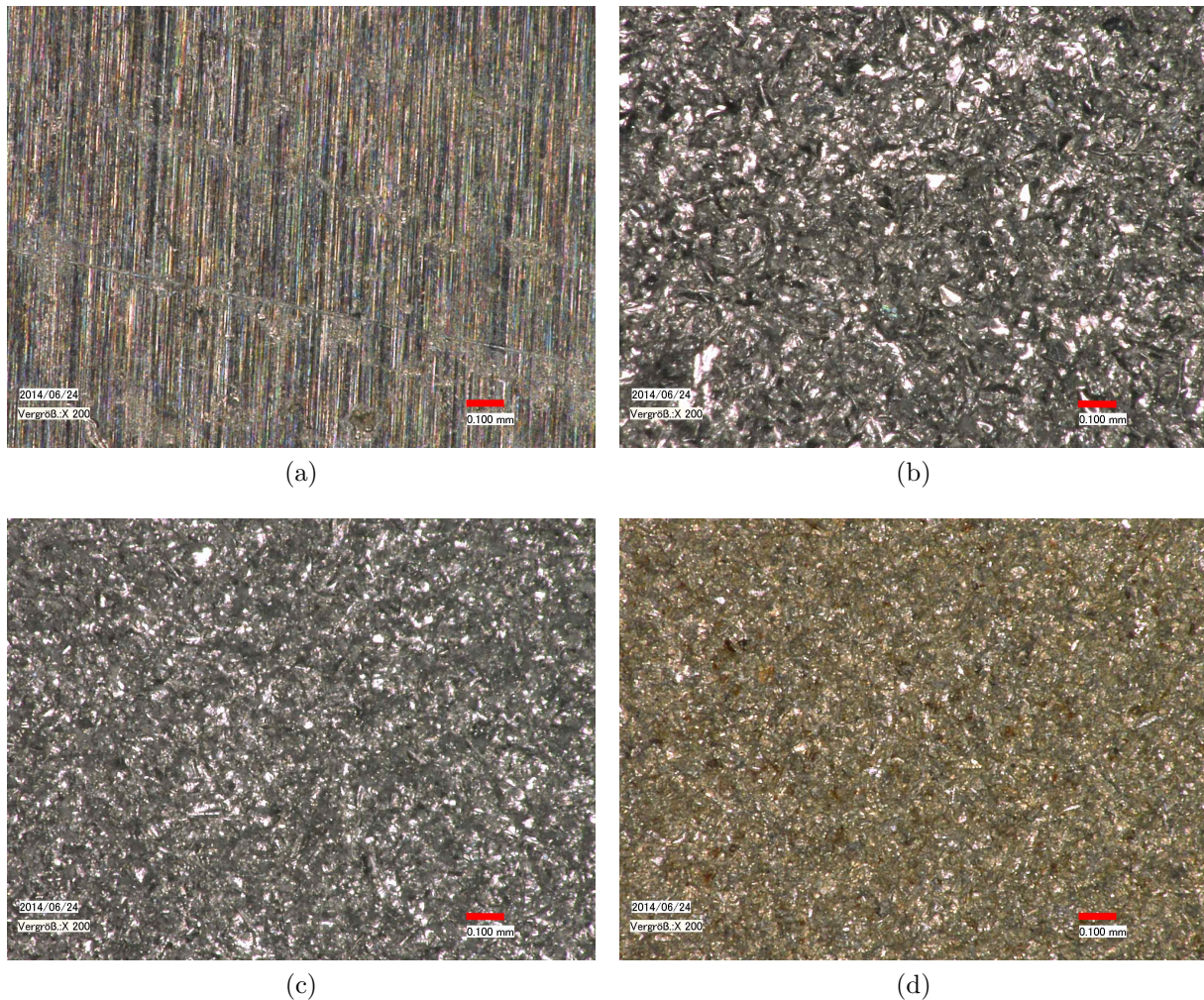


Abbildung 2.14: Oberflächenvergleich nach abrasiver Strahlung: (a) Referenz ohne Strahlung, (b) Mittlere Edelkorundkörnung, (c) Mittlere Glasbruchkörnung, (d) Mittlere Granatsandkörnung. Der Maßstabsbalken gibt 100 μm an.

schließenden Phosphorsäurebehandlung wird die bei der Anodisierung entstehende anodische Oxidschicht wieder reduziert und geöffnet. Durch diese Aktivierung der Oberfläche verbessert sich die Benetzung. Eine detaillierte Beschreibung der Vorgänge ist [60] zu entnehmen. Es kann allerdings festgehalten werden, dass die nasschemische Ätzung in Kombination mit einer elektrochemischen zu sehr guten Dichtigkeiten führt. Dazu ist jedoch eine komplexe und aufwendige Vorbehandlung erforderlich.

Die Plasmabehandlung schließlich führt zwar zu einer Verbesserung der Dichtigkeit, die Festigkeit wird jedoch entgegen der Erwartungen aus der Literatur [71] nur leicht beeinflusst. Dies lässt sich dadurch erklären, dass der Nutzen einer Plasmabehandlung stark von den eingestellten Parametern abhängt und diese für andere Materialien als die hier verwendeten optimiert

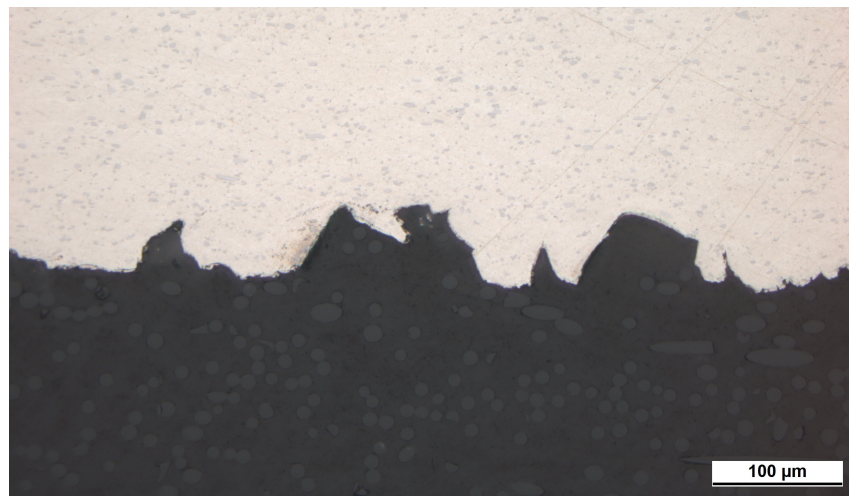


Abbildung 2.15: Querschnitt einer mit Edelkorund gestrahlten und mit PA 66 umspritzten Aluminiumoberfläche. Der Kunststoff benetzt die Oberfläche sehr gut, was in einer optimalen mikro-mechanischen Verklammerung resultiert.

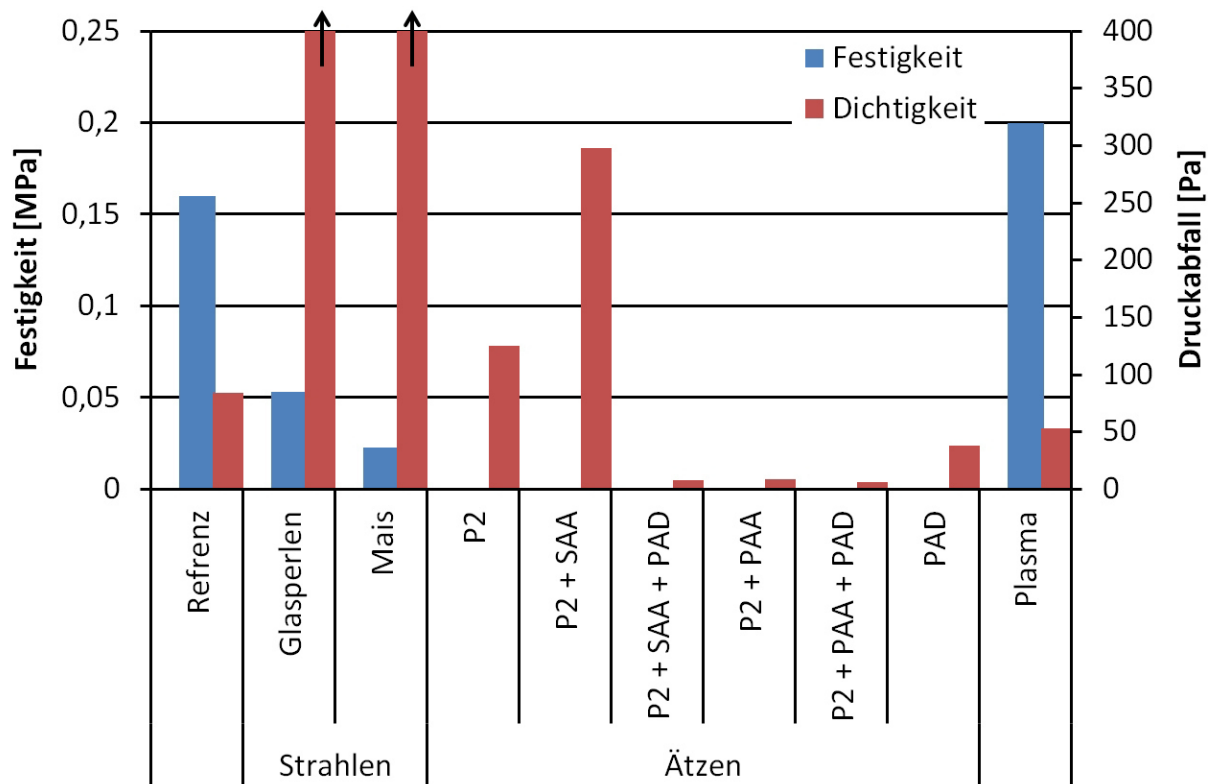
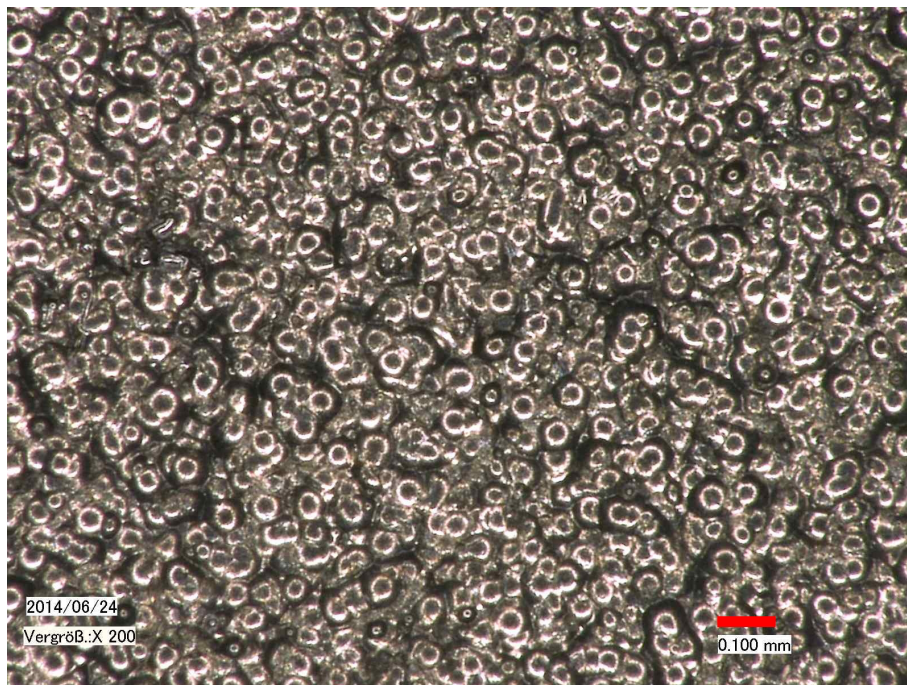


Abbildung 2.16: Einfluss von polierenden Strahlmitteln, Ätzungen und einer Plasmabehandlung auf die Qualität der Aluminium-PA 66-Verbindung. Bei geätzten Probekörpern werden keine Festigkeitsprüfungen durchgeführt. Glasperlen- und Maisprobekörper sind undicht, ihr Druckabfall liegt außerhalb der Skala.



(a)



(b)

Abbildung 2.17: (a) Oberfläche nach Strahlung mit Glasperlen, Maßstab $100\ \mu\text{m}$. (b) Querschnitt nach Umspritzung mit PA 66. Die schlechte Benetzung des Metalls führt zu Spalten zwischen Kunststoff und Metall.

wurden. Es ist daher in fortführenden Analysen zunächst eine Bestimmung der optimalen Parameter erforderlich.

Schlussfolgerungen

Mit stark abrasiven Strahlmitteln kann sowohl die Dichtigkeit als auch die Festigkeit positiv beeinflusst werden. Soll hauptsächlich die Mediendichtigkeit verbessert werden, können auch

andere Vorbehandlungen verwendet werden. Eine Strahlung mit Glasperlen oder Mais führt jedoch zur Undichtigkeit der Probe und ist daher nicht zielführend. Ätzen und Plasmabehandlung erreichen zwar gute Dichtigkeiten, beim Ätzen ist jedoch eine komplexe Vorbehandlung und bei der Plasmabehandlung eine aufwendige Parameteroptimierung erforderlich. Da die stark abrasiven Strahlmittel ebenfalls sehr gute Werte bei deutlich geringerem Aufwand erzielen, werden die Plasmabehandlung und das Ätzen im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Da aufgrund des signifikanten Einflusses der Abrasivität der Oberfläche differenzierte Untersuchungen erforderlich sind, werden diese in den weiteren Kapiteln unter folgenden Bedingungen durchgeführt:

- Da alle abrasiven Strahlmittel einen ähnlichen Einfluss aufweisen, wird nur Edelkorund verwendet. Dieses weist die größte verfügbare Anzahl an Körnungen auf, woraus ein weitreichender Rauheitsbereich resultiert.
 - Zur Beschreibung der Größe der Abrasivität wird der arithmetische Mittenrauwert R_a verwendet, weil dessen Messung reproduzierbar ist und nur eine geringe Streuung aufweist [16, 81]. Zudem werden damit Vergleiche mit Literaturdaten ermöglicht.
 - Alle gefertigten Probekörper werden durch eine Ultraschallreinigung in Aceton gereinigt, um einen definierten Zustand auf der Oberfläche zu erzeugen. Eine Kombination mit weiteren Verfahren zur Vorbehandlung der Oberfläche ist nicht erforderlich.
 - Die Oberflächentemperatur wird nicht weiter berücksichtigt. Diese führt zwar zu einer Verbesserung der Dichtigkeit um ca. 15 %, der Druckabfall liegt aber infolge der abrasiven Strahlung bereits bei sehr geringen Werten. Daher beträgt der Absolutwert der Verbesserung auch lediglich ca. 8 Pa. Ferner sind die Auswirkungen auf die Festigkeit unterschiedlich und eine erhöhte Einlegetemperatur gestaltet den Fertigungsprozess aufwendiger und fehleranfälliger.
 - Die Auswirkungen der Abrasivität auf die Festigkeit und Mediendichtigkeit werden zunächst einzeln untersucht. In Kapitel 3 werden die Auswirkungen auf die Festigkeit, in Kapitel 4 auf die Mediendichtigkeit betrachtet. In Kapitel 5 werden die Erkenntnisse dann in einem Probekörper kombiniert.
 - Zur Analyse der Mediendichtigkeit ist es unerlässlich, definierte Strukturen zu fertigen und zu bewerten. Daher wird bei diesen Versuchen zusätzlich eine Laserbehandlung betrachtet.
-

3 Relation zwischen Oberflächenrauheit und Verbundfestigkeit

Aufgrund des signifikanten Einflusses der Rauheit der Metalloberfläche auf die Festigkeit eines IMA-Verbundes sollen im Folgenden die Auswirkungen unterschiedlicher Rauheiten auf die Zug- und Scherfestigkeit bestimmt werden.

3.1 Stand der Technik

3.1.1 Geklebte Verbunde

Der Stand der Technik zeigt verschiedene Erkenntnisse hinsichtlich des Zusammenhangs zwischen Rauheit und Verbundfestigkeit. Bis auf wenige Ausnahmen wurden diese in der Klebforschung erzielt. Amada und Yamada [82] untersuchen die Festigkeit einer Klebung zwischen sandgestrahlten keramischen Beschichtungen auf Metall. Aus ihren Ergebnissen wird ersichtlich, dass mit ansteigendem arithmetischem Mittenrauwert R_a die Festigkeit zuerst bis auf ein Maximum ansteigt und anschließend wieder abnimmt. Die Rauheit R_a , bei der die Festigkeit maximal ist, variiert infolge des bestrahlten Materials, der Strahleinstellungen, dem Strahlmittel etc.

Bei geklebten Stahl-Stahl-Verbunden fanden Uehara und Sakurai [83] heraus, dass bei geringen R_a -Werten (2-4 μm) eine maximale Zug- und Scherfestigkeit des Verbundes erreicht wird. Bei weiterer Vergrößerung von R_a (auf bis zu 12 μm) sinkt die Festigkeit. Die Ergebnisse sind vom verwendeten Klebstoff abhängig. Ihren Ausführungen folgend, wird die Relation zwischen Oberflächenrauheit und Verbundfestigkeit von drei Haupteffekten beeinflusst: mit ansteigender Rauheit wird die Klebfestigkeit zwar aufgrund einer verbesserten mechanischen Adhäsion vergrößert, aber gleichzeitig auch infolge eines Kerbeffektes durch die entstehenden Rauheitsspitzen verkleinert. Weiterhin stellten die Autoren dar, dass die Klebfestigkeit verkleinert wird, da die Klebschichtdicke infolge der größeren Rauheit zunimmt und die Scherfestigkeit einer Klebung reziprok proportional zu dieser ist. Da allerdings die Auswirkungen der Verbesserung der mechanischen Adhäsion zunächst überwiegen, entsteht ein Maximum bei kleinen Werten von R_a .

Sekercioğlu et al. [84] untersuchten statisch und dynamisch belastete Stahl-Stahl-Klebung.

Auch ihr Ansatz zur Erklärung des Zusammenhangs berücksichtigt die mikro-mechanische Verankerung und die Klebschichtdicke: Bei kleinen Rauheiten können nur minimale Scherfestigkeiten infolge einer geringen mikro-mechanischen Verankerung erzielt werden. Allerdings ist die erreichbare Festigkeit bei großen Rauheiten durch zu dicke Klebschichten ebenfalls gering. Die maximale Scherfestigkeit kann bei einem R_a zwischen $1,5 \mu\text{m}$ und $2 \mu\text{m}$ erzielt werden. Die Ergebnisse sind auf dynamische Lasten übertragbar. Durch die Aufteilung der Rauheits-Festigkeitskurve in einen linearen und einen quadratischen Anteil (Unterteilung bei $R_a = 3,2 \mu\text{m}$) stellen die Autoren zudem eine Möglichkeit vor, die Scherfestigkeit je nach Rauheit abschätzen zu können.

Der Einfluss dieser drei Effekte (Oberflächen-, Kerb- und Dickeneffekt) wird auch von Habenicht [4] beschrieben: Beim Verkleben von zwei Materialien werden häufig ihre Oberflächen aufgeraut. Dadurch vergrößert sich die Klebfestigkeit infolge der Verbesserung der mikro-mechanischen Verankerung (**Oberflächeneffekt**). Ab einer bestimmten Rauheit (je nach verwendeten Materialien) nimmt die Klebfestigkeit jedoch ab, da a) ein Kerbeffekt aufgrund großer Rauheitsspitzen auftritt (**Kerbeffekt 1**) und b) diese Rauheitsspitzen höher als die Dicke der Klebschicht sind und sich berühren. Daraus resultieren lokale Spannungsspitzen, die zu einem **Kerbeffekt 2** und zur Störung des Kraftverlaufes führen. Weiterhin vergrößert sich mit ansteigender Rauheit die Klebschichtdicke, wodurch aus zwei Gründen die Klebfestigkeit verringert wird:

1. Bei kleinen Klebschichtdicken wird die Querkontraktion des Klebstoffes verhindert, was sich positiv auf die Verbundfestigkeit auswirkt. Mit zunehmender Klebschichtdicke wird diese jedoch begünstigt, d. h. der Anteil der auf reinen Kohäsionskräften beruhenden Klebschichtfestigkeit wird größer [85]. Aufgrund der geringen Festigkeit eines Klebstoffes versagt der Verbund daher frühzeitig durch einen Kohäsionsbruch des Klebstoffes (**Dickeneffekt 1**).
2. Dicke Klebschichten weisen eine vergrößerte Schwindung auf, wodurch Eigenspannungen und infolgedessen reduzierte Klebfestigkeiten entstehen (**Dickeneffekt 2**).

Die dargestellten Ergebnisse wurden aus der mechanischen Adhäsionstheorie abgeleitet. Wird stattdessen die spezifische Adhäsionstheorie betrachtet, zeigen sich ähnliche Beobachtungen. Durch das Aufrauen wird einerseits die chemische Zusammensetzung der Oberfläche geändert, wodurch die Ausbildung chemischer Bindungen ermöglicht und/oder verbessert werden kann. Andererseits können infolge der Oberflächenvergrößerung mehr chemische Bindungen entstehen. Basin [86] und Chen et al. [87] konnten zeigen, dass auch infolge des Ansteigens der Anzahl der chemischen Bindungen ein Maximum der Verbundfestigkeit erreicht wird. Wird die

Oberfläche darüberhinaus behandelt (so dass weitere chemische Bindungen entstehen), konzentrieren sich die mechanische Spannungen an der Grenzfläche, was in einer Verringerung der Festigkeit resultiert.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Punkte, aus denen eine schematische Rauheits-Festigkeitskurve für geklebte Verbunde abgeleitet werden kann, vgl. Abbildung 3.1.

- Es ist von vielen Faktoren abhängig (verwendetes Material, Prüfungen etc.), ob das Aufrauen einen positiven oder negativen Einfluss auf die Festigkeit des Verbundes besitzt [78].
- Mit ansteigender Rauheit steigt die Festigkeit infolge der verbesserten mikro-mechanischen Verankerung (Oberflächeneffekt) auf ein Maximum an. Die Oberflächenrauheit bei der dieses Maximum entsteht liegt oftmals zwischen $R_a = 2 \mu\text{m}$ bis $4 \mu\text{m}$ (Bereich I).
- Nach diesem Maximum sinkt die Festigkeit infolge der größer werdenden Kerb- und Dickeneffekte. Die Verbundfestigkeit liegt aufgrund des ebenfalls größer werdenden Oberflächeneffektes jedoch immer noch höher als bei einer unstrukturierten Probe (Bereich II).
- Bei noch größeren R_a -Werten liegen keine Informationen vor. Es ist allerdings anzunehmen, dass Oberflächeneffekt sowie Kerb- und Dickeneffekte stark ausgeprägt sind und der Klebstoff aufgrund seiner geringen Festigkeit kohäsiv versagt. Die resultierende Verbundfestigkeit ist demnach nur unwesentlich höher als in Bereich II (Bereich III).
- Der beschriebene Verlauf entsteht sowohl bei Zug- als auch bei Scherbelastung sowie statischer oder dynamischer Belastung.

3.1.2 IMA-Verbunde

Bei IMA-Verbunden wurden die Auswirkungen verschiedener Rauheiten auf die Verbundfestigkeit nur vereinzelt systematisch untersucht. Bergmann und Stambke [42] betrachten das Laserfügen von Kunststoff und einer aufgerauten Metalloberfläche. Die maximale Scherfestigkeit wird infolge der Verbesserung der mikro-mechanischen Verankerung zwischen $R_a = 2 \mu\text{m}$ bis $4 \mu\text{m}$ erreicht. Bei Vergrößerung der Rauheit auf bis zu $6 \mu\text{m}$ wird die Festigkeit reduziert. Über diesen Wert hinaus liegen keine Ergebnisse vor. Zur Erklärung dieser Verringerung wurde von den Autoren vermutet, dass eine optimale Oberflächentopographie mit Hinterschneidungen, Poren usw. existiert und diese durch die weitere Vergrößerung der Rauheit minimiert wird. Weiterhin wurde von ihnen angenommen, dass unterschiedliche Körnungen des Strahlmittels verschiedene Aktivierungsenergien auf der Oberfläche erzeugen. Diese werden für die

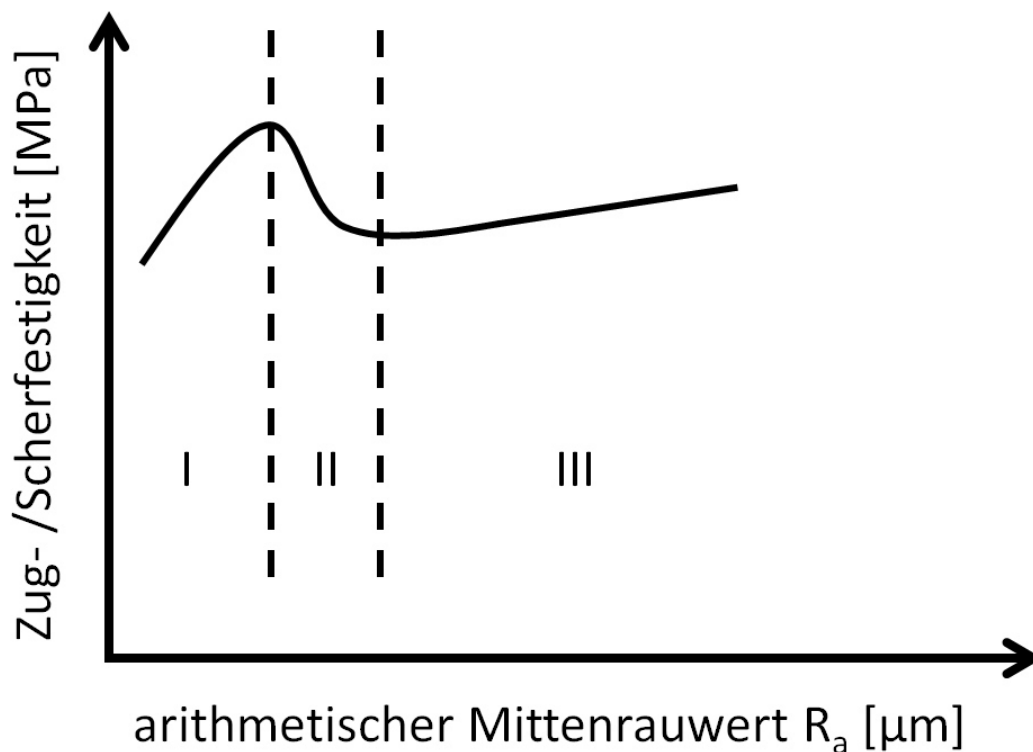


Abbildung 3.1: Schematische Rauheits-Festigkeitskurve für geklebte Probekörper

Mechanismen der spezifischen Adhäsion benötigt. Die Autoren weisen zudem darauf hin, dass die Verwendung glasfaserverstärkter Kunststoffe zu höheren Schersfestigkeiten führt, da die auftretenden Spannungen von der Grenzfläche ins Material übertragen werden, wodurch ein Risswachstum erschwert wird.

Der Einfluss der mikro-mechanischen Verankerung und der Glasfasern wird auch von Lucchetta et al. [46] herausgefunden. Sie zeigen, dass der Kunststoff durch die Glasfasern besser in der Rauheit des Metalls verankert wird, was zu höheren Festigkeiten des Verbundes führt. Zudem reduzieren Glasfasern die Schwindung des Kunststoffes, wodurch die Verbundfestigkeit weiter gesteigert wird.

Kim et al. [62] untersuchen vor allem den Einfluss der Versagensart bei auf Stahl laminiertem CFRP (carbon fiber reinforced plastic) Prepreg. Ihre Ergebnisse nach wird eine Festigkeitssteigerung durch Vergrößerung der Rauheit nur erreicht, wenn statt adhäsivem kohäsives Versagen auftritt. Dies liegt insbesondere daran, dass die Festigkeitssteigerung infolge der mikro-mechanischen Verankerung durch die Verhakung an der Oberflächentopographie des Metalls sowie den mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes bestimmt wird. Die Rauheit der Oberfläche ist gemäß den Autoren zudem ein geeignetes Kriterium um den Übergang zwischen den Versagensarten zu bestimmen.

3.2 Zielsetzung

Aus den bisherigen Erkenntnissen der Forschung kann eine schematische Rauheits-Festigkeitskurve für Klebungen abgeleitet werden. Dennoch wurden bisher nur sehr wenige Untersuchungen bei der Verwendung eines IMA-Prozesses durchgeführt. Es wird daher im Folgenden eine schematische Rauheits-Festigkeitskurve für IMA-Verbunde entwickelt.

These

Zwischen einem spritzgegossenem Kunststoff und einem Klebstoff existieren signifikante Unterschiede, z. B. die Materialeigenschaften oder das Verhalten unter Last. Es wird in dieser Arbeit angenommen, dass diese Unterschiede den Oberflächeneffekt, die Kerb- und Dickeneffekte sowie deren Einfluss auf die drei Bereiche der Rauheits-Festigkeitskurve beeinflussen, vgl. Abbildung 3.2. Diese Annahmen sollen im Folgenden am Beispiel des Kunststoffes PA 66 und des Klebstoffes Loctite[®] 640[™] (Werkstoffdaten in Anhang B) detailliert erläutert werden:

1. Einfluss bei geringen Rauheiten (Bereich I)

Da die Viskosität des Klebstoffes geringer ist als die der Kunststoffschmelze, kann die Metalloberfläche bei Klebungen besser benetzt werden. Daraus ergibt sich eine verstärkte Wirkung des Oberflächeneffektes und damit höhere Festigkeiten. Allerdings existieren bei einer Klebung zwei Grenzflächen: Kunststoff-Klebstoff und Klebstoff-Metall. Infolgedessen muss eine gute Benetzung der Metall- und der Kunststoffoberflächen erzielt werden. Bei IMA-Verbunden existiert dagegen nur eine Grenzfläche, wodurch auch nur die Metalloberfläche gut benetzt werden muss. Dadurch wird der Oberflächeneffekt ebenfalls beeinflusst. Insgesamt wird für IMA-Verbunde in Bereich I derselbe Verlauf, aber bei geringeren Festigkeiten, erwartet.

2. Einfluss bei mittleren Rauheiten (Bereich II)

Infolge der ansteigenden Rauheit führen bei den geklebten Verbunden die größer werdenden Kerb- und Dickeneffekte 1 & 2 zu einer Verringerung der Festigkeit. Aufgrund des Oberflächeneffektes weist der Verbund aber immer noch eine größere Festigkeit als bei geringen Rauheiten auf. Bei den IMA-Verbunden sind die Effekte unterschiedlich ausgeprägt: Da nur die Metalloberfläche aufgeraut wird, wirkt zwar Kerbeffekt 1 infolge größer werdender Spannungsspitzen, es können sich jedoch keine Rauheitsspitzen berühren, wodurch Kerbeffekt 2 nicht auftritt. Obwohl beim Kunststoff ebenfalls ein Dickeneffekt 2 existiert (der Kunststoff besitzt ebenfalls eine vergrößerte Schwindung mit ansteigender Rauheit), wirkt dieser weniger schädlich und wird zudem durch die Verwendung von Glasfasern weiter reduziert. Weiterhin besitzt der hier betrachtete Kunststoff PA 66 eine höhere Festigkeit als Loctite[®] 640[™]. Da

demnach der schädliche Effekt deutlich verringert ist, wenn der kohäsive Versagensanteil des Kunststoffes ansteigt, wird bei kohäsivem Versagen von IMA-Verbunden eine höhere Festigkeit erwartet (Dickeneffekt 1). Diese Unterschiede besitzen insbesondere beim Auftreten von kohäsivem Versagen einen signifikanten Einfluss. Weil im Bereich II die Effekte allerdings erst gering ausgeprägt sind und adhäsives Versagen auftritt, wird ebenfalls derselbe Kurvenverlauf aber bei geringeren Festigkeiten erwartet.

3. Einfluss bei großen Rauheiten (Bereich III)

In Bereich III tritt kohäsives statt adhäsives Versagen bei den Klebungen auf. Es wird angenommen, dass der Übergang der Versagensart bei geklebten und IMA-Verbunden ungefähr bei gleichen R_a -Werten stattfindet. Aufgrund der unterschiedlichen Festigkeiten der Werkstoffe führt kohäsives Versagen zu geringeren Verbundfestigkeiten bei den geklebten Verbindungen und höheren Verbundfestigkeiten bei den IMA-Verbunden. Daher wird ein erneutes Ansteigen der Festigkeit in Bereich III erwartet. Falls die IMA-Probekörper weiterhin adhäsiv versagen, wird aufgrund der vorgestellten Unterschiede der Effekte ebenfalls ein Ansteigen der Festigkeit angenommen.

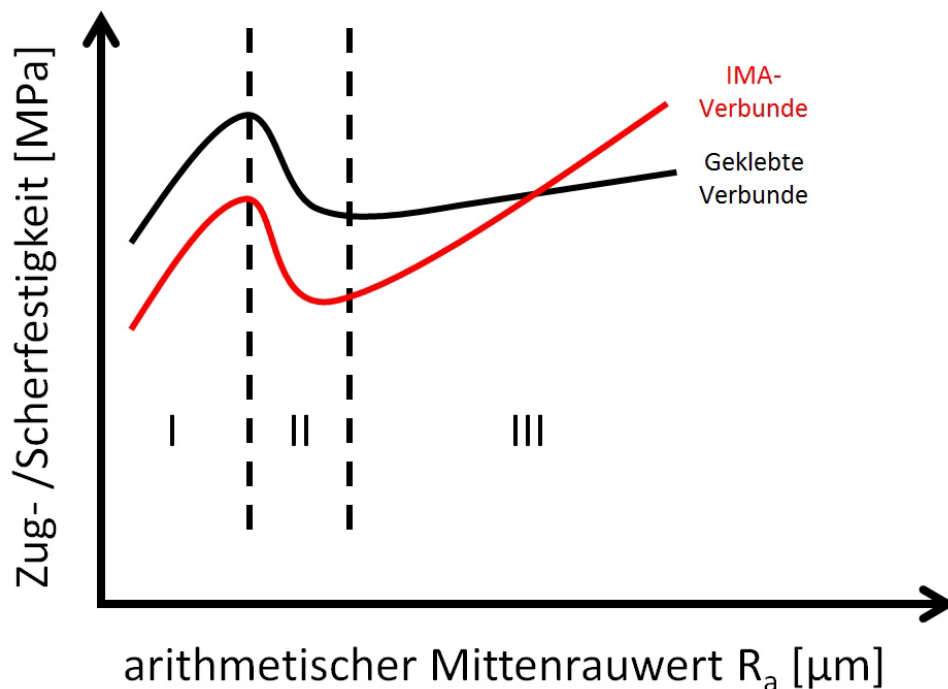


Abbildung 3.2: Schematische Rauheits-Festigkeitskurve für geklebte Verbunde (schwarz) sowie der angenommene Verlauf für IMA-Verbunde (rot). Aufgrund der vorgestellten Unterschiede wird bei IMA-Verbunden in Bereich I und II der gleiche Verlauf aber mit geringerer Festigkeit und in Bereich III ein erneutes Ansteigen zu höheren Festigkeiten erwartet.

Zur Überprüfung der These werden mit Loctite® 640™ geklebte Aluminiumverbindungen sowie IMA-Scher- und Zugprobekörper aus PA 66 und Aluminium bei unterschiedlichen Rauheiten hergestellt und geprüft. Da es keine Normprobekörper für IMA-Verbunde gibt [32], müssen diese in einem ersten Schritt entwickelt werden. Aus den Versuchen soll eine Rauheits-Festigkeitskurve für Zug- und Scherbelastung entwickelt und kritisch bewertet werden. Darauf aufbauend wird ein Simulationsmodell erstellt mit dem bei Vorgabe der Rauheit die Versagenswahrscheinlichkeit sowie die zu erwartenden Verbundfestigkeiten und Versagensarten bestimmt werden können.

3.3 Aufbau und Durchführung experimenteller Untersuchungen

Es existiert im Stand der Technik keine geometrische Gestaltung von geeigneten IMA-Probekörpern, so dass die Notwendigkeit der Eigenentwicklung besteht. Die benötigten Scher- und Zugprobekörper weisen dieselben Anforderungen auf: Aufgrund der Vergleichbarkeit müssen diese sowohl als Klebung als auch als IMA-Verbund herstellbar sein. Zudem müssen die Probekörper kunststoffgerecht konstruiert werden, da ansonsten z. B. Spritzgussfehler entstehen, die zu einem verfrühten Ablösen der Grenzflächen führen. Damit der Einfluss der Aufrauung bestimmt werden kann, müssen die Probekörper weiterhin eine genügend große Fügefläche besitzen. Schließlich sollen sie auch Vergleiche mit den Literaturdaten ermöglichen.

3.3.1 Probekörper zur Bestimmung der Scherfestigkeit

Die Ergebnisse der Klebforschung wurden überwiegend mit Probekörpern erzielt, die nach DIN EN 1465 (Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungsklebungen [88]) konstruiert wurden. Um die Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen aus der Literatur zu vereinfachen, wird die Fügefläche der in dieser Arbeit entwickelten Körper ebenfalls aus DIN EN 1465 übernommen (25 mm x 12,5 mm). Die Gestaltung des Metalleinlegers und des Kunststoffes basiert auf den Normen DIN 50125 (Zugprüfung von Metallprobekörpern [89]) und DIN EN ISO 527-2 (Zugprüfungen von Kunststoffen [90]): zur Verbesserung der Einspannung in den Prüfstand werden Metall sowie Kunststoff am Ende verbreitert und die Übergänge von der Einspannbreite auf die Haftflächenbreite doppelt verrundet. Die Dicke beträgt 1 mm (Metall) bzw. 3 mm (Kunststoff). Das Metalleinlegeteil wird zudem mit einem Loch gefertigt, um es mit einem Zentrierstift im Spritzgusswerkzeug zu positionieren. Dieses Loch wird mittels FEM so ausgelegt, dass es keinen Einfluss auf die Fügefläche besitzt. Um den Nachteil der auftretenden Biegebelastung bei der Prüfung einfacher Überlappungen (Single-lap-Joint, SLJ) zu eliminieren [91], werden die

Probekörper mit doppelter Überlappung (Double-lap-Joint, DLJ) gefertigt. Zusätzlich steht durch die Verdoppelung der Fügefläche eine größere Oberfläche zur Vorbehandlung zur Verfügung. Da insbesondere bei groben Strahlmitteln lokal unterschiedliche Rauheiten entstehen können, wird somit die Prüfgenauigkeit verbessert. Zusammenfassend wird der Probekörper wie in Abbildung 3.3 dargestellt gefertigt. Alle Konstruktionsdaten können den Zeichnungen in Anhang A entnommen werden.

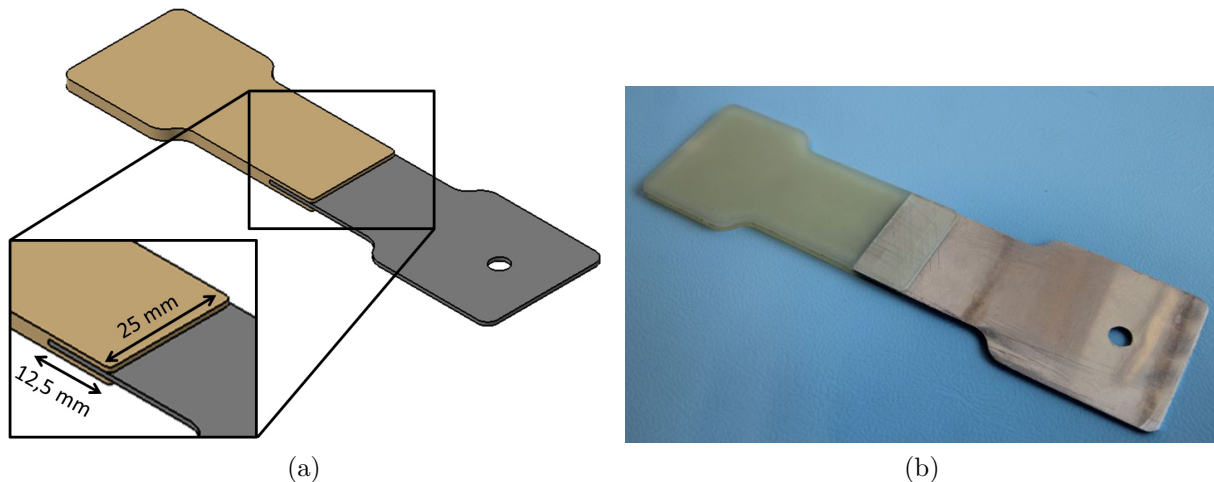


Abbildung 3.3: Probekörper zur Bestimmung der Scherfestigkeit eines IMA-Verbundes in Annäherung an die Normen für die Prüfung von Kunststoffen, Metallen und Klebungen: (a) CAD-Modell und (b) Realprobekörper

3.3.2 Probekörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit

Zugbelastungen und damit Zugprüfungen geklebter Verbindungen besitzen nur eine geringe Bedeutung. Dies ist darin begründet, dass Klebstoffe im Vergleich zu den zu fügenden Werkstoffen nur geringe Zugfestigkeiten aufweisen und Klebungen auf Stoß es somit nicht ermöglichen, die Fügeteilfestigkeit auszunutzen [92]. Sie werden daher nur in Ausnahmefällen eingesetzt, z. B. bei der Verklebung von Kunststoffen mit geringer Eigenfestigkeit [4]. Da jedoch Kunststoffe und speziell glasfaserverstärkte Kunststoffe deutlich höhere Zugfestigkeiten als Klebstoffe aufweisen, ist dieser Nachteil geringer ausgeprägt. Dennoch gibt es zu dieser Thematik bisher nur wenige Untersuchungen [83]. Daher soll auch die Zugfestigkeit der IMA-Verbindung bei unterschiedlichen Rauheiten geprüft werden.

Zur Bestimmung der Zugfestigkeit werden sogenannte Stumpfklebungen eingesetzt. Diese sind gemäß DIN EN 15870 [93] genormt und ermöglichen die Herstellung mit rundem oder quadratischem Querschnitt. Der Durchmesser bzw. die Seitenlänge kann 10 mm, 15 mm, 25 mm oder 50 mm betragen und die Seitenlänge 50 mm bzw. das Dreifache des Durchmessers, wobei

der kleinere Wert gilt. Für Spritzgusskörper eignen sich aufgrund des günstigeren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses runde Querschnitte deutlich besser. Es ist zu beachten, dass große Wanddicken (und damit Durchmesser) zu Lunkern und Einfallstellen führen [94]. Zu kleine Durchmesser führen dagegen aufgrund der kleinen Fügefläche zu einer schlechteren Bestimmung des Effektes der Oberflächenmodifikation. Mit Hilfe konstruktiver Erfahrungswerte und eigenen, simulationsgestützten Untersuchungen kann ein Durchmesser von 8 mm als Obergrenze für einen guten Spritzguss im konkreten Fall bestimmt werden. Die Fügefläche ist damit zwar deutlich kleiner als beim Scherprobekörper, Vorversuche zeigen aber dass die zu untersuchenden Effekte gemessen werden können. Die Länge des Fügeteils beträgt demnach 24 mm. Zur Prüfung kann der Probekörper über ein Innengewinde im Metall und über den Ringanguss des Kunststoffes in eine Zugprüfmaschine eingespannt werden. Der entwickelte Probekörper ist in Abbildung 3.4 dargestellt, die genauen Abmaße können der Technischen Zeichnung in Anhang A entnommen werden.

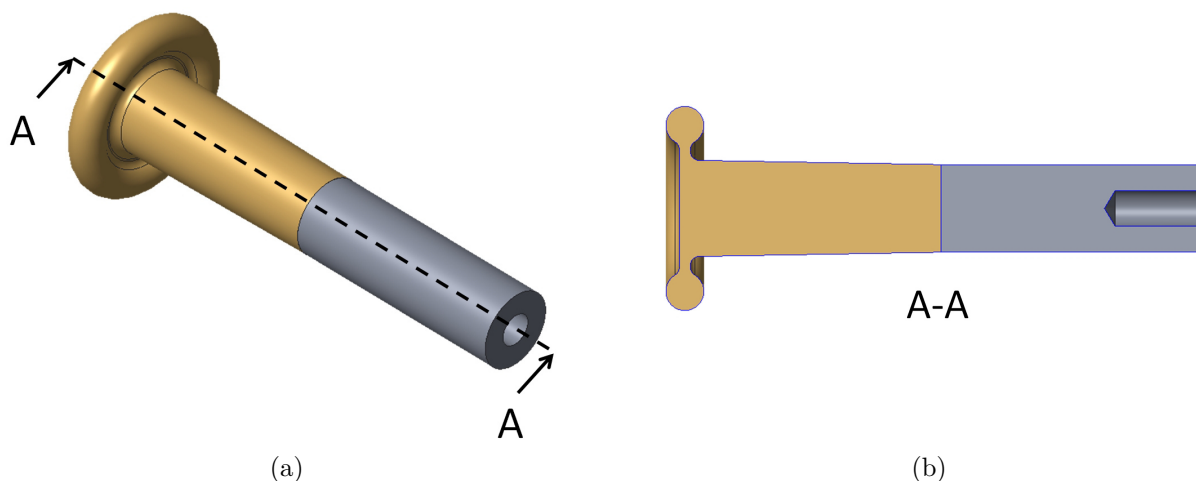


Abbildung 3.4: Probekörper zur Bestimmung der Zugfestigkeit eines IMA-Verbundes: (a) CAD-Modell und (b) Querschnitt des CAD-Modells

Besonderheiten

Ein Kunststoffprobekörper aus 8 mm dickem Vollmaterial reagiert sehr empfindlich gegenüber Schwindung, wodurch insbesondere Lunker und Einfallstellen entstehen. Für eine optimale Fügefläche und damit Vergleichbarkeit der Probekörper müssen diese Spritzgussfehler jedoch vor allem im Bereich der Fügefläche verkleinert oder vollständig eliminiert werden. Zudem schreibt die DIN EN 15870 vor, dass die Kontaktflächen während des Aushärtens eines Klebers durchgehend unter Druck stehen müssen.

Diese Anforderungen können allein durch eine Erhöhung des Nachdrucks allerdings nicht vollständig umgesetzt werden. Daher wird das Spritzgusswerkzeug so konstruiert, dass die Schwin-

dition zusätzlich durch eine Bewegung des Metalleinlegeteils kompensiert wird. Diese Bewegungsmöglichkeit wird mit einem Tellerfederpaket hinter dem Metalleinleger realisiert. Dieses Federpaket wird durch den Einspritzdruck komprimiert und erzeugt beim geringeren Nachdrucks einen Gegendruck, der auf die Fügestelle wirkt. Dadurch wird Druck von beiden Seiten auf den Probekörper ausgeübt, wodurch die Kunststoffqualität verbessert werden kann. Wie in Abbildung 3.5 dargestellt, wird durch das Federpaket die Entstehung von Lunkern minimiert und im Bereich der Fügefläche sogar vollständig reduziert. Die benötigte Federkraft wurde simulativ und experimentell ermittelt.

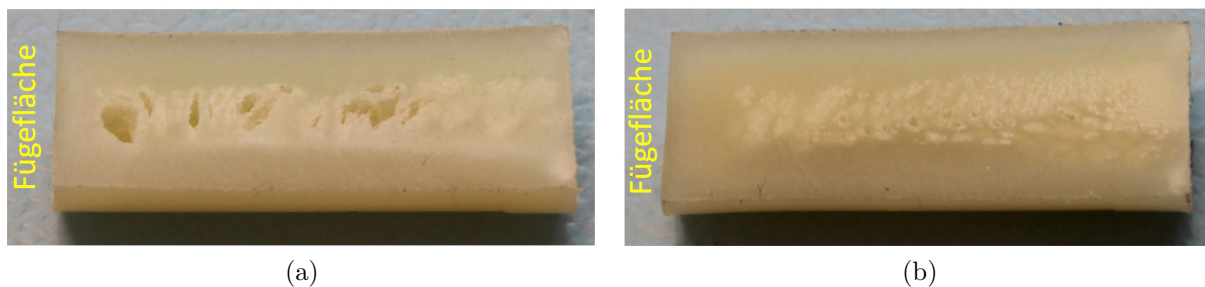


Abbildung 3.5: Einfluss der konstruktiven Schwindungskompensation auf die innere Formteilqualität: Querschnitt eines Probekörpers (a) ohne und (b) mit Unterstützung des Federpaketes. Es ist zu erkennen, dass die Lunker im Kunststoff minimiert und im Bereich der Fügefläche vollständig reduziert werden.

3.3.3 Fertigung der geklebten und der IMA-Probekörper

Die Metalleinleger aus EN-AW 3103 werden zur Vermeidung mechanischer und thermischer Einflüsse mittels Wasserstrahlschneiden gefertigt. Anschließend werden diese in Aceton nach DIN EN 13887 [40] ultraschallgereinigt. Dadurch werden Verschmutzungen (z. B. Fett) von der Oberfläche entfernt und nicht beim Strahlen in die Oberfläche eingebracht.

Das verwendete Strahlmittel Edeldorund (EK) liegt in 19 verschiedenen Körnungen vor (EK 12 - EK 240), das bedeutet Strahlmittelkorngrößen von $2000 \mu\text{m}$ (EK 12) bis $20 \mu\text{m}$ (EK 240). Demnach kann der arithmetische Mittenrauwert R_a in weiten Bereichen variiert werden. Das Strahlmedium wird bei einem Druck von 6 bar und einem Düsenwinkel von 90° auf den Bereich der späteren Fügefläche aufgebracht. Anschließend werden die Proben erneut gereinigt, um verbleibendes Strahlmittel auf der Oberfläche zu entfernen und um einen definierten Zustand auf allen Probekörpern zu erreichen. Die Messung der Rauheit erfolgt mit einem MAHR Perthometer nach DIN EN ISO 4288 [95].

Nach der Vorbehandlung werden die Proben mit PA 66 GF 30 (DuPont™ Zytel® 70G30HSLR

NC010) umspritzt. Die Kunststoffdaten können dem Datenblatt in Anhang B entnommen werden. Die wichtigsten Spritzgussparameter wurden in den Vorversuchen ermittelt und sind in Tabelle 5.1 angegeben. Nach der Fertigung werden die Proben bis zur Prüfung in Aluminiumfolie eingeschweißt, wodurch alle Proben denselben Feuchtegehalt aufweisen. Dieser liegt unter 0,05 %. Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche erfolgt keine Temperierung der Metalloberfläche, wodurch diese lediglich Werkzeugwandtemperatur besitzt.

Parameter	Wert
Masstemperatur	295 °C
Werkzeugwandtemperatur	50 °C
Einspritzdruck	2000 bar
Einspritzvolumenstrom	30,5 cm ³ /s
Nachdruckhöhe	1000 bar
Nachdruckdauer	15 s
Kühlzeit	29 s

Tabelle 3.1: Spritzgussparameter zur Herstellung der IMA-Zug- und Scherprobekörper

Da in der Literatur nur Festigkeitswerte von Klebungen bei Rauheiten kleiner 10 μm vorliegen, werden zusätzlich ausgewählte Rauheiten geklebt und geprüft. Diese werden wie die IMA-Probekörper vorbehandelt und dann mit Loctite[®] 640[™] (vgl. Anhang B) geklebt. Nach einer Aushärtezeit von 24 Stunden bei Raumtemperatur werden diese ebenfalls bis zur Prüfung eingeschweißt.

Die Zug- und Scherprüfungen erfolgen mit mindestens vier Probekörpern je Rauheit. Die Prüfungsgeschwindigkeit beträgt 0,5 mm/s bis ein Adhäsions-, Kohäsions- oder Mischbruch auftritt. Die Bruchfläche wird anschließend klassifiziert [96].

3.4 Versuchsergebnisse

3.4.1 Rauheitsmessungen

Abbildung 3.6 zeigt die Ergebnisse der Rauheitsmessungen. Mit den verschiedenen Edelkorundkörnungen (EK12 - EK 240) kann ein repräsentativer Rauheitsbereich erzeugt werden. Dieser reicht von $R_a = 0,15 \mu\text{m}$ für die unstrukturierte Referenz bis zu $R_a = 18 \mu\text{m}$ für EK 12. Bei feineren Körnungen existiert nur eine kleine Standardabweichung, die infolge des Herstellungsprozess des Strahlmittels mit gröberen Körnungen ansteigt. Auch die unbehandelte Referenz weist infolge der unterschiedlichen vorliegenden Oberflächen eine sehr hohe Standardabweichung auf.

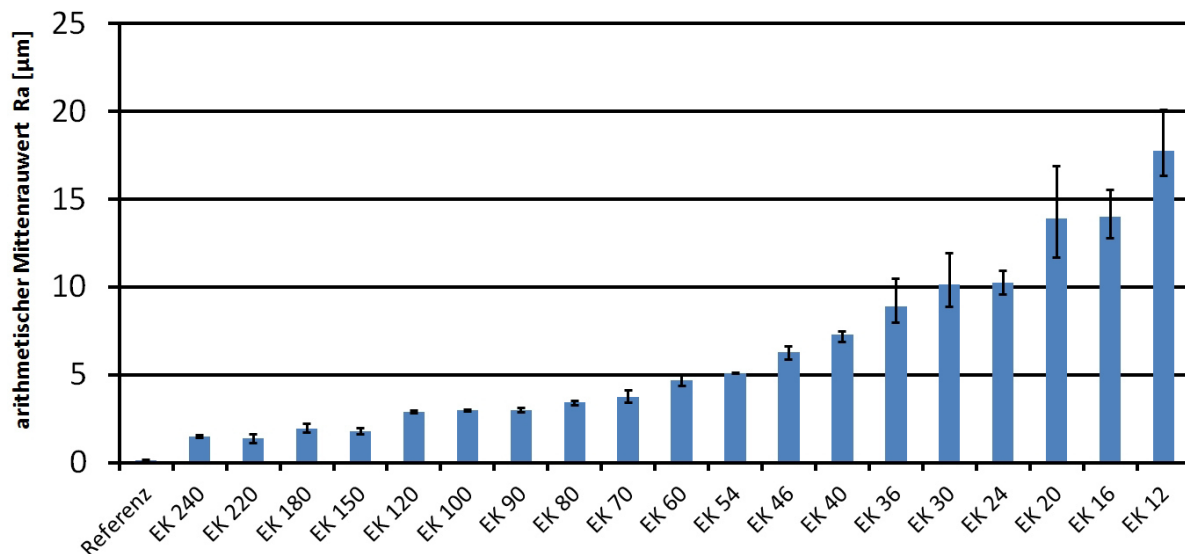


Abbildung 3.6: Arithmetischer Mittenrauwert R_a bei verschiedenen Edelkorundkörnungen (EK 12 - EK 240). Bei größeren Körnungen vergrößert sich die Standardabweichung infolge des Herstellungsprozesses des Strahlmittels. Die Referenz weist ebenfalls eine hohe Standardabweichung auf (ca. 25 % des Mittelwertes), diese ist jedoch aufgrund der Skalierung des Diagrammes nicht darstellbar.

3.4.2 Rauheits-Festigkeitskurven

Geklebte Verbunde

Abbildung 3.7 und Abbildung 3.8 zeigen die Rauheits-Festigkeitskurven für geklebte Verbunde unter Scher- und Zugbeanspruchung. Diese sind in Übereinstimmung mit der aus dem Stand der Technik abgeleiteten schematischen Rauheitskurve, vgl. Unterabschnitt 3.1.1. Die unstrukturierte Referenzprobe weist unter Zugbelastung keine und bei Scherung nur eine geringe Festigkeit auf. Die Proben versagen adhäsiv. Bei $\approx 2 \mu\text{m}$ entsteht bei beiden Kurven ein Maximum der Festigkeit. Anschließend sinkt die Festigkeit auf ein Minimum bei $\approx 6 \mu\text{m}$, wobei Mischbrüche auftreten. Die Scherfestigkeit des Verbundes an diesem Minimum ist geringer als die der Referenz. Bei hohen R_a -Werten versagen die Proben kohäsiv im Klebstoff und die Festigkeit ist im Vergleich zum Minimum nur minimal erhöht. Die drei Brucharten sind in Abbildung 3.9 ersichtlich. Die Messwerte der Zugprobekörper weisen eine hohe Übereinstimmung auf, wodurch nur eine sehr geringe Standardabweichung entsteht.

IMA-Verbunde

Die Ergebnisse der Prüfungen der IMA-Verbunde sind in Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11 dargestellt. Obwohl der im Folgenden dargestellte Verlauf bei den Scherprobekörpern deutlicher

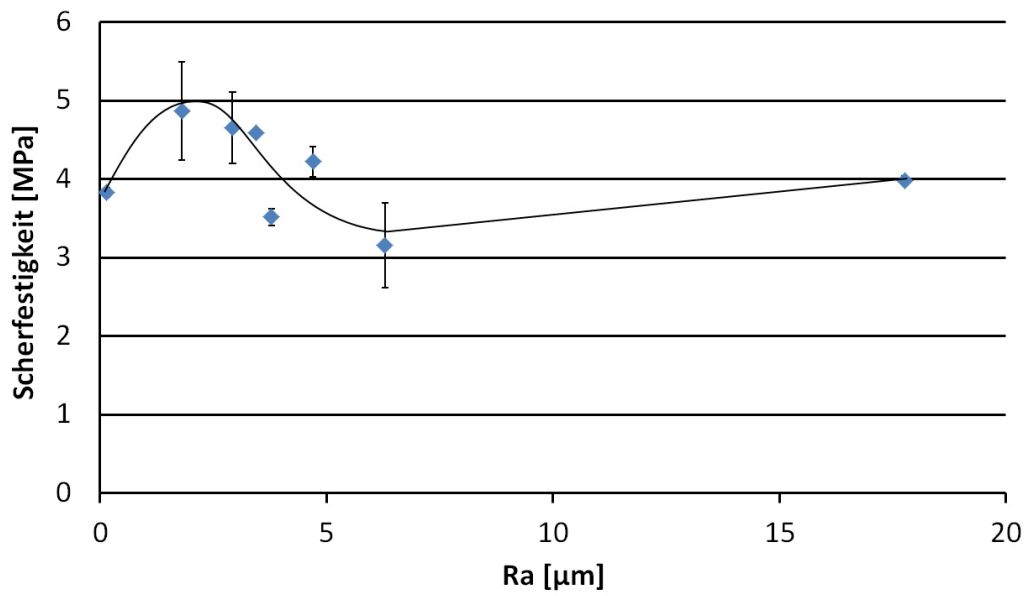


Abbildung 3.7: Experimentelle Rauheits-Scherfestigkeitskurve für geklebte Verbunde

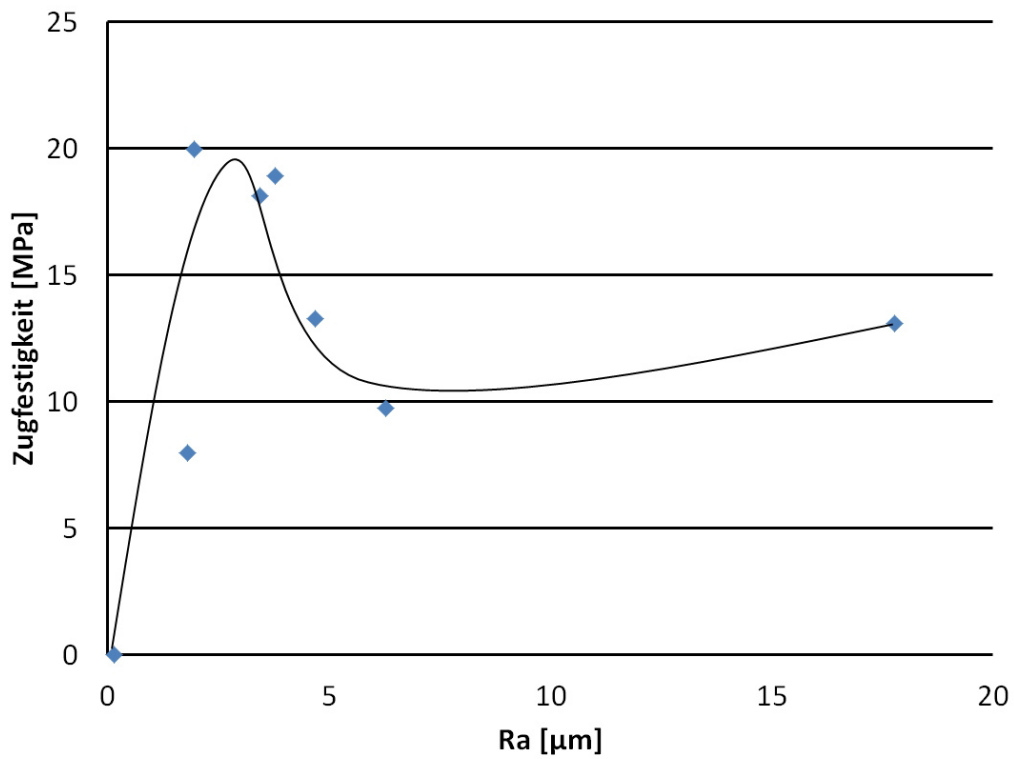


Abbildung 3.8: Experimentelle Rauheits-Zugfestigkeitskurve für geklebte Verbunde. Die Probekörper weisen eine so geringe Standardabweichung auf, dass keine Fehlerbalken erkennbar sind.

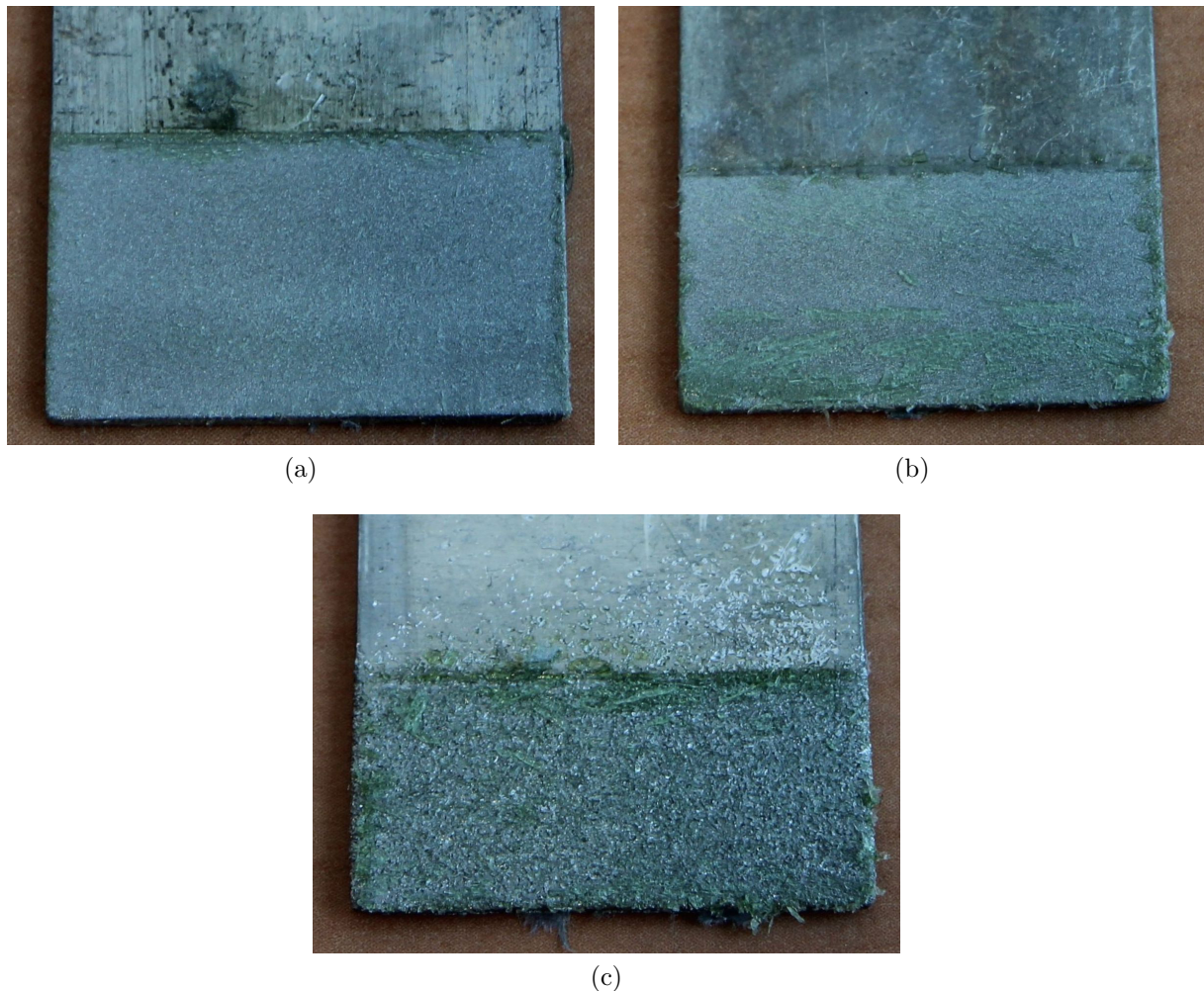


Abbildung 3.9: Bruchflächenuntersuchung der geklebten Verbunde am Beispiel der Scherprobekörper: (a) Adhäsionsbruch bei geringen Rauheiten (kein Klebstoff auf der Oberfläche vorhanden), (b) Mischbruch bei mittleren Rauheiten (teils kein Klebstoff und teils gerissener Klebstoff auf der Oberfläche) und (c) Kohäsionsbruch im Klebstoff bei groben Rauheiten (nur gerissener Klebstoff auf der Oberfläche). Die Bruchflächen der Zugprobekörper sind identisch.

ausgeprägt ist, kann er bei beiden Kurven beobachtet werden. Die unstrukturierte Referenz weist nur eine sehr geringe Festigkeit auf. Falls die Proben nicht direkt nach der Herstellung auseinanderfallen, kann das Aluminium per Hand aus dem Kunststoff gezogen werden. Mit ansteigendem R_a bildet sich ein erstes Maximum bei $\approx 2 \mu\text{m}$. Die hohe überlappende Standardabweichung unter Scherbelastung kennzeichnet zusätzlich das Erreichen eines Maximums [97]. Nach diesem Maximum sinkt die Festigkeit bis zu einem Minimum bei $\approx 3 \mu\text{m}$ (Zug) bzw. $\approx 4 \mu\text{m}$ (Scherung). Anschließend steigt die Festigkeit erneut an, aber zu nahezu dem

doppelten Wert (Scherung) bzw. vierfachen (Zug) des ersten Maximums. Auch hier zeigt die hohe überlappende Standardabweichung unter Scherbelastung das Erreichen eines Maximums. Nur die mit EK 60 gestrahlten Proben ($R_a = 4,7 \mu\text{m}$) passen nicht zum Verlauf der Rauheits-Scherfestigkeitskurve. Die kleine Standardabweichung des Messwertes zeigt jedoch, dass es sich nicht um einen Messfehler handelt. Bei Scherbeanspruchung treten unterhalb von $R_a = 10 \mu\text{m}$ nur Adhäsionsbrüche auf, bei $R_a > 10 \mu\text{m}$ versagen die Proben kohäsiv im Kunststoff, vgl. Abbildung 3.12. Mischbrüche werden nicht beobachtet. Die Bruchflächenanalyse der Zugprobekörper lässt nur Adhäsionsbrüche erkennen.

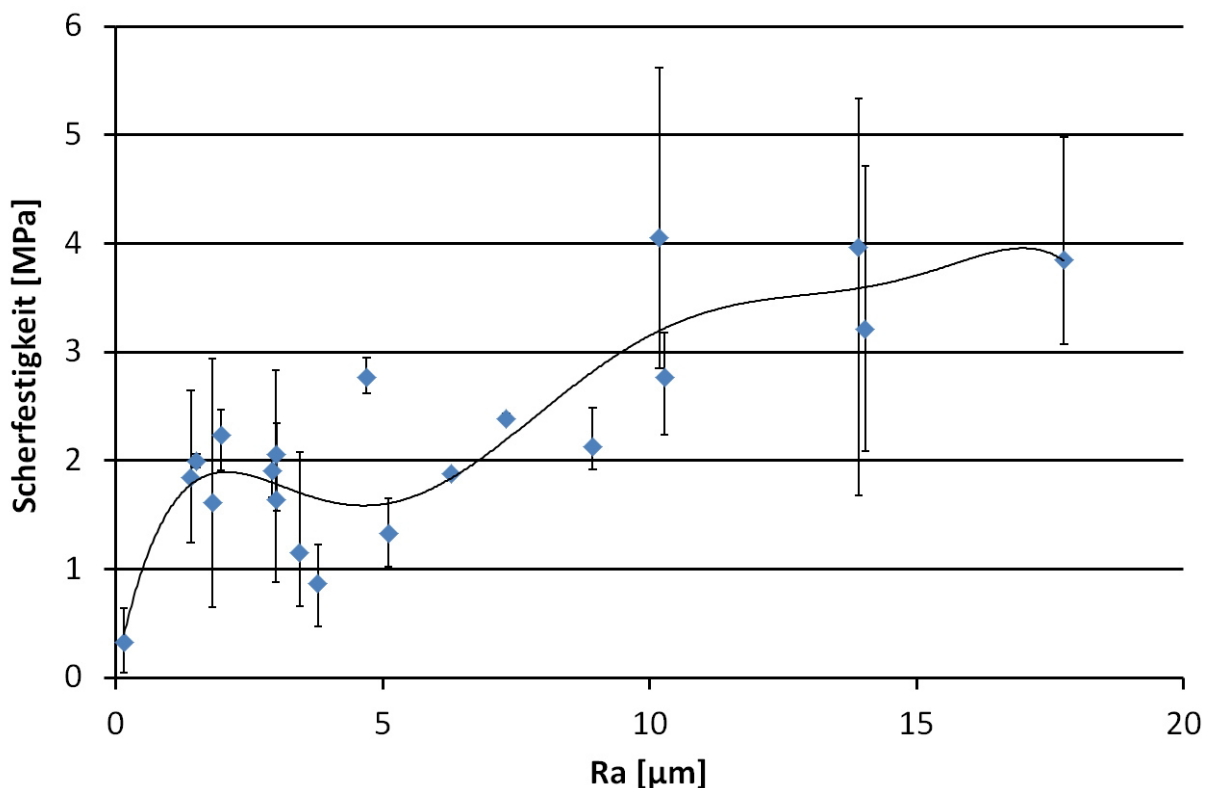


Abbildung 3.10: Experimentelle Rauheits-Scherfestigkeitskurve für IMA-Verbunde. Bei $R_a > 10 \mu\text{m}$ tritt kohäsives Versagen im Kunststoff auf. Die mit EK 60 gestrahlten Proben $R_a = 4,7 \mu\text{m}$ liegen außerhalb des angenommenen Kurvenverlaufs.

3.4.3 Diskussion

Bis zu einem R_a Wert von $\approx 2 \mu\text{m}$ ist der Verlauf der Rauheits-Festigkeitskurve für geklebte und IMA-Verbunde sowie dessen Erklärung gleich: die Festigkeit steigt infolge der Vergrößerung und Aktivierung der Oberfläche (Oberflächeneffekt) an. Die Probe versagt adhäsiv. Nach $R_a \approx 2 \mu\text{m}$ weisen die Kurven Unterschiede auf.

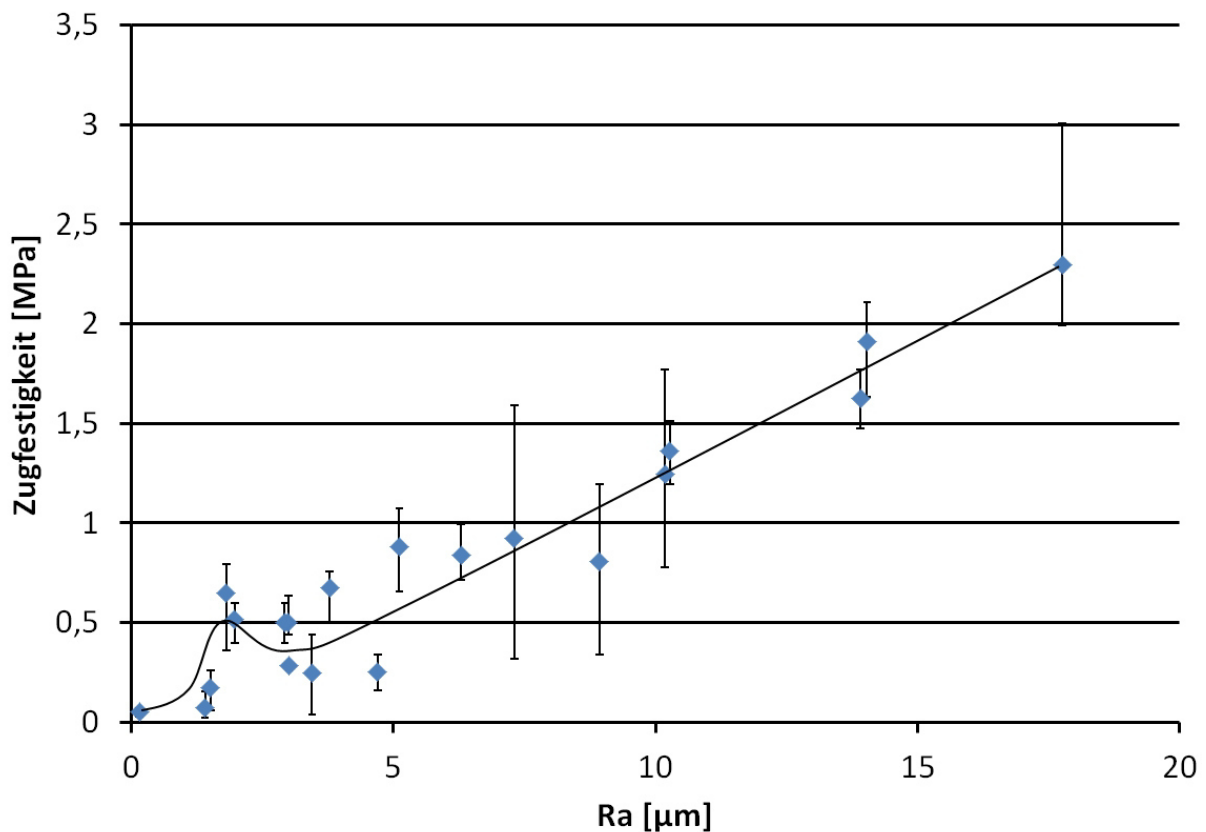


Abbildung 3.11: Experimentelle Rauheits-Zugfestigkeitskurve für IMA-Verbunde.

Geklebte Verbunde

Zwischen $R_a \approx 2 \mu\text{m}$ und $4 \mu\text{m}$ kommt es zu einer weiteren Vergrößerung des Oberflächeneffektes infolge besserer mikro-mechanischer Verankerung. Da allerdings die Kerb- und Dickeneffekte ebenfalls ausgeprägter sind und der Klebstoff nur eine geringe Festigkeit aufweist, versagen die Proben in einem Mischbruch. Daher sinkt die Verbundfestigkeit. Sie wird aber nicht (Zug) bzw. nur unwesentlich (Scherung) kleiner als die der Referenz. Nach $R_a \approx 4 \mu\text{m}$ beginnen die Proben kohäsiv im Klebstoff aufgrund des stark ausgeprägten Oberflächen- und Dickeneffektes 1 zu versagen. Die Scherfestigkeit steigt aufgrund der schädlichen Kerbeffekte, des Dickeneffektes 2 und vor allem der geringen Festigkeit des Klebstoffes nicht erneut an. Es wird kein zweites Maximum beobachtet.

Werden die absoluten Werte der Klebungen betrachtet, zeigt sich, dass die Referenzprobenkörper bei Zugbeanspruchung eine deutlich geringere Festigkeit als bei Scherbeanspruchung aufweisen. Wenn die Oberfläche gestrahlt wird, ist die Zugfestigkeit allerdings um Faktor 3-4 höher als die Scherfestigkeit. Auch in der Literatur werden vereinzelt höhere Festigkeiten bei Zugprobekörpern erzielt [67], obwohl die Zugfestigkeit von Klebungen für gewöhnlich gerin-

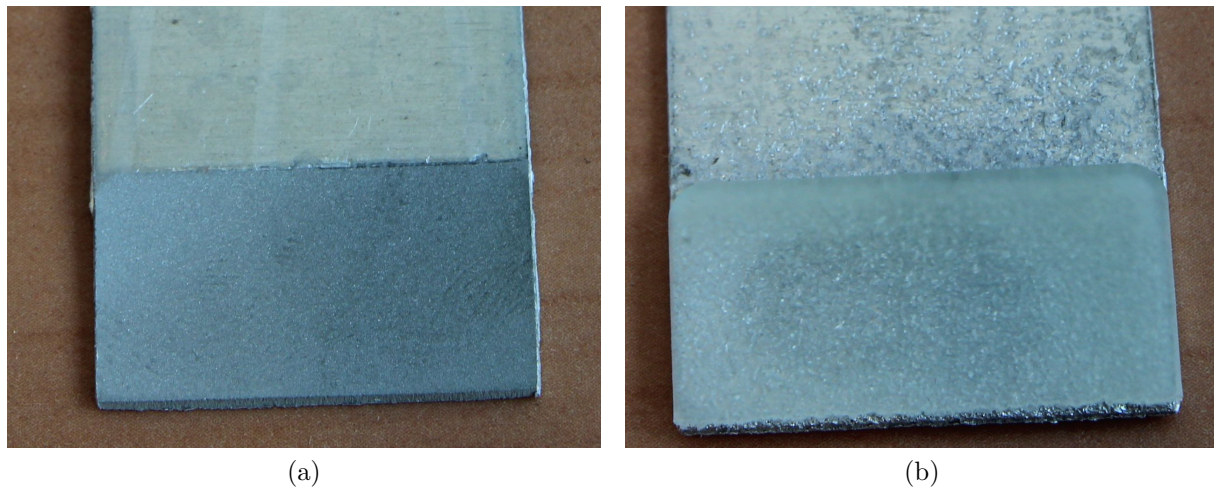


Abbildung 3.12: Bruchflächenuntersuchungen der IMA-Verbunde am Beispiel der Scherprobekörper: (a) Adhäsionsbruch (kein Kunststoff auf der Oberfläche) und (b) Kohäsionsbruch im Kunststoff (gerissener Kunststoff auf der Oberfläche). Bei den Zugprobekörpern werden nur Adhäsionsbrüche beobachtet, die Bruchfläche ist identisch mit der des Scherprobekörpers.

gere Festigkeiten als die Scherfestigkeit aufweist. Dies ist in der geringeren Ausnutzung der mikro-mechanischen Verklammerung bei Zugbeanspruchung begründet [4]. Im vorliegenden Fall ist die geringere Scherfestigkeit in der Probekörpergeometrie begründet: gemäß Rasche [91] wirkt bei Single- und Double-Lap-Joints ein aus Zug- und Scherspannung zusammengesetzter, ungünstiger Spannungszustand in der Klebschicht und in den Fügepartnern. Hierdurch wird eine Schälbelastung am Überlappungsende initiiert. Zusätzlich entstehen Spannungsspitzen in den Fügepartnern, die nicht abgebaut werden können. Diese beiden Effekte führen zu einer geringen Scherfestigkeit. Weiterhin besitzen die Scherprobekörper eine deutlich größere Fügefläche. Dies resultiert in einer fehleranfälligeren Fertigung, da über die gesamte Fügefläche ein gleichmäßiger Anpressdruck und eine gleichmäßige Klebstoffdicke gewährleistet sein muss. Abweichungen führen zu einer ungleichmäßigen Klebung und damit ebenfalls zu einer reduzierten Festigkeit [4].

IMA-Verbunde

Der Verlauf zwischen $R_a \approx 2 \mu\text{m}$ und $4 \mu\text{m}$ ist derselbe wie bei den geklebten Verbunden. Die IMA-Probekörper versagen allerdings weiterhin adhäsiv. Die Festigkeit sinkt aufgrund der Ausprägung von Dickeneffekt 2. Mit weiter ansteigender Rauheit versagen die Proben unter Scherbelastung ebenfalls infolge des ausgeprägten Oberflächeneffektes und des Dickeneffektes 1 kohäsiv im Kunststoff. Die Verbundfestigkeit steigt jedoch an, da der schädliche Kerbefeckt 2 nicht vorhanden ist und der Dickeneffekt 2 im Vergleich zu den anderen Effekten nur

einen geringen Einfluss besitzt. Insbesondere wird die Verbundfestigkeit aufgrund der höheren Festigkeit von Kunststoffen (Anhang B) im Vergleich zu Klebstoffen [4] vergrößert. Dadurch kann bei weiterer Vergrößerung des Oberflächeneffektes die Festigkeit der Fügepartner besser ausgenutzt werden. Folglich wird die Verbundfestigkeit beim Auftreten von Kohäsionsbrüchen nicht reduziert. Es ist anzumerken, dass kohäsives Versagen jedoch nicht auf die maximal mögliche Verbundfestigkeit hinweist, sondern lediglich darauf, dass die Probengeometrie oder der Versuchsaufbau versagt [91]. Durch deren Optimierung kann daher die Scherfestigkeit von IMA-Verbunden mit größerer Rauheit noch weiter verbessert werden.

Dass höhere Verbundfestigkeiten erreicht werden können, wird auch durch die Ergebnisse der Zugprobekörper gezeigt. Da unter Zugbelastung die mikro-mechanische Verankerung weniger zur Steigerung der Verbundfestigkeit beiträgt, werden geringere absolute Kräfte erzielt. So beträgt das erste Maximum der Zugfestigkeit nur 25 % und das zweite nur 50 % der Scherfestigkeit. Durch die geringeren absoluten Kräfte der Zugprobekörper wird die Zugfestigkeit des Kunststoffes nicht erreicht, wodurch folglich nur Adhäsionsbrüche auftreten. Die vorgestellten Ergebnissen zeigen, dass die Festigkeit auch bei großen Rauheiten weiter linear ansteigt und das Erreichen eines Maximums mit den untersuchten Rauheiten nicht ersichtlich ist. Eine im Vergleich zur Zugfestigkeit höhere Scherfestigkeit steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen der geklebten Verbunde. Bei diesen wurde gezeigt, dass aufgrund des ungünstigen Spannungszustandes in der Grenzfläche und den Fügepartnern die Scherfestigkeit gering ist. Die höhere Scherfestigkeit bei den IMA-Verbunden lässt sich hier durch die Verwendung von glasfaserverstärkten Kunststoffen erklären. Durch die Glasfasern wirkt sich der ungünstige Spannungszustand weniger schädlich aus [46].

Vergleich der absoluten Festigkeiten der geklebten und der IMA-Verbunde

Werden die absoluten Festigkeiten zwischen geklebten und IMA-Verbunden gegenübergestellt, zeigt sich, dass die geklebten Verbunde bei geringeren R_a -Werten (bei denen nur adhäsives Versagen auftritt) höhere Festigkeiten als die IMA-Verbunde aufweisen. Dies wird durch die signifikant geringere Viskosität von Loctite[®] 640[™] im Vergleich zur PA 66 Schmelze erklärt. Dadurch können kleinere Rauheiten besser benetzt und damit der Oberflächeneffekt besser genutzt werden.

Beim Auftreten von Kohäsionsbrüchen bei großen Rauheiten ist die Benetzbarkeit mit Klebstoff zwar besser, aber infolge der höheren Festigkeit der Kunststoffe weisen die PA 66 Probekörper nahezu dieselbe Scherfestigkeit auf. Die Zugfestigkeit geklebter Verbunde ist dagegen mehr als viermal so hoch. Diese unterschiedlich hohen Verbundfestigkeiten der geklebten und IMA-Zug- bzw. Scherprobekörper lassen sich einerseits durch die unterschiedlichen Belastbarkeiten und den entstehenden Spannungszustand in den Fügeteilen erklären [91]. Andererseits wird die

Steigerung der Festigkeit nicht nur durch die mikro-mechanische Verankerung, sondern auch durch die Mechanismen der spezifischen Adäsion erzielt. So kann bei der Verwendung des auf Metallklebungen optimierten Loctite[®] 640[™] (siehe Anhang B) eine deutliche Verbesserung der Chemisorption und damit höhere Verbundfestigkeiten im Vergleich zu einem nicht auf Metallverbindungen optimierten Kunststoff, bei dem vorrangig die mikro-mechanische Verankerung wirkt, angenommen werden. Dieser signifikante Einfluss der spezifischen Adhäsion auf die Absolutwerte der Festigkeit wird auch von eigenen Untersuchungen belegt. Hierbei wird der metallische Fügepartner nach dem Auftreten eines Adhäsionsbruches gründlich gereinigt und erneut überspritzt. Die Festigkeit der Probekörper sinkt auf ca. 30 % des ursprünglichen Wertes. Da keine erneute Strahlung durchgeführt wurde und diese die spezifische Adhäsion verbessert bzw. ermöglicht, wirkt nahezu ausschließlich die mikro-mechanische Verankerung.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei genügend hoher Festigkeit der Fügepartner mit Vergrößerung der Oberflächenrauheit eine größere Verbundfestigkeit erreicht wird. Der Anstieg ist nahezu linear. Aus den durchgeführten Untersuchungen lässt sich nur die Festigkeit des Kunststoffes als Obergrenze ableiten. Eine weitere Aufrauung konnte jedoch nicht untersucht werden, da keine gröberen Strahlmittel zur Verfügung standen. Die in Abschnitt 3.2 aufgestellten Thesen werden durch die vorliegenden Ergebnisse verifiziert.

3.5 Simulation

Aus dem Verlauf der experimentell ermittelten Rauheits-Festigkeitskurven und den auftretenden Brucharten können folgende Schlussfolgerungen für die IMA-Probekörper gezogen werden:

- Es existieren zwei verschiedene Brucharten: adhäsives und kohäsives Versagen. Je nach Größe von R_a ist nur eine Bruchart vorhanden oder es überwiegt eine der beiden.
- Der Ursprung des Probenversagens basiert auf der mikro-mechanischen Verankerung: Bei niedrigen Werten von R_a lösen sich die Fügepartner aufgrund der geringen Verklammerung bereits bei sehr geringen Kräften voneinander ab. Die Probe versagt adhäsiv. Bei hohen R_a -Werten existiert dagegen eine starke Verklammerung zwischen den Fügepartnern. Diese ist so stark ausgeprägt, dass der Kunststoff bis zu seiner Festigkeit belastet wird und kohäsiv versagt. Es ist anzumerken, dass die Festigkeit infolge der Probekörpergeometrie bereits erreicht wird, bevor die Verklammerung sich lösen und die Probe adhäsiv versagen kann.

Da die zugrunde liegenden Vorgänge experimentell nicht erfasst werden können, werden im Folgenden die experimentellen Versuche der Scherprobekörper mittels der FEM-Software ABAQUS [98] simuliert. Ziel ist es, ein Modell aufzustellen, um die aufgestellten Hypothesen weiter zu belegen. Weiterhin sollen die Versagenswahrscheinlichkeiten, erreichbare Verbundfestigkeiten und die entstehenden Brucharten vorhergesagt werden können.

3.5.1 Modellerstellung

Auswahl der Proben

Es werden acht charakteristische R_a Werte der Rauheits-Scherfestigkeitskurve simuliert, vgl. Abbildung 3.13. Die unbehandelte Probe mit der geringsten Scherkraft bei $R_a=0,15 \mu\text{m}$, das erste Maximum bei $R_a=1,81 \mu\text{m}$, das Minimum bei $R_a=3,79 \mu\text{m}$, der Ausreißer bei $R_a=4,70 \mu\text{m}$, die letzte adhäsiv versagende Probe bei $R_a=8,94 \mu\text{m}$ und die drei kohäsiv versagenden Proben mit den höchsten Scherkräften $R_a=10,18 \mu\text{m}$, $R_a=13,91 \mu\text{m}$ und $R_a=17,76 \mu\text{m}$. Tabelle 3.2 zeigt die Scherfestigkeit und Bruchart der Proben.

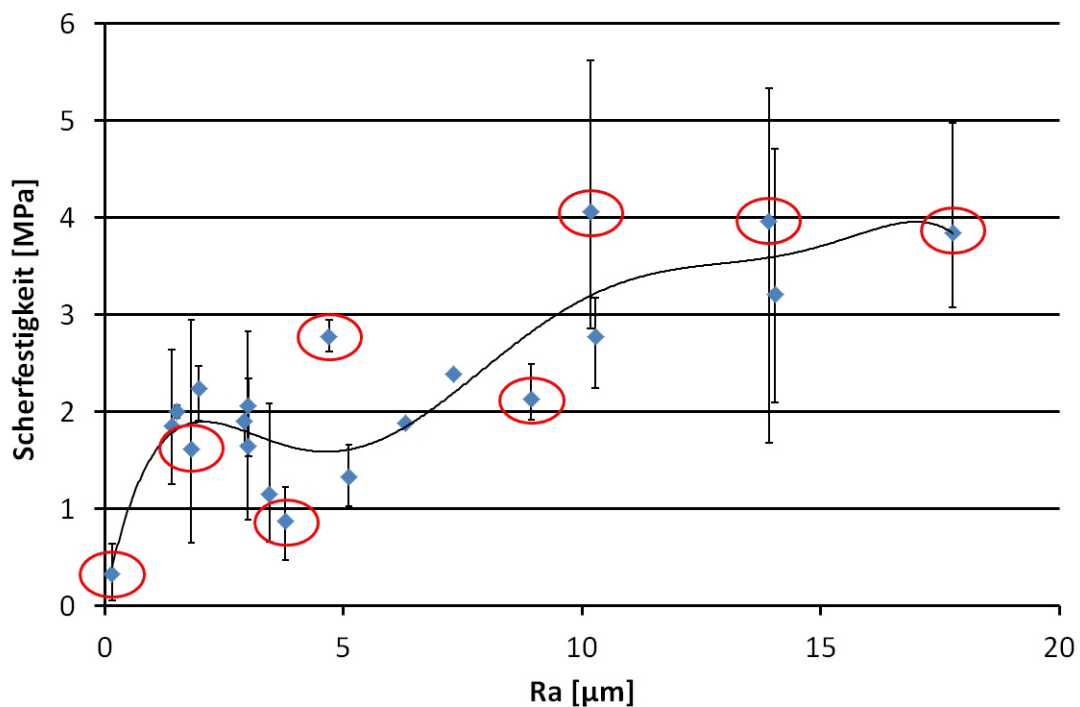


Abbildung 3.13: Simulierte Proben der Rauheits-Scherfestigkeitskurve

Aufbau und Ablauf der Simulationen

Die Zugversuche werden als ebener Verformungszustand anhand eines zweidimensionalen Querschnittes durch die Probe simuliert, vgl. Abbildung 3.14. Die Grenzfläche zwischen Metall und

R_a [μm]	Scherfestigkeit beim Versagen [MPa]	Bruchart
0,15	0,33	Adhäsionsbruch
1,81	1,61	Adhäsionsbruch
3,79	0,87	Adhäsionsbruch
4,70	2,77	Adhäsionsbruch
8,94	2,13	Adhäsionsbruch
10,18	4,06	Kohäsionsbruch
13,92	3,96	Kohäsionsbruch
17,76	3,84	Kohäsionsbruch

Tabelle 3.2: Arithmetischer Mittenrauwert R_a , Scherfestigkeit beim Versagen und Bruchart der simulierten Proben

Kunststoff wird für jeden R_a -Wert durch die gemessene Perthometer-Rauheitskurve erzeugt. Das Materialverhalten des Kunststoffes wird, basierend auf den Stoffdaten von PA 66 GF 30, elasto-plastisch beschrieben. Wie im experimentellen Aufbau wird das Aluminium eingespannt und an den Kunststoff der im Experiment ermittelte Versagensweg als Randbedingung aufgebracht.

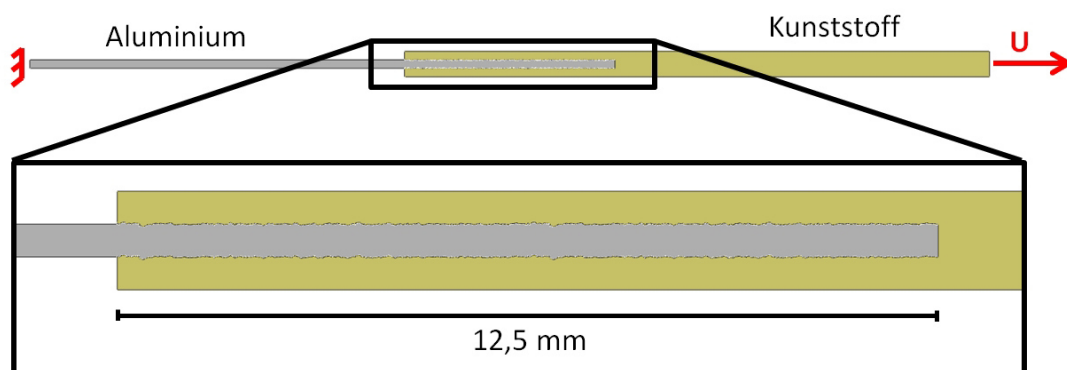


Abbildung 3.14: Schematischer Simulationsaufbau: Die Grenzfläche zwischen Kunststoff und Metall wird durch die reale Rauheit der größten Oberfläche ($R_a = 17,76 \mu\text{m}$) erzeugt. Das Metall wird eingespannt und an den Kunststoff der experimentelle Versagensweg angelegt.

Versagenskriterium

Da bei IMA-Kunststoff-Metall-Verbunden zwei Brucharten existieren, muss sowohl für adhesives als auch für kohäsives Versagen ein Versagenskriterium im Simulationsmodell berücksichtigt werden:

- Ein Adhäsionsbruch entsteht, wenn durch die Beanspruchung der Verbindung eine maximal zulässige Spannung in der Kunststoff-Metall-Grenzschicht überschritten wird. Die beiden Fügepartner lösen sich dann voneinander ab. Diese maximale Spannung kann

allerdings nicht direkt experimentell bestimmt werden. Daher wird diese aus den FEM-Simulationen indirekt ermittelt. Hierzu wird an den Proben, die im Experiment einen Adhäsionsbruch aufweisen, nach der Applikation des experimentell ermittelten Versagensweges die berechnete Spannung in der Grenzfläche ausgewertet. Diese setzt sich aus den auftretenden Normalspannungen σ_n und Tangentialspannungen σ_t zusammen. Ein Ablösen tritt ein, wenn das Verhältnis von Normal- oder Tangentialspannung zu einer vorgegebenen Maximalspannung σ_{max} einen Wert von 1 erreicht:

$$\max \left(\frac{\langle \sigma_n \rangle}{\sigma_{max}}, \frac{\sigma_t}{\sigma_{max}} \right) = 1 \quad (3.1)$$

Aus den Simulationen ergibt sich, dass adhäsives Versagen bei einer maximalen Spannung $\sigma_{max} = 100$ MPa auftritt. Diese wird daher als Versagenkriterium für einen Adhäsionsbruch in das Simulationsmodell übernommen.

- Ein Kohäsionsbruch entsteht infolge einer guten Anhaftung durch eine versagenkritische Beanspruchung des Kunststoffes. Daher werden die kohäsiv versagenden Probekörper nun unter Berücksichtigung des Versagenkriteriums für den Adhäsionsbruch simuliert. Es ist zu erkennen, dass keine kritische Beanspruchung der Grenzfläche erreicht wird und die Fügepartner weiterhin verklammert sind, vgl. Abbildung 3.15. Stattdessen wird beobachtet, dass im Gegensatz zu den adhäsiv versagenden Proben, bei geringen R_a -Werten die von-Mises-Spannung im Kunststoff ansteigt (Abbildung 3.16). Da die äußere Belastung in der Kunststoffkomponente in dem hier betrachteten Belastungsfall uniaxial ist und in Faserrichtung vorliegt, entspricht dieser Wert der Zugfestigkeit $R_m = 200$ MPa des Kunststoffes aus dem Werkstoffdatenblatt (vgl. Anhang B). Eine Spannung von 200 MPa wird daher als Versagenkriterium für einen Kohäsionsbruch in das Simulationsmodell übernommen.

Durch dieses Simulationsmodell können die Versagenswahrscheinlichkeit und die Versagensart ermittelt werden: Wird eine maximale Kontaktflächenspannung von 100 MPa überschritten, lösen sich die Fügepartner voneinander ab und es tritt adhäsives Versagen auf. Bleiben die Fügepartner dagegen verbunden und die maximale Materialbeanspruchung im Kunststoff wird größer als 200 MPa, tritt kohäsives Versagen auf.

3.5.2 Diskussion

Wird der Ort der maximalen Spannung der kohäsiv versagenden Proben betrachtet (Abbildung 3.17), wird ersichtlich, dass diese sich am Überlappungsende konzentriert. Dies ist aufgrund der Probengeometrie zu erwarten [91]. An dieser Spannungsüberhöhung werden Risse

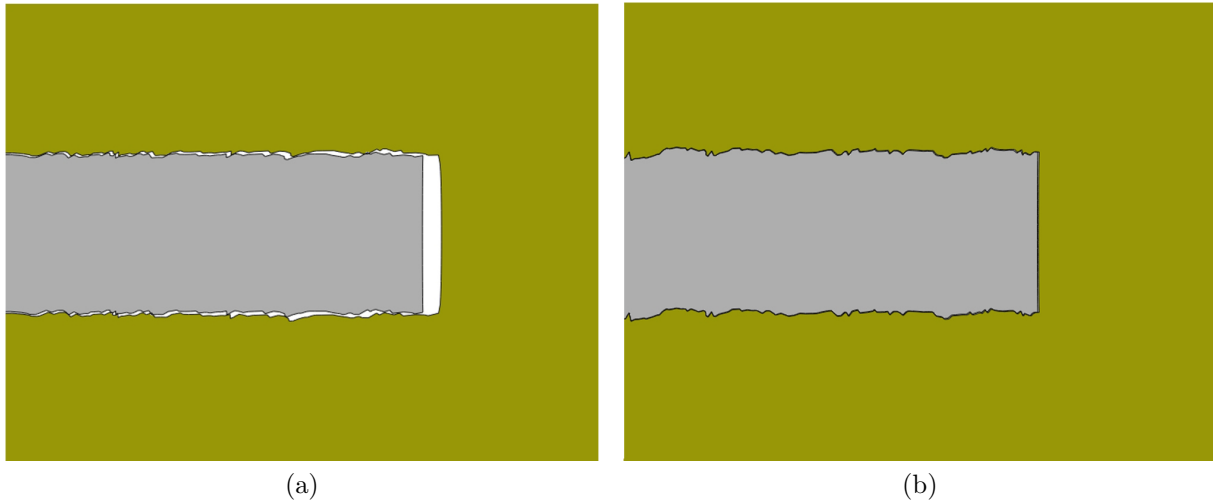


Abbildung 3.15: Vergleich der Simulationsergebnisse der (a) letzten adhäsiv versagenden Probe und (b) der ersten kohäsiv versagenden Probe: Aufgrund des Versagenskriteriums für einen Adhäsionsbruch löst sich der Kunststoff beim Adhäsionsbruch aus der Verklammerung, wohingegen er beim Kohäsionsbruch weiterhin verklammert ist. Die Deformation ist jeweils um Faktor 5 vergrößert.

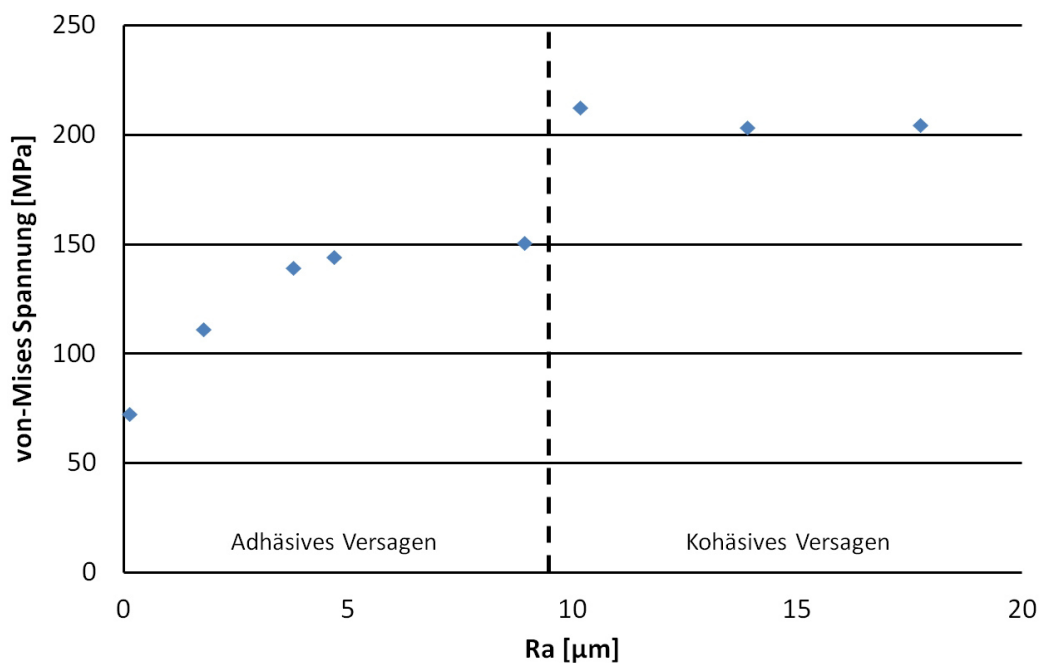


Abbildung 3.16: Auswertung der von-Mises-Spannung im Kunststoff: Diese steigt bis zur letzten adhäsiv versagenden Probe zunächst schnell, dann deutlich langsamer an. Bei der ersten kohäsiv versagenden Probe steigt die Spannung an und überschreitet die Zugfestigkeit des Kunststoffes (200 MPa).

initiiert, die sich im Kunststoff ausbreiten. Einer der Risse erreicht schließlich eine kritische Länge und führt zum kohäsiven Versagen des Kunststoffes. Dieses Bruchverhalten kann durch die Betrachtung der Bruchfläche der experimentellen Probekörper nachgewiesen werden, vgl. Abbildung 3.18.

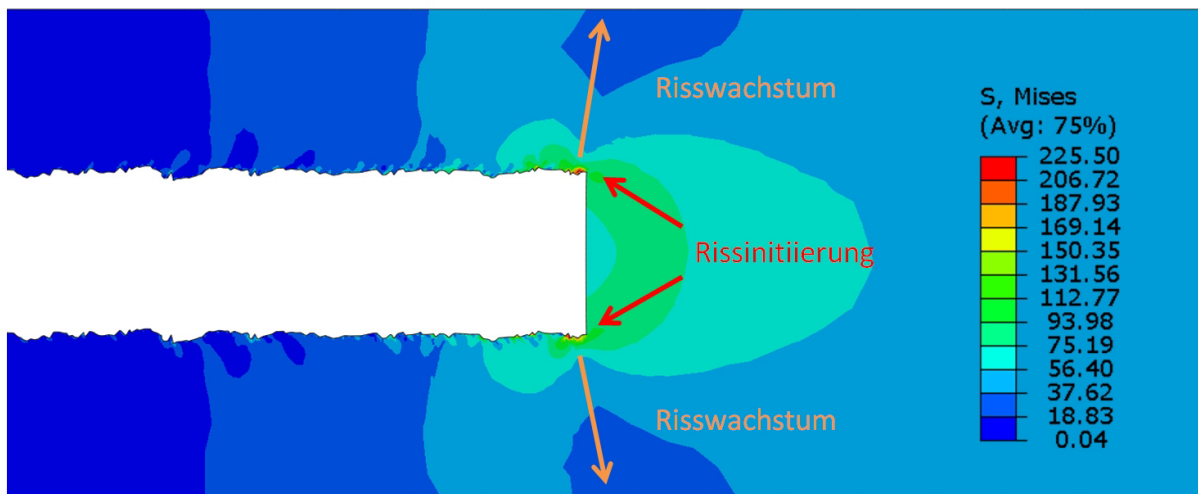


Abbildung 3.17: Darstellung des Simulationsergebnisses der ersten kohäsiv versagenden Probe (das Aluminium ist ausgeblendet): Bei allen Kohäsionsbrüchen wird am Überlappungsende die Zugfestigkeit des Kunststoffes überschritten, wodurch Risse initiiert werden. Diese breiten sich im Kunststoff aus. Einer der Risse erreicht schließlich eine kritische Länge und führt zum Kohäsionsbruch des Kunststoffes.

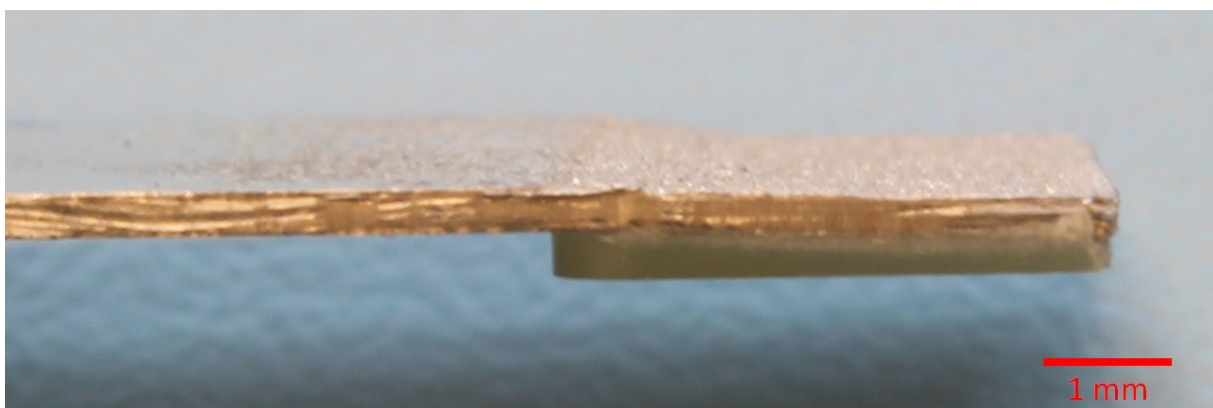


Abbildung 3.18: Kohäsionsbruch des Kunststoffes bei einem experimentellen Probekörper.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass unter Berücksichtigung des vorgestellten Simulationsmodelles, der Versagenskriterien und der Oberflächenrauheit für die hier untersuchten Kunststoff-Metall-Verbunde die folgenden Verbundeigenschaften bestimmt werden können:

- Die Versagenswahrscheinlichkeit durch Auswertung der Kontaktflächenspannung sowie der Materialbeanspruchung im Kunststoff.
- Die Bruchart, je nachdem ob ein Ablösen oder das Überschreiten der Zugfestigkeit des Kunststoffes auftritt.
- Die erwartete Festigkeit des Verbundes kann abgeschätzt werden.

3.6 Zusammenfassung

Als Fazit kann festgehalten werden, dass bei der Herstellung eines IMA-Verbundes durch die Verwendung abrasiver Strahlmittel (z. B. Edelmetall) mit geringem Aufwand feste Bauteile erzeugt werden können. Durch die Optimierung des Kraftflusses in der Kontaktfläche und der Vermeidung kohäsiver Brüche sind höhere Verbundfestigkeiten möglich. Im Gegensatz zu Klebungen werden mit rauerer Oberflächen hohe Verbundfestigkeiten erzielt, da die negativen Einflüsse bei großen Rauheiten minimiert oder nicht vorhanden sind. Dennoch weisen Klebungen derzeit infolge der höheren spezifischen Adhäsion höhere Festigkeiten auf. Es ist anzunehmen, dass auch für IMA-Verbunde eine Obergrenze der maximalen Rauheit existiert. Diese kann jedoch weder aus der Literatur noch aus den hier durchgeführten Untersuchungen bestimmt werden.

4 Analyse der Oberflächenbearbeitung auf die Mediendichtigkeit

Die Oberflächenmodifikation des Aluminiums weist einen signifikanten Einfluss auf die Verbundfestigkeit eines IMA-Verbundes auf. Dies kann insbesondere bei abrasiver Strahlung des Aluminiums und damit bei unterschiedlichen Oberflächenrauheiten beobachtet werden: Die Verbundfestigkeit wird vor allem bei Oberflächenrauheiten mit $R_a > 10 \mu\text{m}$ maximiert. Daher soll im Folgenden untersucht werden, ob die Rauheit des Aluminiums auch einen Einfluss auf die Mediendichtigkeit der Verbindung besitzt. Die Beschreibung der Oberflächenrauheit erfolgt aufgrund der Vergleichbarkeit ebenfalls durch den arithmetischen Mittenrauwert R_a .

4.1 Stand der Technik

Im Stand der Technik finden sich nur sehr wenige Quellen zur Dichtigkeit bei Klebungen, z. B. die Untersuchungen von David und Lazar [41]. Auch zur Mediendichtigkeit von IMA-Verbunden wurden nur wenig Untersuchungen durchgeführt. Fedler [3, 77] führt grundlegende Untersuchungen zur mediendichten Umspritzung von Einlegeteilen durch. Ein wesentliches Ergebnis ist, dass für die Sicherstellung einer guten Abdichtung Spalte zwischen den Fügepartnern vermieden werden müssen. In diese kann das Medium eindringen und sich infolge der Kapillarwirkung [17] durch die Anbindung drücken. Die Anbindung kann zudem infolge von Sprengkräften und Quellungen weiter beschädigt werden [99]. Ist das Entstehen von Spalten unvermeidbar, sollten diese möglichst lang sein, da dem eindringenden Medium dann ein Gegendruck durch die Leckstelle entgegenwirkt. Spalte können durch eine schlechte Bauteilgestaltung oder Prozessführung entstehen. Daher muss bei der Bauteilgestaltung unter anderem gewährleistet sein, dass der Kunststoff auf das Metall auf- und nicht abschwindet. Beim Spritzgießprozess können durch z. B. Bindenähte, Lufteinschlüsse oder Dieseeffekte ebenfalls Spalte entstehen, die das Eindringen eines Mediums begünstigen. Fedler [3, 77] empfiehlt generell die Erzeugung einer stoffschlüssigen Verbindung, da durch eine gute spezifische Adhäsion die Dichtigkeit stark verbessert wird. Aufgrund der chemischen Unverträglichkeit von Metall und Kunststoff muss diese allerdings durch Vorbehandlungen des Einlegeteils verbessert werden. Er konnte weiterhin nachweisen, dass die erreichbare Dichtigkeit neben den konstruktiven Aspekten des Bauteils

und der Prozessführung je nach Oberflächenvorbehandlung vergrößert oder verkleinert wird. Dazu wird eine Vielzahl von unterschiedlichen Werkstoffen und Vorbehandlungen kombiniert und bewertet. Ein Beispiel ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Ergebnisse erlauben allerdings keine endgültige Bewertung, da diese Einflüsse je nach Bauteilgeometrie, Applikation oder Anforderung unterschiedlich sein können und dann eine erneute Bewertung erfordern. Den Ausführungen des Autors folgend wirkt sich zum Beispiel eine Langzeitbelastung kritisch auf die Mediendichtigkeit aus und ist daher zwingend zu überprüfen.

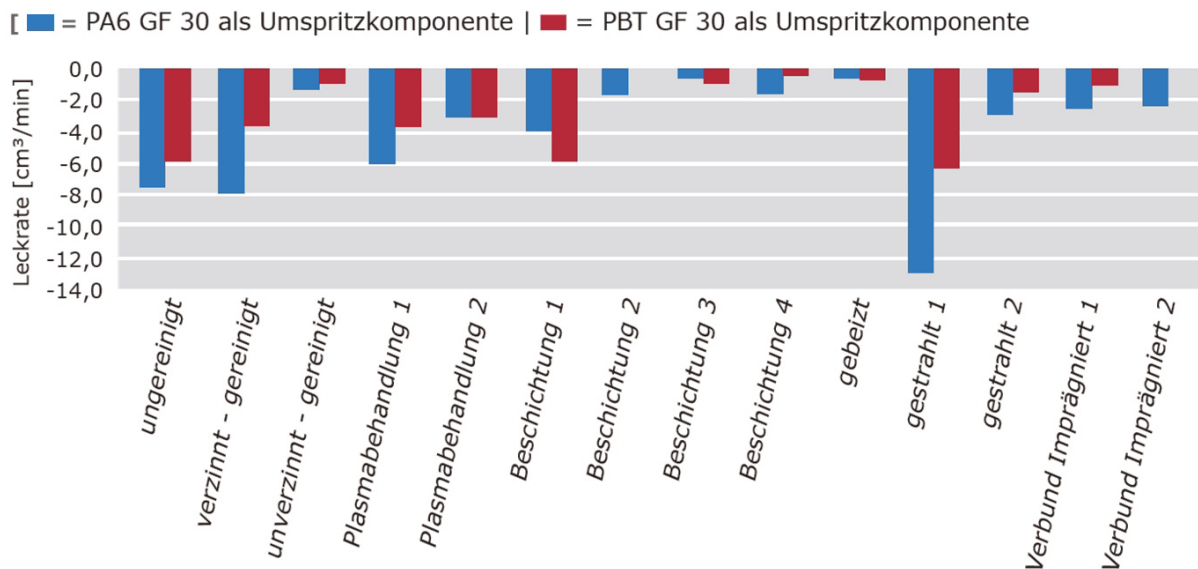


Abbildung 4.1: Erzielte Leckraten von IMA-Verbindungen bei unterschiedlichen Vorbehandlungen von CuSn6 und verschiedenen Kunststoffen nach [3].

Gemäß Zentgraf [50] kann eine hohe Haftung zwar zur Mediendichtigkeit beitragen, sie ist jedoch nicht gleichbedeutend mit einer guten Abdichtung. Er legte ebenfalls dar, dass die Mediendichtigkeit einer IMA-Verbindung durch drei Maßnahmen gesteuert werden kann: Bauteilgestaltung, Prozessführung und Einlegeteilstrukturierung. Dazu wurden Probekörper aus Kupfer und PA 6 GF 50 hergestellt. Wird bei der **Bauteilgestaltung** eine Aufschwindung des Kunststoffes auf das Einlegeteil erzielt, wird die Mediendichtigkeit begünstigt. Diese Verbesserung resultiert aus dem entstehenden Kraftschluss, der die Durchdringung mit einem Medium erschwert. Eine Verdickung der Kunststoffkomponente von 1,50 mm auf 3,00 mm im Bereich der Umspritzung zur Vergrößerung des Potentials für das Aufschwinden der Kunststoffkomponente auf das Einlegeteil wies jedoch nur eine geringe verbesserte Dichtigkeit auf. Dagegen konnte durch eine Vergrößerung der Umspritzung von 8 mm auf 16 mm die Durchdringung mit einem Medium um bis zu Faktor 10 reduziert werden. Bei der Betrachtung der **Prozessführung** wurde der Einfluss der Erwärmung der Einlegeteile vor dem Umspritzen, der Nachdruck sowie die Masse- und Werkzeugtemperatur untersucht. Während Masse- und Werkzeugtemperatur

nur einen geringen Einfluss aufweisen, verbessert ein hoher Nachdruck die Dichtigkeit. Den signifikantesten Einfluss weist jedoch die Erwärmung der Einlegeteile auf. Bei einer Erwärmung auf über 250 °C konnte die Mediendichtigkeit um bis zu Faktor 10 verbessert werden. Diese Verbesserung bildet sich allerdings nicht über die ganze Fügezone, sondern nur partiell verteilt aus. Daher kommt es trotz identischer Prozessparameter zu einer erheblichen Streuung der Ergebnisse. Die Erwärmung ist daher als kritisch zu bewerten. Schließlich kann auch über eine **Einlegeteilstrukturierung** die Dichtigkeit beeinflusst werden. So besitzen unterschiedliche Oberflächenmodifizierungen einen signifikanten Einfluss auf die Mediendichtigkeit: Zum Beispiel wird durch eine manuelle Aufrauung die Haftfestigkeit vergrößert, die Dichtigkeit jedoch verschlechtert. Es wurde gefolgert, dass mikroskopisch feine Vertiefungen die Mediendichtigkeit nicht verbessern, da die Benetzung erschwert wird und somit Zwischenräume verbleiben, durch die ein Medium dringen kann. Definierte Makrostrukturen auf der Oberfläche (Fräsnuten mit 1 mm Breite und Laserrillen mit 0,2 mm Breite), die quer zur Strömungsrichtung verlaufen führen dagegen zu sehr guten Ergebnissen und weisen eine hohe Prozesssicherheit auf. Durch die Laserstrukturierung kann die Leckrate zum Beispiel um bis zu 50 % reduziert werden. Es wird in [50] daher gefolgert, dass kleine Vertiefungen, die quer zur Strömungsrichtung verlaufen, wie Barrieren wirken, die den Durchfluss des Mediums hemmen. Die Größe und der Verlauf dieser Rillen muss jedoch genau eingestellt werden: verlaufen diese in Strömungsrichtung, kann eine Kapillarwirkung entstehen, die sich negativ auswirkt. Zu große Vertiefungen führen wie bei der händischen Aufrauung zu Zwischenräumen und damit ebenfalls zu einer Verschlechterung. Die Permeabilität von Medien bei hochfesten, laserstrukturierten Edelstahl-PPS-Verbunden wird von Byskov-Nielsen et al. [76] untersucht. Sie betonen, dass der Fluss eines Mediums entlang einer Grenzfläche in hydraulischen und diffusen Transport aufgeteilt werden kann. Hydraulischer Transport findet durch Strukturen statt, deren Dimension die Molekülgröße des Mediums deutlich überschreitet. Die Ergebnisse belegen, dass die Permeabilität entlang der Grenzfläche mehrere Größenordnungen höher als die Diffusion durch den Kunststoff ist. Weiterhin kann der hydraulische Transport sehr gut mit der Hagen-Poiseuille-Gleichung [100] beschrieben werden. Ferner wird der Einfluss unterschiedlicher Laserstrukturen auf die Permeabilität untersucht. Es werden Punkte (Durchmesser ca. 100 μm), Linien (Breite ca. 100 μm) sowie Punkte und Linien (Durchmesser und Breite je ca. 100 μm) untersucht. Die Permeabilität ist bei allen Proben unabhängig von der Art der Laserstrukturierung. Zudem bekräftigen Byskov-Nielsen et al. [76] die Signifikanz von Spalten zwischen den Fügepartnern: ein wenige Mikrometer großer Spalt ist bereits ausreichend, damit ein Medium durch die Anbindung strömen kann.

4.2 Zielsetzung

Die vorgestellten Ergebnisse zum Stand der Technik zeigen, dass die Mediendichtigkeit einer IMA-Verbindung durch drei Maßnahmen optimiert werden kann:

1. Die konstruktive Gestaltung des Bauteils
2. Die Prozessparameter des Spritzgussprozesses
3. Die Oberflächenvorbehandlung des Einlegeteils

Die Auswirkungen der Bauteilgestaltung im Hinblick auf das Schwindungsverhalten und damit deren Einfluss auf die Mediendichtigkeit werden bereits von Heinle et al. [101] detailliert vorgestellt. Bei den Prozessparametern dagegen existiert keine differenzierte Analyse.

Das Potential der Oberflächenvorbehandlung des Einlegeteils wird beispielsweise mittels einer manuellen Aufrauung der Oberfläche durch Schleifpapier [50] oder eine undefinierte Standstrahlung [3] betrachtet. Die manuelle Aufrauung verbessert nur minimal die mechanische Adhäsion und im Gegensatz zur Standstrahlung nicht die spezifische Adhäsion. Aus den vorgestellten Ergebnissen wird jedoch ersichtlich, dass die spezifische Adhäsion ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die Dichtigkeit aufweist. Bei der Verwendung einer Sandstrahlung wird in [3] keine Angabe gemacht, unter welchen Bedingungen oder mit welchem Strahlmittel die Einlegeteile bearbeitet wurden. Da infolge der Vielzahl an verwendbaren Strahlmitteln entweder sehr dichte oder sehr undichte Proben entstehen, können aus [3] keine weiteren Erkenntnisse gezogen werden. Zudem zeigen die Ergebnisse aus Kapitel 3, dass der Einfluss der Standstrahlung auf die Festigkeit erst durch die Untersuchung eines weiten Rauheitsbereiches erkannt werden kann. Das Potential einer Laserbearbeitung zur Verbesserung der Abdichtung wird dagegen zwar erkannt [76], allerdings werden mögliche Strukturen nur in engen Grenzen und damit unvollständig analysiert.

Aus dem Stand der Technik kann daher derzeit nur unvollständig abgeleitet werden, wie sich eine Oberflächenvorbehandlung des Einlegeteils auf die Mediendichtigkeit auswirkt. Im Folgenden wird daher der Einfluss verschiedener Oberflächenrauheiten auf die Mediendichtigkeit eines IMA-Verbundes weitergehend untersucht. Weiterhin wird das Potential einer Laserstrukturierung analysiert, indem verschiedene Geometrien von Punkt- und Linienstrukturen überprüft und die optimalen Geometrien bestimmt werden.

Die bisherigen Erkenntnisse zum Einfluss der Oberflächenrauheit des Einlegeteils auf die Qualität einer IMA-Verbindung sowohl aus der Literatur als auch aus den hier vorgestellten Ergebnissen lassen vermuten, dass diese einen signifikanten Einfluss auf die Mediendichtigkeit des Verbundes besitzt. Eine undichte Verbindung entsteht durch Spalte zwischen den Fügepartnern. Durch diese Spalte wird der Kapillareffekt begünstigt und die Dichtigkeit sinkt. Da diese

Spalte aus ungefüllten Oberflächenstrukturen auf der Metalloberfläche entstehen und bei feinen Rauheiten kleinere Oberflächenstrukturen als bei groben Rauheiten entstehen, wird daher die These aufgestellt dass eine Rauheits-Dichtigkeitskurve existiert. Ziel ist es, diese zu bestimmen und mit den Ergebnissen der Rauheits-Festigkeitskurve zu vergleichen. Ferner wird bei der Untersuchung der Laserstrukturierung erwartet, dass zur Erzeugung der Mediendichtigkeit eine minimale bzw. maximale Größe der Punkt- und Linienstrukturen nicht unter- bzw. überschritten werden darf. Andernfalls entsteht auch eine zu kleine oder zu große Oberflächenstruktur, die nicht mehr optimal mit Kunststoff gefüllt werden kann.

4.3 Aufbau und Durchführung experimenteller Untersuchungen

Zur Überprüfung der aufgestellten These werden IMA-Dichtprobekörper bei unterschiedlichen Rauheiten hergestellt und geprüft. Da zur Überprüfung der Mediendichtigkeit einer IMA-Verbindung keine Norm existiert, muss zunächst ein Probekörper entwickelt werden. Aus den Versuchen wird durch sukzessives Erhöhen der Oberflächenrauheit eine Rauheits-Dichtigkeitskurve entwickelt und kritisch bewertet. Weiterhin werden punkt- und linienförmige Laserstrukturen in unterschiedlichen Dimensionen hergestellt. Zur Beschreibung von deren Einfluss werden zuerst die Grenzen für sinnvolle Dimensionen aus der Literatur abgeleitet. In diesen Grenzen werden dann mithilfe der statistischen Versuchsplanung Proben hergestellt und ausgewertet.

4.3.1 Probekörpergestaltung

Der Probekörper wird so entwickelt, dass Dichtigkeits- und Festigkeitsprüfungen möglich sind. Dadurch wird die Vergleichbarkeit der Auswirkungen von Einflussgrößen (Oberflächenrauheit, Spritzgussparameter etc.) auf die beiden Zielgrößen ermöglicht. Diese kombinierte Prüfung der Mediendichtigkeit und Festigkeit wird in Kapitel 5 vorgestellt. Der Probekörper besteht aus einem elliptischen Aluminiumrohr mit 0,25 mm Wanddicke. Dieses erfährt eine Aufweitung wie in Unterabschnitt 4.3.2 dargestellt. An das aufgeweitete Rohr wird der Kunststoff angespritzt. Wie in Abbildung 4.2 ersichtlich formt dieser eine Anbindung um das Rohr und einen daran angeschlossenen Flansch. Durch diesen Flansch wird die Fixierung des Probekörpers auf einem Prüfadapter zur Dichtigkeits- oder Festigkeitsprüfung ermöglicht. Der Probekörper und insbesondere dessen Radien werden simulativ so optimiert, dass auch bei einer hohen mechanischen Beanspruchung die Fügefläche nur eine geringe Verformung erfährt und die Dichtigkeit somit durchgehend gewährleistet wird. Auch der Probekörper selbst wird so gestaltet, dass er bei einer Druckbelastung im Inneren von über 2 bar keine wesentliche Volumenänderung erfährt.

Dies ist Grundlage für die Differenzdruckprüfung, vgl. Unterabschnitt 4.3.4. Da mit dem Probekörper auch ein Einsatz der IMA-Verbindung als Wärmetauscher überprüft werden soll, wird dieser gegenüber einer Temperaturbelastung von -40 °C bis 130 °C optimiert. Die technische Zeichnung des Probekörpers ist in Anhang A abgelegt.

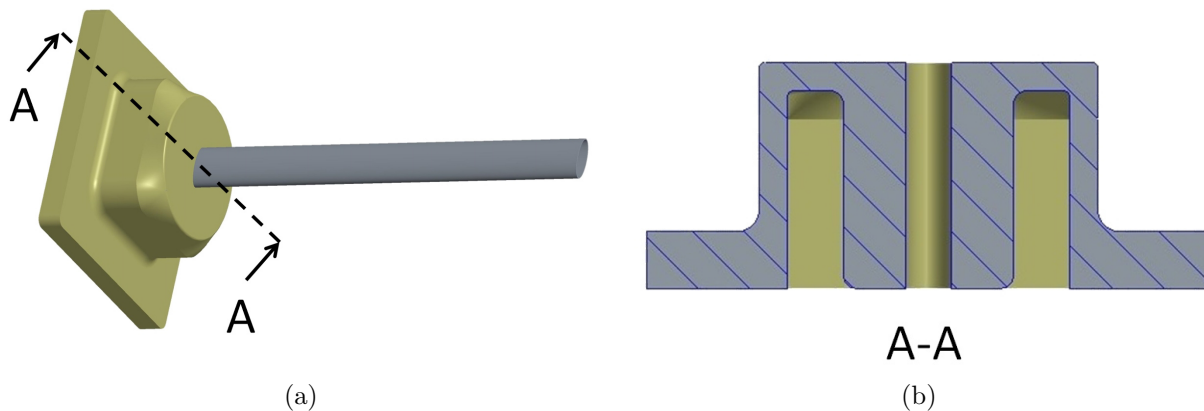


Abbildung 4.2: CAD Modell des Probekörpers: (a) Probekörper mit angebrachtem Aluminiumrohr, (b) Schnitt durch die kurze Ellipsen-Halbachse des Kunststoffes

Mit dem Probekörper werden nur die Auswirkungen der Oberflächenvorbehandlung bestimmt. Da das Rohr auf der Außenseite vorbehandelt wird, ist daher sicherzustellen, dass der Kunststoff nur auf der Rohraußenseite angespritzt wird. Dazu wird während des Spritzgießprozesses ein Kern in das Rohr eingeschoben. Wie Abbildung 4.3 zeigt, wird durch diesen das Einfließen von Kunststoff in das Rohr verhindert. Um zudem eine messbare Auswirkung der Oberflächenbehandlungen bestimmen zu können, ist es erforderlich, eine genügend große Grenzfläche zwischen Aluminium und Kunststoff zu erzeugen. Daher wird das Rohr zunächst auf einer Länge von 20 mm umspritzt. Damit auch der Effekt einer möglichen Labyrinthdichtung bewertet werden kann, wird die umspritzte Rohrlänge in einem späteren Schritt minimiert (vgl. Abschnitt 5.5).

4.3.2 Aufweitung und Oberflächenstrukturierung des Aluminiumrohres zur Verbesserung der Adhäsion

Der Kern, der verhindert dass während des Spritzgussprozesses Schmelze in das Rohr hineinfließt, wird gleichzeitig zur Aufweitung des Aluminiumrohres genutzt. Diese Aufweitung dient insbesondere zur Vergrößerung der Rohroberfläche und damit der Maximierung der Adhäsion. Hierdurch wird die Bestimmung der Auswirkung der Oberflächenbehandlung erleichtert. Die Bestimmung der Geometrie der Aufweitung erfolgt durch die Kombination von experi-

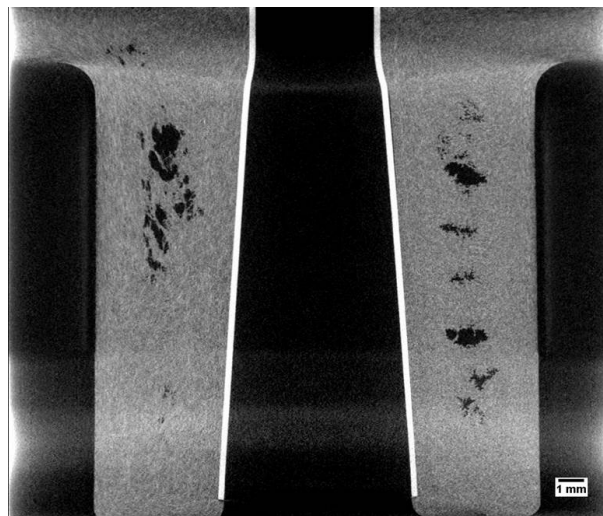


Abbildung 4.3: CT (Computertomographie) des Dichtprobekörpers. Es ist zu erkennen, dass das Rohr (weiß) nur auf der Rohraußenseite umspritzt wird.

mentellen und simulativen Methoden: Zunächst wird die maximal zulässige plastische Dehnung des Aluminiumrohres bestimmt. Mit diesem Grenzwert kann dann im Rahmen der statistischen Versuchsplanung die optimale Aufweitung bestimmt werden.

Experiment und Modellerstellung

Zur Ermittlung der maximal zulässigen plastischen Dehnung des Aluminiumrohres wird das Rohr zuerst experimentell durch einen Kern mit definierter Geometrie aufgeweitet und der Weg bis zum Beginn einer Rissinitiierung gemessen. Anschließend wird ein Simulationsmodell auf Basis des experimentellen Aufbaus erstellt und der Kern mit dem ermittelten Weg beansprucht. Das Aluminium wird mit Hilfe des Spannungs-Dehnungs-Diagrammes des Werkstoffes elasto-plastisch beschrieben, vgl. Anhang B. Wie Abbildung 4.4 zeigt, korrelieren Experiment und Simulation. Dadurch kann in der Simulation die maximal zulässige plastische Dehnung bestimmt werden, die bei einem Belastungsweg auftritt, bei welchem im Experiment das Rohr versagt. Diese wird als Grenzwert in den folgenden Simulationen verwendet. Der Grenzwert wird mit einer weiteren experimentellen und simulativen Kontur verifiziert. Weiterhin kann gezeigt werden, dass nach dem Entfernen des Kerns die erzeugte Kontur lediglich um ca. 8 % der insgesamt erfolgten Geometrieänderung zurückfedert.

Ermittlung der optimalen Aufweitung

Zur Bestimmung der optimalen Aufweitung des Aluminiumrohres wird diese mit einer Konturierung kombiniert. Mithilfe des ermittelten Grenzwertes der plastischen Dehnung müssen zunächst Grenzwerte ermittelt werden, vgl. Abbildung 4.5 und Tabelle 4.1. In diesen Grenzen

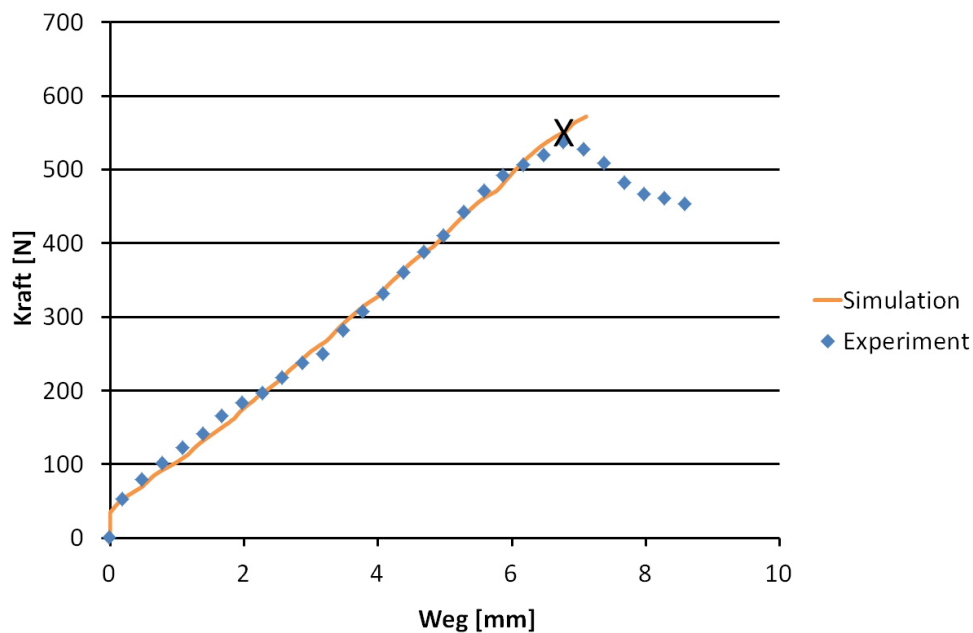
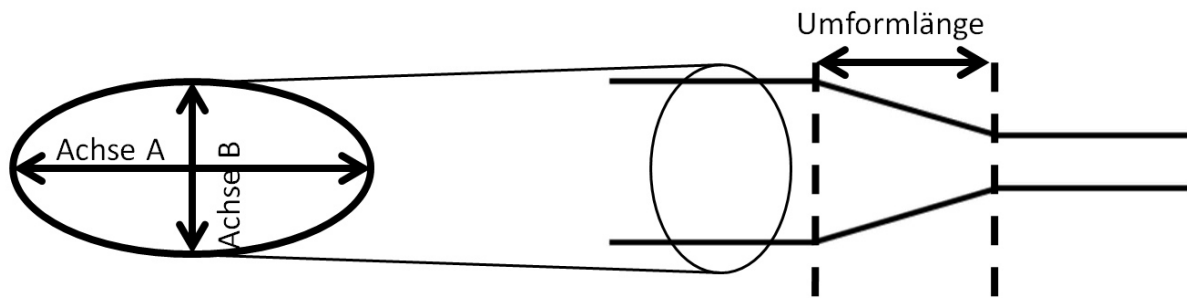
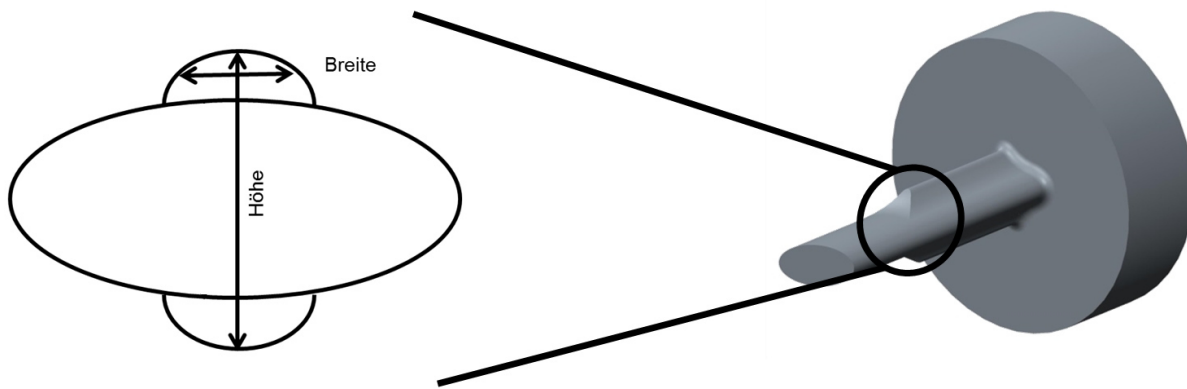


Abbildung 4.4: Vergleich zwischen Experiment und Simulation beim Aufweiten des Aluminiumrohres. Die beiden Kurven stimmen überein. Das X zeigt das Versagen des Aluminiumrohres und damit dessen maximal zulässige Aufweitung an.

können dann zunächst separat Simulationen unter Berücksichtigung der statistischen Versuchsplanung durchgeführt werden. Die entsprechenden Versuchspläne sind in Anhang C hinterlegt. Anschließend werden die optimalen Geometrien der Aufweitung und Konturierung kombiniert. In den Simulationen wird das Rohr in einen Ausschnitt des Kunststoffprobekörpers eingebettet. Das Aluminium wird, wie oben dargestellt, modelliert, die Beschreibung des Kunststoffes erfolgt elasto-plastisch anhand der Spannungs-Dehnungs-Kurve des Datenblattes in Anhang B. Da aufgrund des Einsatzes als Wärmetauscher eine Temperaturbelastung entsteht und diese im vorliegenden Fall kritischer als eine mechanische Belastung ist, werden beide Komponenten mit einem Temperaturanstieg von -40 °C bis 130 °C belastet. Es wird der Betrag der plastischen Dehnung im Aluminiumrohr und die von-Mises-Spannung im Kunststoff ausgewertet. Da die Fertigung und Auswertung der Aufweitung und Konturierung im Rahmen der statistischen Versuchsplanung erfolgt, wird eine Beschreibungsfunktion für jeden untersuchten Parameter ermittelt. Zu deren Erstellung wird nicht nur der Einfluss eines Parameters auf die Zielgröße berücksichtigt, sondern auch die Wechselwirkungen der Parameter untereinander. Infolgedessen kann durch die Beschreibungsfunktion das Ergebnis jeder beliebigen Kombinationen von Parametereinstellungen innerhalb der festgelegten Grenzen ermittelt und eine optimale Einstellung berechnet werden. Abbildung 4.6 zeigt die Beschreibungsfunktionen für die Aufweitung und Konturierung des Aluminiums. Erstere weist quadratische Effekte, letztere lineare



(a)



(b)

Abbildung 4.5: Darstellung der Parameter für die Aufweitung und Konturierung des Aluminiumrohres: (a) Aufweitung und (b) Konturierung

	Aufweitung			Konturierung	
	Achse A [mm]	Achse B [mm]	Aufweitlänge [mm]	Höhe [mm]	Breite [mm]
Untergrenze	9,7	4,2	3	5	1
Obergrenze	15	8	25	10	5

Tabelle 4.1: Grenzwerte für die Aufweitung und Konturierung der Aluminiumrohre. Diese ergeben sich aus den Abmaßen der verwendeten Rohre bzw. den simulativ ermittelten maximal möglichen Geometrien.

Effekte auf. Die Analyse der optimalen Parameter zeigt, dass Achse A unverändert bleibt und Achse B sich Achse A annähert. Daraus resultiert eine Verrundung des elliptischen Rohres und damit eine homogenere Spannungsverteilung, vgl. Abbildung 4.7. Weiterhin wird eine mittlere Umformlänge bevorzugt, da eine kurze Umformlänge eine steile, aber kurze Aufweitung erzeugt. Eine große Umformlänge dagegen führt zu einer flachen, aber langen Aufweitung. Ferner ist es von Vorteil, eine gleichmäßige, statt eine punktuellen Konturierung zu verwenden.

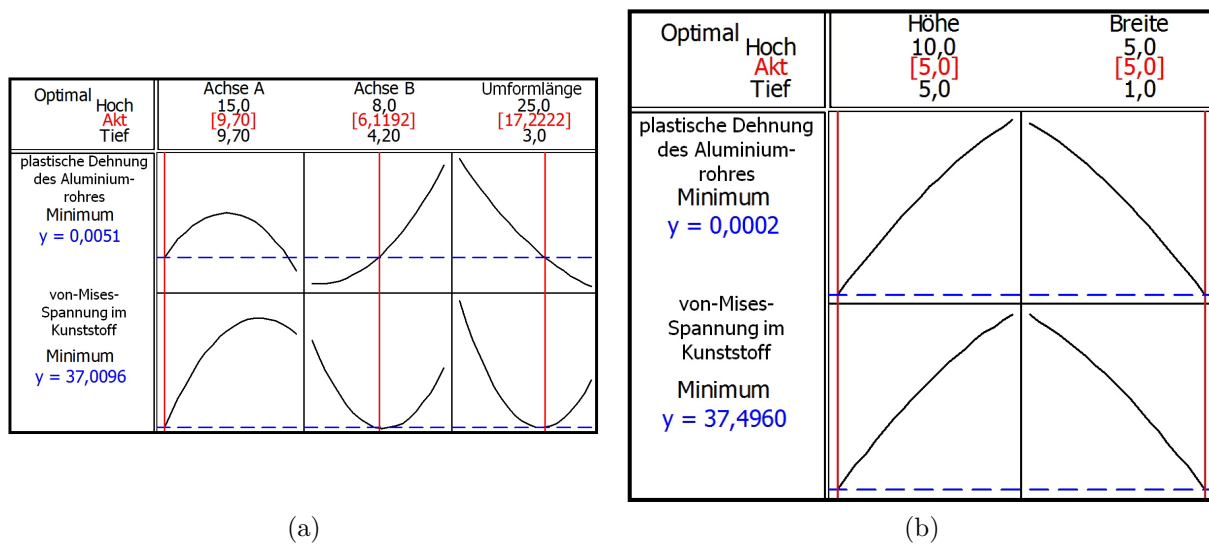


Abbildung 4.6: Ergebnis der statistischen Versuchsplanung für die Aufweitung und Konturierung. Das Diagramm zeigt den Verlauf der Beschreibungsfunktionen und die optimale Einstellung für das gesamte untersuchte Feld. Die schwarzen Zahlen geben die maximalen und minimalen Einstellungen an, die roten die optimalen Einstellungen und die blauen den prognostizierten Wert der Zielgröße.

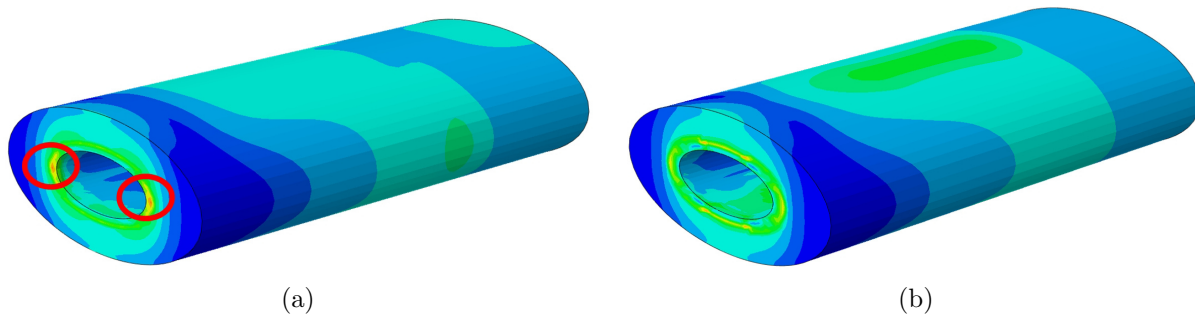


Abbildung 4.7: Vergleich der Spannungsverteilung im Kunststoff bei einer Aufweitung der Achsen (normiert auf 40 MPa, das Aluminiumrohr ist ausgeblendet): (a) Spannungskonzentration bei einer Vergrößerung von Achse A, (b) homogene Spannungsverteilung bei einer Vergrößerung von Achse B.

Daher wird als Optimum eine niedrige Höhe und eine große Breite errechnet. Die optimalen Parameter der Aufweitung und Konturierung werden nun zur Erzeugung der optimalen Geometrie kombiniert. Es ergibt sich eine Veränderung des Rohres, wie in Abbildung 4.8 dargestellt. Hierdurch resultiert eine Vergrößerung der Rohroberfläche um ca. 17 %.

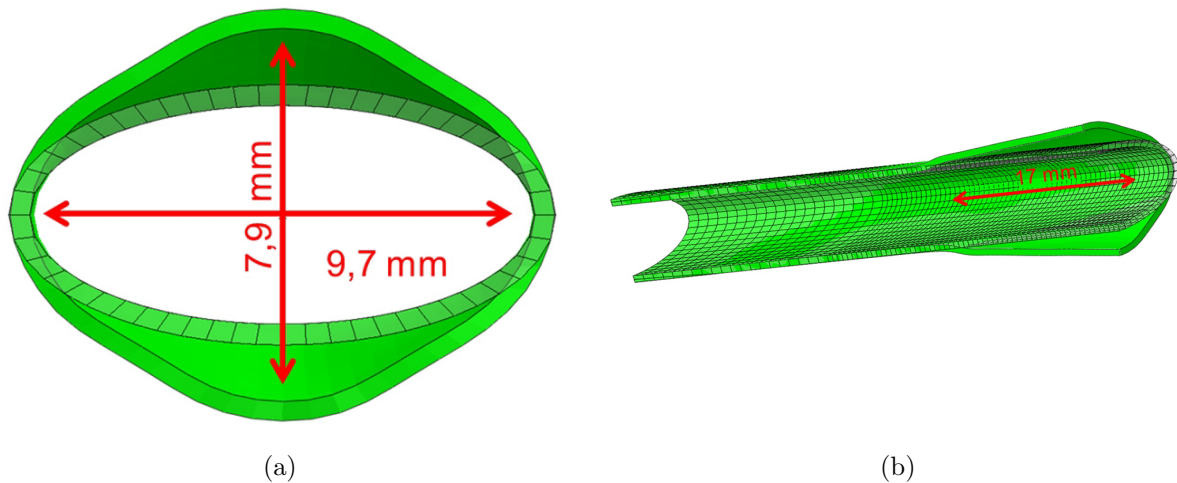


Abbildung 4.8: Geometrieänderung des Aluminiumrohres nach der optimalen Aufweitung: (a) Frontalansicht und (b) im Querschnitt (grau: vor der Aufweitung, grün: nach der Aufweitung).

Dickenänderung des Rohres

Da die Rohre im Ausgangszustand nur eine geringe Wandstärke ($250\ \mu\text{m}$) besitzen, besteht durch die Aufweitung das Risiko der Wanddickenverringering des Rohres. Dickenmessungen des Rohres vor und nach der Aufweitung zeigen allerdings, dass die Wanddicke nicht messbar verringert wird [102]. Die Vermessung des Querschliffes ist in Abbildung 4.9 dargestellt, der Längsschliff ist äquivalent.

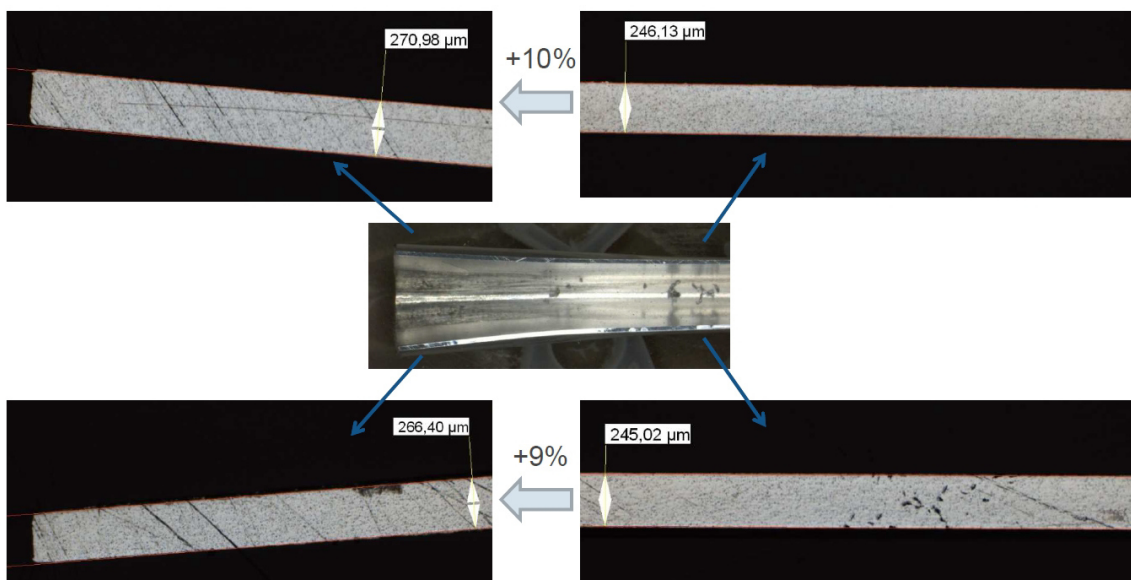


Abbildung 4.9: Dickenänderung des Aluminiumrohres infolge der Aufweitung [102].

4.3.3 Herstellung der Probekörper

Abrasive Oberflächenbearbeitung

Die Herstellung der Probekörper mittels abrasiver Oberflächenbearbeitung erfolgt identisch zu denen der Festigkeitsprüfung, vgl. Unterabschnitt 3.3.3. Um die Vergleichbarkeit zwischen Festigkeits- und Dichtigkeitsprüfung zu gewährleisten, werden dieselben Werkstoffe wie bei den Festigkeitsprüfungen verwendet: das Aluminiumrohr besteht aus EN-AW 3103 und als Kunststoff wird PA 66 GF 30 (DuPont™ Zytel®70G30HSLR NC010) verwendet. Aufgrund der Ergebnisse der Vorversuche (siehe Unterabschnitt 2.3.3) wird auch hier keine zusätzliche Erwärmung der Rohre vor dem Umspritzen durchgeführt.

Die optimalen Spritzgussparameter variieren je nach Probengeometrie, verwendetem Material, Applikation etc. und sind daher bauteil- und anwendungsspezifisch zu ermitteln. Da der vorgestellte Probekörper auch als Probekörper für die kombinierte Optimierung der Festigkeit und Mediendichtigkeit Verwendung findet, wird die Analyse der Prozessparameter detailliert in Abschnitt 5.3 vorgestellt.

Laserstrukturen

Die Applikation von punkt- und linienförmigen Laserstrukturen auf der Oberfläche der Aluminiumrohre wird bei der Firma GFH auf einer GL.evo Lasermikrobearbeitungsmaschine mit einem TruMicro 5050 Laser durchgeführt [103]. Die Spritzgussparameter entsprechen denen der abrasiven Probekörper.

Da es Ziel ist, möglichst unterschiedliche Dimensionen der Strukturen zu überprüfen, werden zunächst die Grenzen für eine Laserbehandlung aus der Literatur abgeleitet. In diesen Grenzen wird ein Probenplan basierend auf der statistischen Versuchsplanung aufgestellt [104]. Die Auswertung liefert eine quadratische Beschreibungsfunktion für den gesamten zu untersuchenden Bereich. Die in dieser Arbeit untersuchten Strukturen werden, basierend auf den Ergebnissen von [48, 50, 68, 76, 105] in ihrem Durchmesser (5 - 200 μm), ihrer Tiefe (5 - 100 μm) und ihrem Abstand zueinander (7,5 - 600 μm) variiert, vgl. Abbildung 4.10. Bei den Punktstrukturen wird zudem der Abstand in x- und y-Richtung unabhängig voneinander überprüft. Es wird keine Winkelabhängigkeit α untersucht, d. h. alle Linien verlaufen parallel zur Strömungsrichtung. So wird sichergestellt, dass das Risiko einer Kapillarwirkung minimiert wird.

Aufgrund der fertigungstechnischen Besonderheiten ist zu beachten, dass der Durchmesser der Strukturen mindestens so groß wie ihre Tiefe sein muss [103]. Damit zudem keine Überlappungen entstehen, muss der Abstand zwischen den Strukturen mindestens 1,5 mal dem des Durchmessers entsprechen. Im Versuchsplan werden daher die Parameter auf die Tiefe normiert, die Werte zwischen 5 μm und 100 μm annimmt. Der jeweilige Durchmesser entspricht

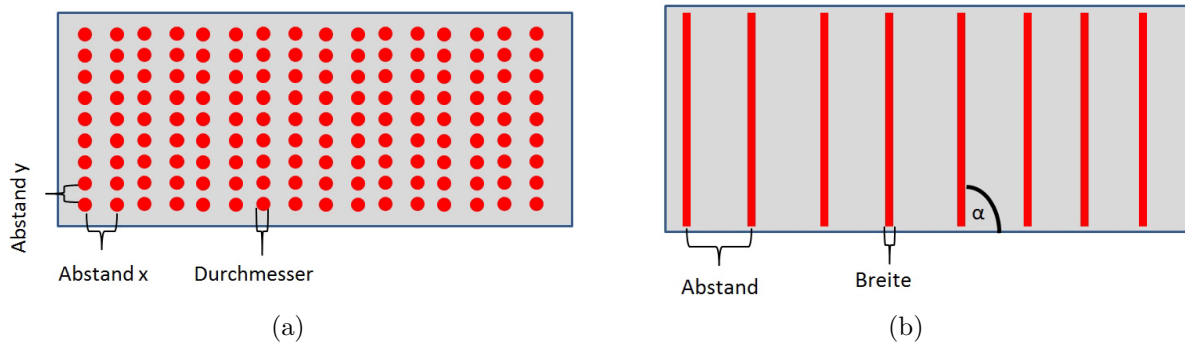


Abbildung 4.10: Parameter der Laserstrukturen für (a) Punkte und (b) Linien

1 - 2 mal dem Wert der Tiefe und der Abstand 1,5 - 3 mal dem Wert des Durchmessers. Die vollständigen Versuchspläne sind in Anhang C hinterlegt.

4.3.4 Durchführung der Dichtigkeitsprüfung

Als Maß für die Dichtigkeit einer Verbindung wird die Strömungsrate eines Fluids in ein Bauteil oder aus einem Bauteil angegeben [106]. Dieser Massendurchflussstrom wird als Leckrate oder Leakage bezeichnet und in $\text{Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, $\text{mbar} \cdot \text{l}/\text{s}$ oder cm^3/min angegeben. Die Dichtigkeitsprüfung erfolgt im vorliegenden Fall nach dem Prinzip der Druckdifferenzprüfung mit Luft [107]. Bei dieser wird der Druckabfall einer Referenzkammer zum Prüfvolumen ermittelt. Dadurch ist das System unabhängig von der Druckluftversorgung. Nach einer definierten Messzeit wird der Druckabfall zwischen Referenzvolumen und Prüfkammer als absoluter Messwert ausgegeben. Wenn das freie Innenvolumen des Bauteils und der Umgebungsdruck bekannt sind, kann dieser in eine Leckrate umgerechnet werden. Bei der Differenzdruckprüfung mit gasförmigen Prüfmedien ist es ausreichend, zur Charakterisierung der Dichtigkeit auch nur die Änderung des Druckes mit der Zeit unter festgelegten Bedingungen anzugeben [106]. Da zudem im vorliegenden Fall das Innenvolumen des Prüfkörpers und die Messzeit durchgehend konstant sind, wird im Folgenden zur Vereinfachung lediglich der Druckabfall in Pa als Vergleichsgröße ausgewertet. Um diese in einen Volumenstrom in cm^3/min umzurechnen, muss der Quotient der gemessenen Druckdifferenz mit dem Faktor 350 gebildet werden.

Jede Probe wird mit einem Messgerät des Herstellers Innomatec (Auflösung: 1 Pa) nach folgendem Vorgehen geprüft: Das Prüfteil wird für 5 Sekunden mit 2 bar Druck beaufschlagt, anschließend erfolgt eine 20-sekündige Stabilisationsphase und danach wird der Prüfling dann von der Druckversorgung getrennt. In den folgenden 15 Sekunden wird der absolute Druckabfall gemessen und ausgegeben. Da Temperaturänderungen in einem abgeschlossenen Volumen gleichzeitig zu Druckänderungen führen, wird während der Prüfung die Raumtemperatur über-

wacht. Zusätzlich wird nach jeweils zehn Versuchen eine Referenzmessung durchgeführt, welche einen möglichst gleichbleibenden Druckabfall aufweisen sollte. Die Standardabweichung dieser Prüfmethode konnte durch Vorversuche auf 15 Pa bestimmt werden.

Es ist zu beachten, dass kein absolut dichtes Bauteil existiert. „Dicht“ bedeutet daher lediglich, dass der gemessene Wert kleiner als eine zulässige Grenzleckage ist [108]. Bei den hier untersuchten Probekörpern wird bei einem Prüfdruck von 2 bar eine Grenzleckage von 1400 Pa ($4 \text{ cm}^3/\text{min}$) angenommen. Diese Leckage entspricht z. B. einem Wärmetauscher in der Automobilindustrie [109], der als wasserdicht gilt und an der Grenze zur Öldichtigkeit liegt [110].

4.4 Ergebnisse und Diskussion

4.4.1 Abrasive Oberflächenbearbeitung

In Abbildung 4.11 sind die Ergebnisse der abrasiv vorbehandelten Probekörper dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die unbehandelte Referenz mit der geringsten Rauheit eine mäßige Dichtigkeit aufweist. Die Proben mit den geringsten erzeugten Oberflächenrauheiten weisen dagegen die besten Dichtigkeiten auf. Der Druckabfall beträgt bei diesen nur ca. 25 % der Referenz. Mit steigender Oberflächenrauheit vergrößert sich der Druckabfall nahezu linear. Ab einer Rauheit zwischen $9 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ ist der Druckabfall ähnlich hoch wie bei der Referenz. Die Probekörper mit den größten Rauheiten weisen die schlechteste Mediendichtigkeit auf. Bei diesen ist der Druckabfall fast doppelt so groß wie bei der Referenz. Alle Probekörper weisen dennoch unabhängig von der durchgeführten Standstrahlung eine sehr gute Dichtigkeit im Bezug auf die Grenzleckage von 1400 Pa auf. Der Druckabfall beträgt selbst bei den undichtesten Probekörpern weniger als 15 % der angenommenen Dichtigkeitsgrenze. Dies ist in der im Vorfeld durchgeführten, zielorientierten Konstruktion (Unterabschnitt 4.3.1) und Prozessparameteroptimierung (Abschnitt 5.3) der Probekörper im Hinblick auf die Mediendichtigkeit begründet.

Die Referenz weist infolge der sehr geringen Adhäsion einen ca. viermal höheren Druckabfall als die besten Probekörper mit Oberflächenbehandlung auf. Dass der Druckabfall der Referenz im Bezug auf die Grenzleckage dennoch sehr gering ist, begründet sich ebenfalls in der durchgeführten Optimierung der Konstruktion sowie der Prozessparameter.

Der Zusammenhang zwischen ansteigendem Druckabfall und ansteigender Oberflächenrauheit wird durch die Oberflächentopographie erklärt: Durch das Sandstrahlen werden Strukturen wie z. B. Täler oder Riefen auf der Oberfläche erzeugt [111]. Diese müssen vom Kunststoff vollständig ausgefüllt werden, da ansonsten Spalte zwischen den Fügepartnern entstehen, durch

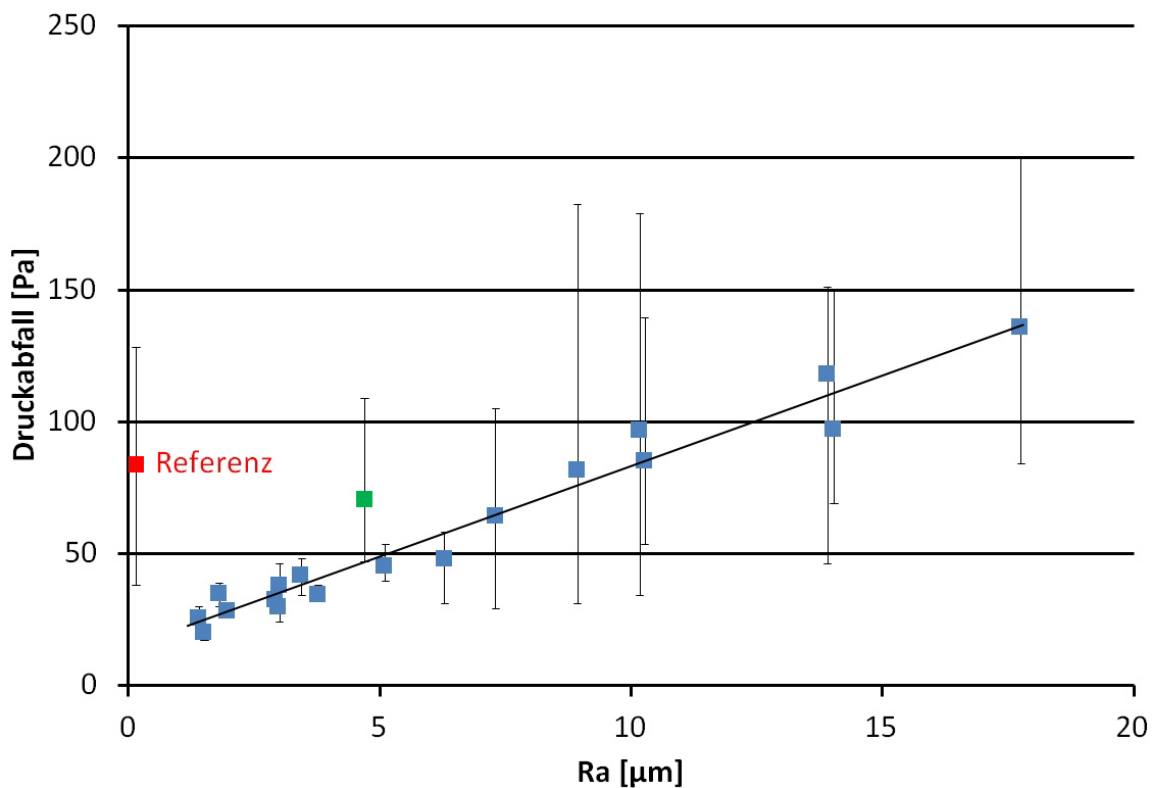


Abbildung 4.11: Experimentelle Rauheits-Druckabfallkurve. Ab $R_a > 6 \mu\text{m}$ steigt die Standardabweichung der Probekörper stark an. Die Referenz (rot) und die mit EK 60 gestrahlten Proben $R_a = 4,7 \mu\text{m}$ (grün) liegen außerhalb des angenommenen linearen Einflusses.

die ein Medium infolge des Kapillareffektes entweicht [3, 77]. Bei größeren Rauheiten wird es zunehmend schwieriger, diese Strukturen vollständig mit Kunststoff zu füllen. Dies ist darin begründet, dass beim Umspritzen größerer Rauheiten der Fließweg der Schmelze bis zur vollständigen Ausfüllung solcher Strukturen vergrößert ist. Mit längerem Fließweg wird die Viskosität der Schmelze infolge des Abkühlens zunehmend größer und der Schmelzedruck zunehmend geringer [29]. Wie Abbildung 4.12 zeigt, kann durch die Zunahme der Viskosität und Abnahme des Schmelzedruckes die Schmelze nicht mehr vollständig in eine solche Struktur gedrückt werden und erstarrt daher bevor sie die Struktur vollständig ausfüllt [48]. Infolgedessen, entsteht ein ansteigender, negativer Einfluss der Rauheit auf die Mediendichtigkeit. Dieser ist jedoch linear und damit als moderat zu bewerten. Es wird vermutet, dass Labyrinthdichtungen [112] infolge der unorientierten und zufälligen Ausprägung der Spalte entstehen. Diese können den schädlichen Effekt der Spalte zwar nicht verhindern, aber dem Kapillareffekt des eindringenden Mediums entgegenwirken.

Der signifikante Einfluss der Spalte wird überdies ersichtlich, wenn die gestrahlten Probekörper mit denen der unstrukturierten Referenz verglichen werden. Ab einer Oberflächenrauheit zwi-

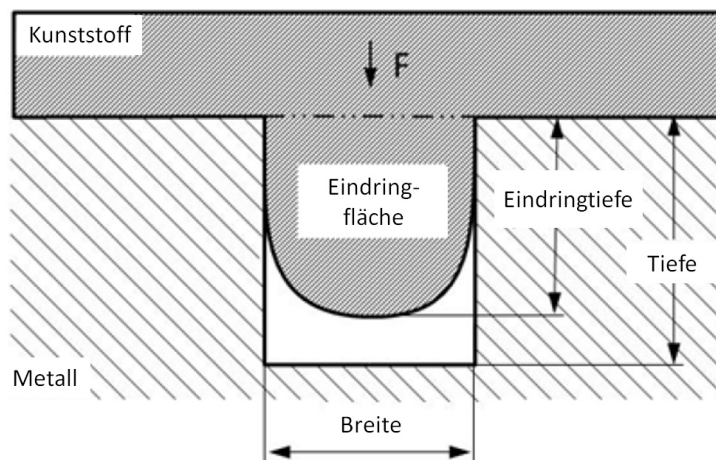


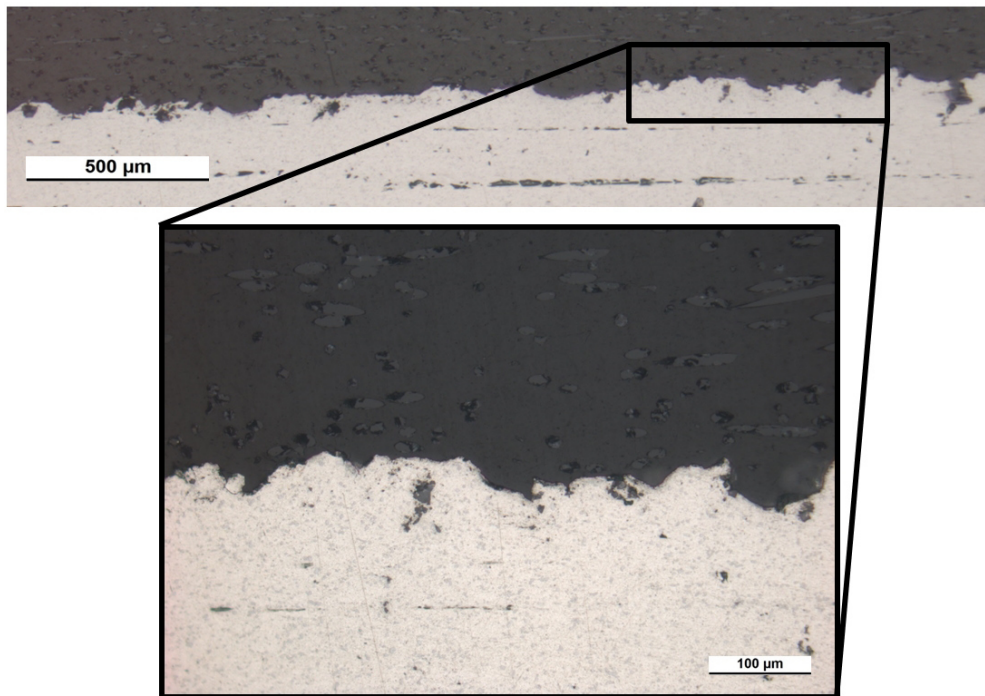
Abbildung 4.12: Schematische Darstellung einer ungefüllten Struktur einer IMA-Verbindung nach [97]. Insbesondere bei groben Rauheiten steigt das Risiko, dass Strukturen auf der Oberfläche nicht mehr vollständig vom Kunststoff ausgefüllt werden können. Durch die entstehenden Spalte entweicht ein Medium.

schen $9 \mu\text{m}$ und $10 \mu\text{m}$ werden die Spalte so groß, dass die Referenz trotz geringerer Adhäsion eine höhere Dichtigkeit aufweist.

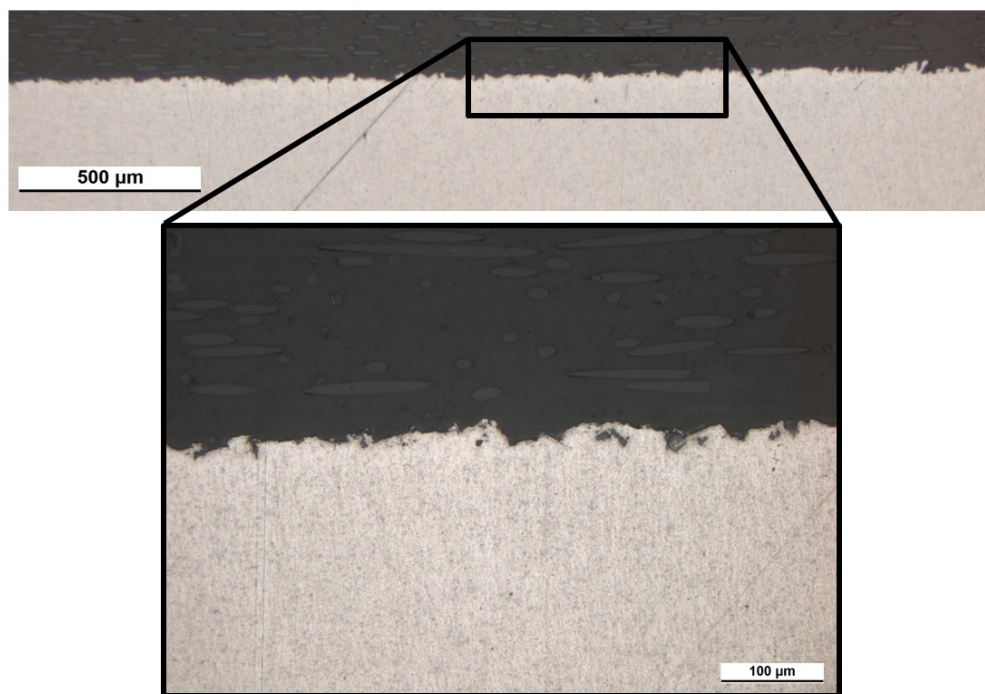
Um diesen Einfluss der Oberflächentopographie nachzuweisen, werden Schlitze der Probekörper angefertigt. Wie Abbildung 4.13 beispielhaft zeigt, können jedoch keine Spalte beobachtet werden. Dies ist darin begründet, dass in einem Schliff nur ein Querschnitt des gesamten Probekörpers dargestellt werden kann. Da die Spalte jedoch an beliebigen Stellen der Fügefläche existieren, können diese mit Schlitzen allein nicht sicher bestimmt werden.

Um die vollständige Fügefläche zu betrachten, werden daher CT-Untersuchungen des Probekörpers durchgeführt. Die Ergebnisse lassen allerdings ebenfalls keine Spalte erkennen. Dies ist in der zu geringen Auflösung des verwendeten CT begründet, da dieser nur Spalte ab einer Größe von ca. $50 \mu\text{m}$ erkennen lässt. Die ungefähr vorliegende Spaltgröße kann aus den Ergebnissen von Quirin [113] abgeleitet werden: Basierend auf der Beschreibung des hydraulischen Transports durch die Hagen-Poiseuille-Gleichung [76], errechnete er für die Grenzleckage von $4 \text{ cm}^3/\text{min}$ bei den vorliegenden Prüfbedingungen einen Spalt von $70 \mu\text{m}$ Höhe und $200 \mu\text{m}$ Breite. Wird dieser Spalt auf den maximal gemessenen Druckabfall (200 bar , bzw. $0,25 \text{ cm}^3/\text{min}$) umgerechnet, zeigt sich, dass die Spaltgröße der undichtesten Proben ungefähr an der Grenze der Auflösung liegt. Daher können bei allen untersuchten Proben auch mit dieser Methode keine Spalte erkannt werden. Der aufgezeigte Einfluss der Oberflächentopographie kann daher mit den verwendeten Methoden nicht endgültig bewiesen werden. Daher sind weiterführende Untersuchungen, z. B. mit Weißlicht-Interferometrie [114] erforderlich.

Die Ergebnisse der Rauheits-Dichtigkeitskurve zeigen weiterhin, dass die mit EK 60 gestrahlten



(a)



(b)

Abbildung 4.13: Querschliff der Dichtprobekörper: (a) grobe Rauheit (R_a ca. 10 μm) und (b) feine Rauheit (R_a ca. 3 μm). Es sind keine Spalte zwischen Aluminium und Kunststoff zu erkennen.

Proben bei $R_a \approx 4,7 \mu\text{m}$ wie bei den Untersuchungen zur Festigkeit außerhalb des angenommenen Kurvenverlaufs liegen. Die Vermutung eines prozesstechnischen Ursprungs wird damit bestätigt.

Es ist zudem ersichtlich, dass die Standardabweichung der Probekörper sowohl bei der Referenz, dem Ausreißer und bei den Probekörpern mit einer größeren Oberflächenrauheit (ab $\approx 7 \mu\text{m}$) sehr hoch ist. Sie kann bis zu Faktor 2 des Mittelwertes betragen. Die Ursache liegt bei den gestrahlten Proben in den verwendeten Strahlmitteln: bei größeren Strahlmitteln weisen auch die hierdurch erzeugten Rauheiten größere Standardabweichungen auf, vgl. Unterabschnitt 3.4.1. Die Oberflächenrauheit der Referenz weist ebenfalls eine große Standardabweichung auf. Durch die unterschiedlich ausgeprägten Rauheiten entstehen Probekörper mit größeren oder kleineren Spalten. Der gemessene Druckabfall liegt daher in einem großen Bereich.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Oberflächenrauheit einen signifikanten Einfluss auf die Mediendichtigkeit einer Verbindung besitzt. Mit zunehmender Oberflächenrauheit nimmt zwar die Adhäsion und Festigkeit zu, die Mediendichtigkeit verringert sich jedoch nahezu linear. Ab einer Rauheit von ca. $9-10 \mu\text{m}$ ist eine Aufrauung zudem nicht mehr zielführend, da die Umspritzung einer unbehandelten Oberfläche dann bessere Ergebnisse erzielt. Dieser Einfluss wird durch die Entstehung ungefüllter Oberflächenstrukturen erklärt. Durch die entstehenden Spalte entweicht ein Medium infolge des Kapillareffektes. Diese Spalte sind jedoch mit den verwendeten Methoden nicht detektierbar. Es kann weiterhin vermutet werden, dass bei den untersuchten Probekörpern Labyrinthdichtungen entstehen. Diese wirken dem Kapillareffekt entgegen. Mit feinen Strahlmitteln kann hingegen eine sehr gute Dichtigkeit erzielt werden. Der Ursprung des von Zentgraf [50] bisher vermuteten schädlichen Einflusses einer Aufrauung ist daher in der Prozesstechnik (z. B. falsches Strahlmittel oder Aufräutechnik) zu finden.

4.4.2 Laserstrukturierung

Punkte

Da die Fertigung und Auswertung der Laserstrukturen im Rahmen der statistischen Versuchsplanung erfolgt, kann durch Ermittlung von Beschreibungsfunktionen das Ergebnis jeder beliebigen Kombinationen von Parametereinstellungen innerhalb der festgelegten Grenzen und damit auch eine optimale Einstellung berechnet werden. Die Beschreibungsfunktionen und optimalen Einstellungen für die punktförmige Laserstrukturierung sind in Abbildung 4.14 dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass alle Parameter einen nahezu linearen Einfluss auf den Druckabfall aufweisen. Aufgrund der Normierung können die Dimensionen der Punktstrukturen nur durch den

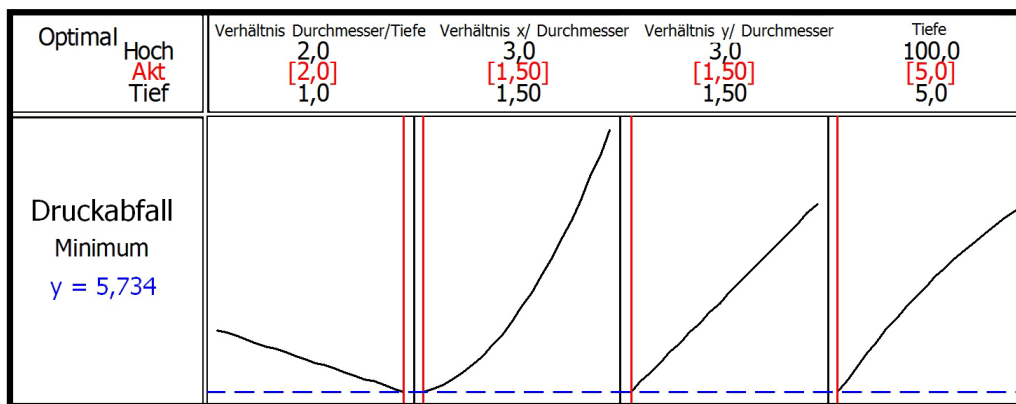


Abbildung 4.14: Ergebnis der statistischen Versuchsplanung für die punktförmigen Laserstrukturen. Das Diagramm zeigt den Verlauf der Beschreibungsfunktionen und die optimale Einstellung der Parameter in den festgelegten Grenzen. Die schwarzen Zahlen geben die maximalen und minimalen Einstellungen an, die roten die optimalen Einstellungen und die blauen den prognostizierten Wert der Zielgröße.

Bezug der Parameter auf die Tiefe berechnet werden. Es ergeben sich folgende optimale Einstellungen: Tiefe: 5 μm , Durchmesser: 10 μm , Abstand x: 15 μm , Abstand y: 15 μm . Der durch die statistische Versuchsplanung prognostizierte Druckabfall bei diesen optimalen Parametern liegt bei 5,7 Pa. Die Herstellung und Überprüfung der optimalen Parameter resultiert jedoch in einem Druckabfall von 29 Pa. Dieser Druckabfall weicht von dem prognostizierten Wert um ca. Faktor 5 ab. Die Diskrepanz zwischen den beiden Werten liegt zum einen an der Standardabweichung der Prüfmethode, welche zu einer Abweichung von bis zu 15 Pa führt, zum anderen ist sie in den Schwankungen bei der Herstellung selbst begründet: Viskosität der Schmelze, Temperatur, Drücke etc. bleiben nicht immer vollständig konstant. Zudem liegt eine Annäherung an die theoretisch mögliche Dichtigkeit „Null“ vor. Infolgedessen entstehen hohe prozentuale Abweichungen [97], die absoluten Abweichungen sind im Verhältnis zur Grenzleckage jedoch sehr gering.

Aufgrund der Normierung sind die Beschreibungsfunktionen miteinander verknüpft. Daher ist es zielführender, statt des Verlaufs der Beschreibungsfunktionen, den absoluten Wert der optimalen Parameter detailliert zu betrachten. Dies erleichtert auch den Vergleich der Ergebnisse mit dem Stand der Technik. Dazu wird wie bei der abrasiven Oberflächenbearbeitung die Oberflächentopographie betrachtet:

- Durchmesser und Tiefe:

Als Optimum erweist sich der nahezu kleinste Durchmesser von 10 μm und eine minimale Tiefe von 5 μm . Es wird vermutet, dass bei noch kleineren Durchmessern der positive Effekt der Laserstrukturierung abnimmt und die bei der Punktstrukturierung

entstehenden Löcher nicht mehr vollständig mit der hoch viskosen Schmelze gefüllt werden können. Durch die entstehenden Spalte kann ein Medium infolge des Kapillareffektes entweichen. Der Wert der Tiefe entspricht den Ausführungen von Ramani und Moriarty [48]. Weiterhin ergibt sich dieser fertigungstechnisch direkt aus dem Durchmesser: Wenn die Tiefe größer als der Durchmesser gewählt wird, kann die Probe nicht mehr hergestellt werden. Wird sie gleich oder etwas kleiner als der Durchmesser gewählt, wird die vollständige Füllung mit Kunststoff begünstigt. Nehmen der Durchmesser und die Tiefe dagegen größere Werte als die optimalen Einstellungen an, entstehen ebenfalls Spalte zwischen Kunststoff und Metall. Zur Überprüfung dieser Annahme wird eine mit Glasperlen bestrahlte Oberfläche betrachtet. Wie Abbildung 4.15 zeigt, weist diese eine zwar ungeordnete, aber dennoch ähnliche Oberflächentopographie wie die Laserstrukturierung auf. Im Schliff sind ungefüllte Spalte zwischen Kunststoff und Metall zu erkennen. Die Spalte können bei den Laserstrukturen gemäß den Ausführungen von Byskov-Nielsen et al. [68] bei großen Tiefen durch eine veränderte Oberflächenspannung des Metalls sowie einen im Loch entstehenden Gegendruck vergrößert werden.

- Abstand:

Die Löcher der optimalen Probe besitzen einen geringen, gleichmäßigen Abstand zueinander ($15 \mu\text{m}$ in x- und y-Richtung). Ein kleinerer Abstand liegt unter dem geforderten Verhältnis „Abstand $> 1,5 \cdot$ Durchmesser“ und führt zur Überlappung der Löcher. Wie Abbildung 4.16 zeigt, besteht auch bereits bei diesem Verhältnis das Risiko der Überlagerung. Dadurch entstehen zum einen größere Durchmesser die wie bereits erwähnt einen negativen Einfluss auf die Dichtigkeit besitzen, zum anderen werden insbesondere durch Verringerung des Abstandes in x-Richtung „Kanäle“ in Strömungsrichtung erzeugt. Durch diese wird der Kapillareffekt stark begünstigt [50]. Wird der Abstand in x- und/oder y-Richtung allerdings größer als der optimale Wert gewählt, reduziert sich der positive Effekt der Laserstrukturierung sehr stark. Dieser negative Einfluss von zu großen Abständen bei einer punktuellen Laserstruktur wurde bereits gezeigt [68], allerdings nur für Festigkeiten. Auch im Bezug auf die Mediendichtigkeit muss der Abstand zwischen den einzelnen Löchern daher genau eingestellt werden.

Linien

In Abbildung 4.17 sind die Ergebnisse der linienförmigen Laserstrukturen dargestellt. Im Gegensatz zur Punktstruktur besitzen die Parameter einen quadratischen Einfluss auf den Druckabfall. Auch hier können aufgrund der Normierung die Dimensionen der Strukturen nur durch den Bezug auf die Tiefe berechnet werden. Als optimale Parameter werden eine Tiefe von

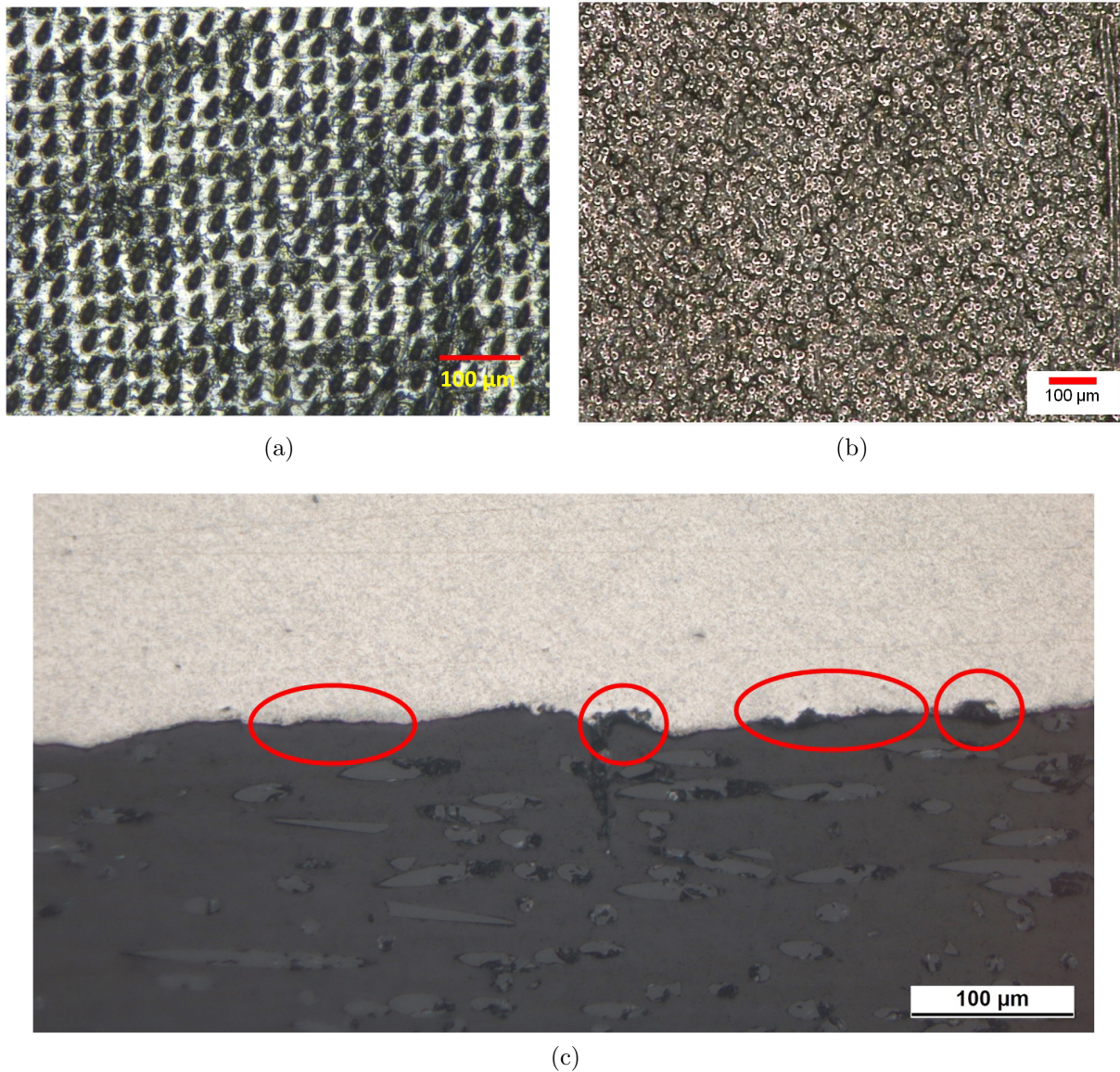


Abbildung 4.15: Oberflächentopographische Aufnahmen von Lochstrukturen: (a) Durch Laserbehandlung erzeugte Löcher mit einem Durchmesser von $20 \mu\text{m}$, (b) durch Standstrahlung mit Glasperlen erzeugte Löcher mit einem Durchmesser von ca. $15 - 20 \mu\text{m}$. Außer der Anordnung der Löcher gleichen sich die Oberflächen. Diese Proben sind undicht, im Schliff der mit Glasperlen gestrahlten Proben (c) sind ungefüllte Spalte zwischen Kunststoff und Metall zu erkennen (rote Kreise).

$100 \mu\text{m}$, ein Durchmesser (Linienbreite) von ebenfalls $100 \mu\text{m}$ und ein Abstand von $209 \mu\text{m}$ berechnet. Der Druckabfall bei den optimalen Parametern beträgt 45 Pa und übersteigt damit ebenfalls den durch die Statistik prognostizierten Wert von 4 Pa . Als Ursache können dieselben Gründe wie bei den Punktstrukturen angegeben werden.

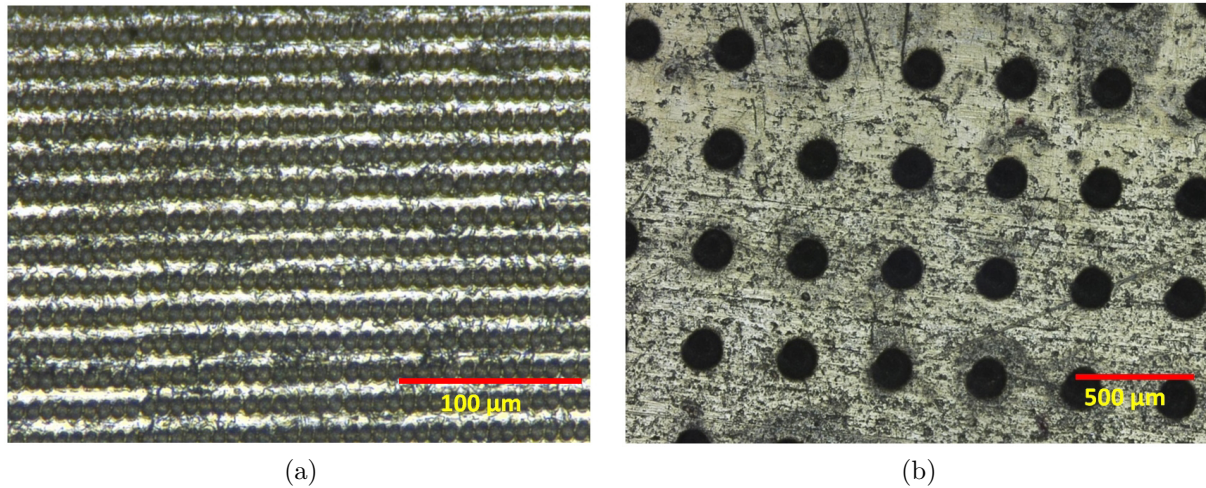


Abbildung 4.16: Abstände der Laserlöcher zueinander: (a) zu kleiner Abstand in x-Richtung ($7,5 \mu\text{m}$): Entstehen von „Kanälen“, die in Strömungsrichtung verlaufen und den Kapillareffekt begünstigen, (b) zu großer Abstand in beide Richtungen ($236 \mu\text{m}$): Reduktion des positiven Effektes der Laserstrukturierung.

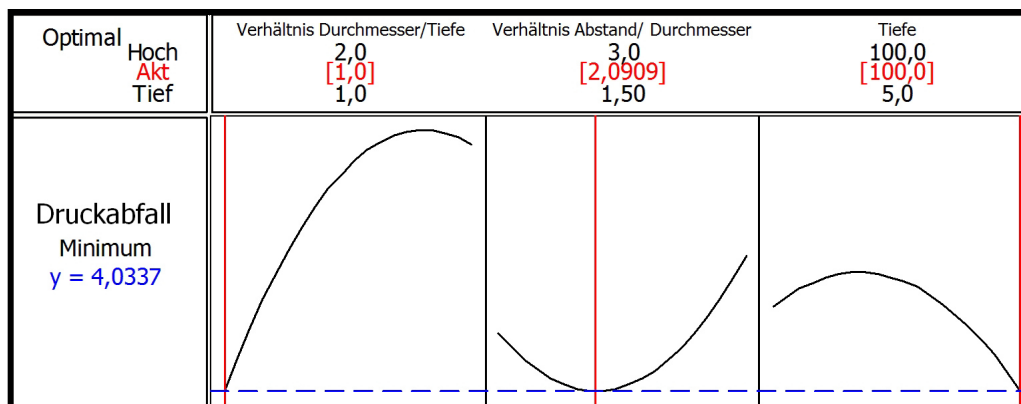


Abbildung 4.17: Ergebnis der statistischen Versuchsplanung für die linienförmigen Laserstrukturen. Das Diagramm zeigt den Verlauf der Beschreibungsfunktionen und die optimale Einstellung für das gesamte untersuchte Feld. Die schwarzen Zahlen geben die maximalen und minimalen Einstellungen an, die roten die optimalen Einstellungen und die blauen den prognostizierten Wert der Zielgröße.

Die optimalen Werte können wie bereits bei den Punktstrukturen durch die Analyse der Oberflächentopographie begründet werden:

- Durchmesser und Tiefe:
 Als Optimum erweist sich ein mittlerer Liniendurchmesser von $100 \mu\text{m}$ und eine maximale Tiefe von $100 \mu\text{m}$. Im Gegensatz zur Punktstruktur kann der Kunststoff bei den Linien

bei großen Durchmessern besser anbinden. Als Ursache wird vermutet, dass aufgrund des Fließverhaltens und der Viskosität der Schmelze diese leichter eine ganze Linie statt nur einen einzigen Loch mit Kunststoff ausfüllen kann. Bei einem zu großen Liniendurchmesser kann allerdings die gesamte Fläche auch nicht mehr vollständig abgeformt werden [50, 115]. Die dadurch entstehenden Spalte reduzieren wie bereits ausgeführt die Dichtigkeit. Das Optimum der Tiefe ergibt sich wie bei der Punktstruktur fertigungstechnisch direkt aus dem Durchmesser.

- Abstand:

Optimal ist ein mittlerer Abstand von $209 \mu\text{m}$. Abbildung 4.18 zeigt, dass bei einem zu kleinen Abstand ebenfalls eine Überlappung der Linien entstehen kann. Das Medium kann dann durch den hydraulischen Transport leicht von einem „Kanal“ auf den anderen überspringen. Bei einem zu großen Abstand reduziert sich dagegen wie bei den Punktstrukturen der positive Effekt der Laserstrukturierung.

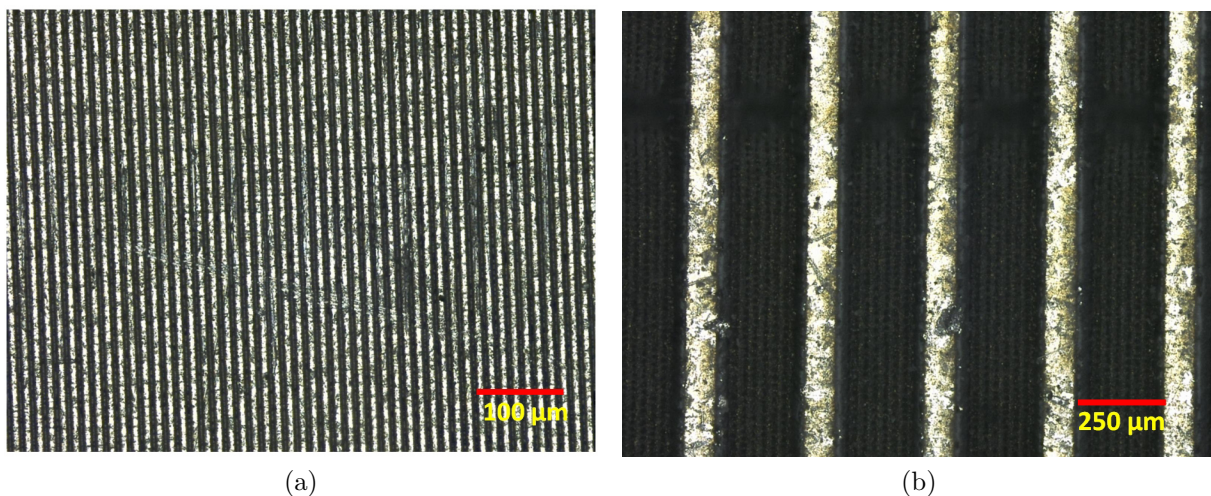


Abbildung 4.18: Abstände der linienförmigen Laserstrukturen zueinander: (a) zu kleiner Abstand ($15 \mu\text{m}$): es besteht das Risiko einer Überlappung der Linien wodurch das Medium leicht von einem „Kanal“ auf den anderen überspringen kann, (b) zu großer Abstand ($300 \mu\text{m}$): wie bei der Punktstrukturierung reduziert sich der positive Effekt der Laserstrukturierung.

Die Ergebnisse zeigen, dass die untersuchten Linienstrukturen undichter als die Punktstrukturen sind. Es wird gefolgert, dass Löcher im Vergleich zu Linien deutlich besser vollständig mit Kunststoff ausgefüllt werden können. Zudem wirken linienförmige Strukturen zwar wie Barrieren [50, 115], begünstigen den Kapillareffekt aber mehr als punktförmige Strukturen. Diese Beobachtung steht im Widerspruch zu der von Byskov-Nielsen et al. [76]. Bei den dort

erzielten Ergebnissen ist die Permeabilität von Wasser durch den IMA-Verbund unabhängig von der Art der Strukturierung (untersucht wurden Punkte, Linien sowie Punkte und Linien). Die abweichenden Beobachtungen werden in den unterschiedlich verwendeten Kunststoffen, Prüfmethoden und Prozesstechniken vermutet. Je nach vorliegenden Bedingungen kann eine punktuelle Verklammerung demnach Vorteile bieten.

Durch Verwendung der statistischen Versuchsplanung können Beschreibungsfunktionen für das gesamte betrachtete Versuchsfeld und damit alle Parameterkombinationen für eine Fertigung von Punkt- und Linienstrukturen mit Laserbearbeitung entwickelt werden. Wie in Abschnitt 4.2 vermutet, existiert eine minimale bzw. maximale Größe der Punkt- und Linienstrukturen. Werden diese unter- bzw. überschritten, reduziert sich die Dichtigkeit, da die Laserstrukturen nicht mehr vollständig mit Kunststoff gefüllt werden und/oder der positive Effekt der Laserstrukturierung reduziert wird.

Die Ergebnisse der Laserstrukturierung bestätigen zudem den bereits bei den abrasiven Probekörpern beobachteten signifikanten Einfluss der Oberflächentopographie auf die Mediendichtigkeit. Die regelmäßigen Oberflächenstrukturen der Laserbehandlung führen jedoch zu keiner Verbesserung der Dichtigkeit im Vergleich zu den unregelmäßigen Oberflächenstrukturen der Sandstrahlung. Da mit den Laserstrukturen allerdings der Druckabfall deutlich präziser eingestellt werden kann, sind sie insbesondere für beabsichtigte Leckagen vorteilhaft, z. B. zur Fertigung eines Grenzleckagemusters.

4.5 Zusammenfassung

Abschließend kann festgehalten werden, dass durch eine abrasive Sandstrahlung die Mediendichtigkeit eines IMA-Verbundes signifikant verbessert werden kann. Je feiner das Strahlmittel und damit die umspritzte Oberflächenrauheit, desto besser ist die Dichtigkeit des Verbundes. Diese Ergebnisse stehen jedoch in Konkurrenz zu den Ergebnissen der Untersuchung des Einflusses der Oberflächenrauheit auf die Festigkeit, da diese mit gröberer Oberflächenrauheit zunimmt. Durch eine Laserstrukturierung können zwar sehr hohe Festigkeiten [68], aber im Vergleich zu einer abrasiven Oberflächenbehandlung keine weitere Verbesserung der Dichtigkeit erreicht werden. Da die Laserbehandlung zudem teurer und fertigungstechnisch komplexer als das Sandstrahlen ist, wird daher für den Kombinationsverbund in Kapitel 5 eine Sandstrahlung mit Edelmetall 100 ($R_a \approx 3 \mu\text{m}$) verwendet. Wie die ermittelten Kurven zeigen, wird bei dieser Rauheit das erste Maximum der Festigkeit und ein geringer Druckabfall erzielt. Folglich wird ein Kompromiss aus Festigkeit und Dichtigkeit und damit eine auf beide Zielgrößen optimierte Probe realisiert.

5 Verbund zur simultanen Optimierung der Festigkeit und Dichtigkeit

5.1 Zielsetzung und methodisches Vorgehen

In Kapitel 3 wurde eine Optimierung der Festigkeit, in Kapitel 4 eine Optimierung der Dichtigkeit einer IMA-Verbindung durchgeführt. Während maximale Festigkeit durch eine grobe Oberflächenrauheit begünstigt wird, verhält es sich bei der Dichtigkeit umgekehrt. Die Zusammenführung der Ergebnisse wird daher aufgrund der Konkurrenz der Zielgrößen zueinander als Kompromiss betrachtet. Im Folgenden wird einerseits untersucht, ob die Ergebnisse dieser Grundlagenuntersuchungen in einem Probekörper kombiniert werden können. Weiterhin wird eine zusätzliche Vorbehandlung des Aluminiums entwickelt. Diese unterscheidet sich in ihren Mechanismen von der bisher durchgeführten Oberflächenvorbehandlung. Die neue Modifikation wird anschließend mit der bereits durchgeführten Oberflächenstrukturierung verglichen. Darauf aufbauend wird eine Prozessparameteranalyse der Spritzgussparameter durchgeführt. Da die Prozessparameter des Spritzgussprozesses allerdings zahlreich sind, wird mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung zuvor eine Signifikanzanalyse durchgeführt. Hierdurch werden Parameter mit keinem oder nur einem geringen Einfluss erkannt und müssen nicht weiter betrachtet werden. Signifikante Parameter dagegen werden detaillierter untersucht. Als Grundlage der Analyse dient der in Kapitel 4 entwickelte Probekörper. Dieser ermöglicht sowohl Dichtigkeits- als auch Festigkeitsprüfungen, wodurch der Einfluss der Parameter auf beide Zielgrößen verglichen werden kann.

Weiterhin werden Langzeituntersuchungen der optimalen Probekörper durchgeführt. Zum einen werden die Probekörper konditioniert, um ihre Wasseraufnahme zu bewerten. Zum anderen wird die chemische und thermische Beständigkeit der Probekörper durch Alterung überprüft. Diese Langzeitbelastungen können sich kritisch auf die Festigkeit und Dichtigkeit auswirken, indem zum Beispiel durch Aufquellen des Kunststoffes oder durch Verringerung des E-Moduls des Kunststoffes als Folge der Alterung das Bauteil oder die Qualität der Anbindung beeinflusst werden. Abschließend wird die Kunststoff-Metall-Anbindung und damit die Grenzfläche zwischen den Fügepartnern mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung reduziert werden. Durch die Entwicklung von Beschreibungsfunktionen für die Länge und Dicke der Anbindung kann

der Einfluss möglicher Labyrinthdichtungen und der Aufschwindung des Kunststoffes auf das Aluminium bestimmt werden. Diese Untersuchungen dienen zudem als Grundlage für eine Hochskalierung des Bauteils mit einer Vielzahl von Kunststoff-Metall-Anbindungen, vgl. Kapitel 6.

Nach der Auswertung der optimalen Prozessparameter, der Langzeituntersuchungen sowie der Minimierung der Kunststoffanbindung können die beiden unterschiedlichen Vorbehandlungen des Aluminiums miteinander verglichen werden. Es wird überprüft, ob auch bei der neu entwickelten Vorbehandlung die Festigkeit und Dichtigkeit im Widerspruch zueinander stehen. Zudem werden die maximal erreichbaren Werte vor und nach der Langzeitbelastung sowie der Minimierung beurteilt.

5.2 Vorbehandlung des Aluminiums

Es werden zwei verschiedenen Vorbehandlungen des Aluminiums verwendet und in ihrem Herstellungsaufwand sowie ihrer Auswirkung auf die beiden Zielgrößen bewertet:

1. Die Aufweitung des Aluminiumrohres erfolgt wie in Unterabschnitt 4.3.2 vorgestellt. Anschließend wird das Rohr mit Edelkorund 100 ($R_a \approx 3 \mu\text{m}$) gestrahlt. Durch die Verbesserung der mechanischen und spezifischen Adhäsion kann eine Probe mit einem Kompromiss aus beiden Zielgrößen gefertigt werden. Probekörper mit dieser Vorbehandlung werden im Folgenden als **Verbindung 1** bezeichnet.
2. Um eine Verbindung herzustellen, die auf anderen Mechanismen als Verbindung 1 basiert, kann eine Makroverformung des Aluminiums zur formschlüssigen Verklammerung des Rohres im Kunststoff verwendet werden [32]. Es wurde zudem in Unterabschnitt 2.3.2 gezeigt, dass eine Makroverformung viele Vorteile bietet. Dennoch finden sich im Stand der Technik bisher erst wenige Ergebnisse. Die Realisierung dieser Makroverformung wird im Folgenden vorgestellt. Probekörper mit dieser Vorbehandlung werden als **Verbindung 2** bezeichnet.

Bei der makro-mechanischen Verklammerung ist das Ziel, die Verbindung zwischen Kunststoff und Metall durch einen Formschluss zu erzeugen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde mit der Firma Goerlich Kunststofftechnik GmbH eine Stauchung des Aluminiumrohres wie in Abbildung 5.1 dargestellt entwickelt. Diese weist folgende Eigenschaften auf:

- Zur Optimierung der Festigkeit und Dichtigkeit wird keine Verbesserung der Adhäsion angestrebt. Stattdessen wird das Ziel nur durch eine Verklammerung des Metalls im Kunststoff erreicht.
-

- Die Stauchung des Rohres erfolgt bei Raumtemperatur. Durch diese Kaltverformung kommt es zu einem Anstieg der Versetzungsdichte und damit zu einer Verfestigung des Aluminiums [116]. Beim Umspritzen mit Kunststoff verhakt sich die Verfestigung mit dem Polymer infolge eines Hinterschnittes. Dadurch wird das Versagen des Probekörpers nicht in der Grenzfläche, sondern in einem der Fügepartner initiiert. Dies führt zu höheren Verbundfestigkeiten [57].
- Beim Abkühlen des Kunststoffes schwindet dieser auf das Rohr auf und erzeugt so eine zusätzliche kraftschlüssige Verbindung und damit eine zusätzliche Abdichtung.

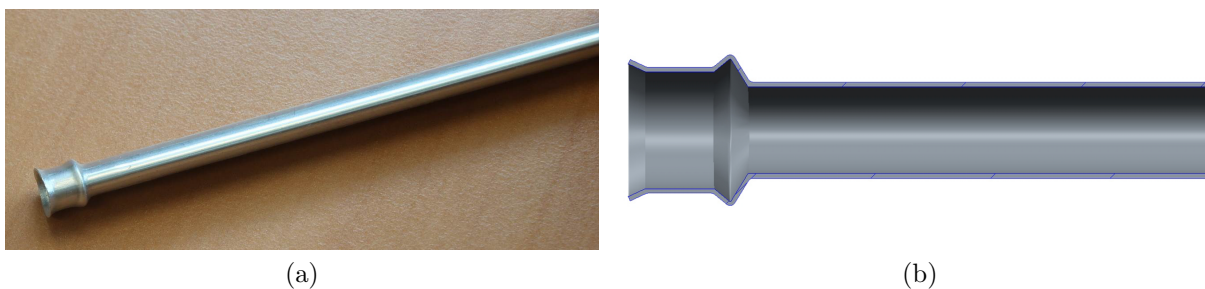
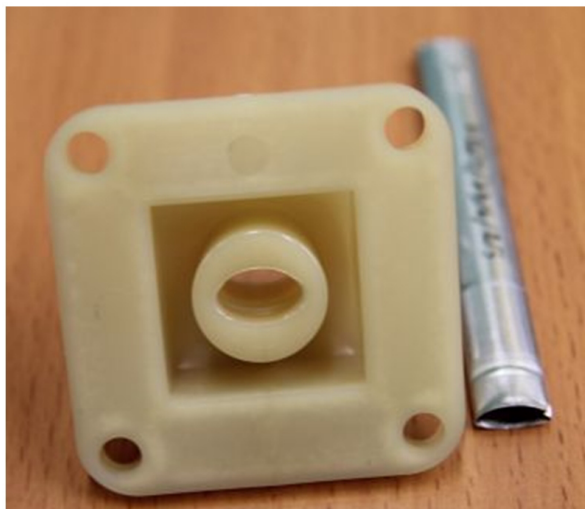


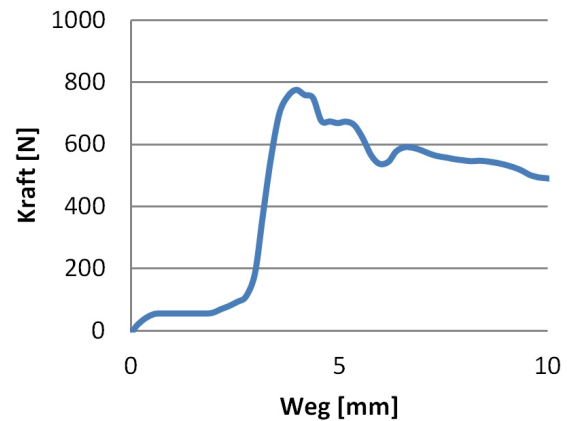
Abbildung 5.1: Makroverformung (Stauchung) des Aluminiumrohres: (a) Realprobekörper und (b) Querschnitt des CAD-Modelles

Bewertung der Makroverformung

Die Stauchung wird mittels speziell konstruierter Stempel erzeugt [117]. Die gestauchten Rohre werden anschließend umspritzt und auf Festigkeit und Dichtigkeit geprüft. Wie Abbildung 5.2 zeigt, zieht sich das Rohr nach dem Erreichen einer maximalen Kraft von ca. 780 N aus dem Kunststoff. Der Kunststoff weist keine Beschädigungen auf, die Stauchung wird jedoch „geglättet“. Das Versagen liegt somit nicht in der Grenzfläche der Verbindung. Die Verbundfestigkeit wird allerdings durch die geringe Festigkeit der Stauchung begrenzt. Es wird gefolgert, dass durch eine Optimierung der Stauchung höhere Verbundfestigkeiten erreicht werden können. Die Dichtigkeitsprüfung zeigt, dass mit dieser Geometrie keine Abdichtung erzeugt werden kann. Der Druckabfall liegt bei allen geprüften Proben oberhalb des Leckagegrenzwertes (vgl. Unterabschnitt 4.3.4). Die Begründung dieser unzureichenden Abdichtung ergibt sich aus der Betrachtung von CT-Aufnahmen der Verbindung, vgl. Abbildung 5.3: Statt auf das Metall aufzuschwiden, schwindet der Kunststoff von diesem ab. Hierdurch entstehen große Spalte zwischen Kunststoff und Metall, durch die das Medium entweicht. Bei der bisher untersuchten Verbindung 1 mit gestrahlter Oberfläche konnte diese starke Abschwindung nicht beobachtet werden. Es wird vermutet, dass bei Verbindung 1 die Abschwindung durch die Verklammerung des Kunststoffes in der Rauheit des Metalles und die verbesserte spezifische Adhäsion kompensiert wird.



(a)



(b)

Abbildung 5.2: Zugprüfung von Verbindung 2: (a) Fügepartner nach dem Zugversuch und (b) Kraft-Weg-Diagramm. Nach dem Erreichen einer maximalen Kraft wird das Rohr aus dem Kunststoff gezogen.

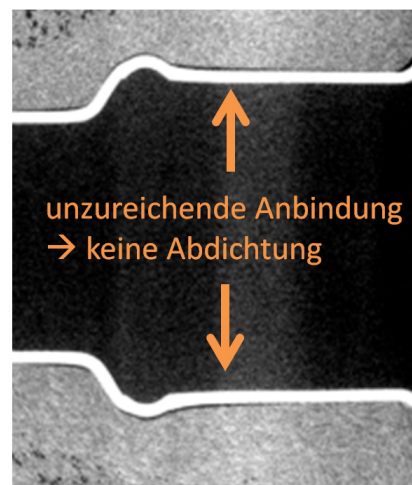


Abbildung 5.3: CT-Aufnahme von Verbindung 2. Es sind deutliche Spalte zwischen Kunststoff und Metall erkennbar.

Optimierung der Makroverformung

Aufgrund dieser nicht akzeptablen Ergebnisse ist eine Optimierung der Stauchung erforderlich. Um die Abschwundung zu verringern, soll durch eine zusätzliche Umformung die Stauchung umgeklappt und damit eine verbesserte Verklammerung erzielt werden [118]. Aufgrund der Verfestigung des Aluminiumrohres ist jedoch eine weitere Umformung nicht möglich, ohne das Rohr zu beschädigen. Daher muss dessen Duktilität zunächst durch eine Wärmebehandlung

erhöht werden. Es wird eine Rekristallisation des Aluminiums angestrebt, da diese zu einer Neubildung des Gefüges und damit einer signifikant erhöhten Duktilität führt [116]. Die erforderliche Temperatur beträgt ca. $0,4 - 0,6 \cdot T_S$ (Schmelztemperatur) [119]. Zur Bestimmung der benötigten Temperatur im vorliegenden Fall werden die Rohre bei unterschiedlichen Temperaturen aufgeheizt, ein zusätzlicher Umformstempel eingefahren und die Rohre umspritzt. Abbildung 5.4 zeigt den Verlauf der Festigkeit und Dichtigkeit der Verbindung bei unterschiedlichen Temperaturen der Wärmebehandlung. Ab ca. $300\text{ }^\circ\text{C}$ kommt es infolge des gewünschten Umklappens der Stauchung (vgl. Abbildung 5.5) zu einer sprunghaften Verbesserung der beiden Zielgrößen. Die Dichtigkeit ist auch bei höheren Temperaturen sehr gut, die Festigkeit nimmt allerdings ab ca. $400\text{ }^\circ\text{C}$ ab.

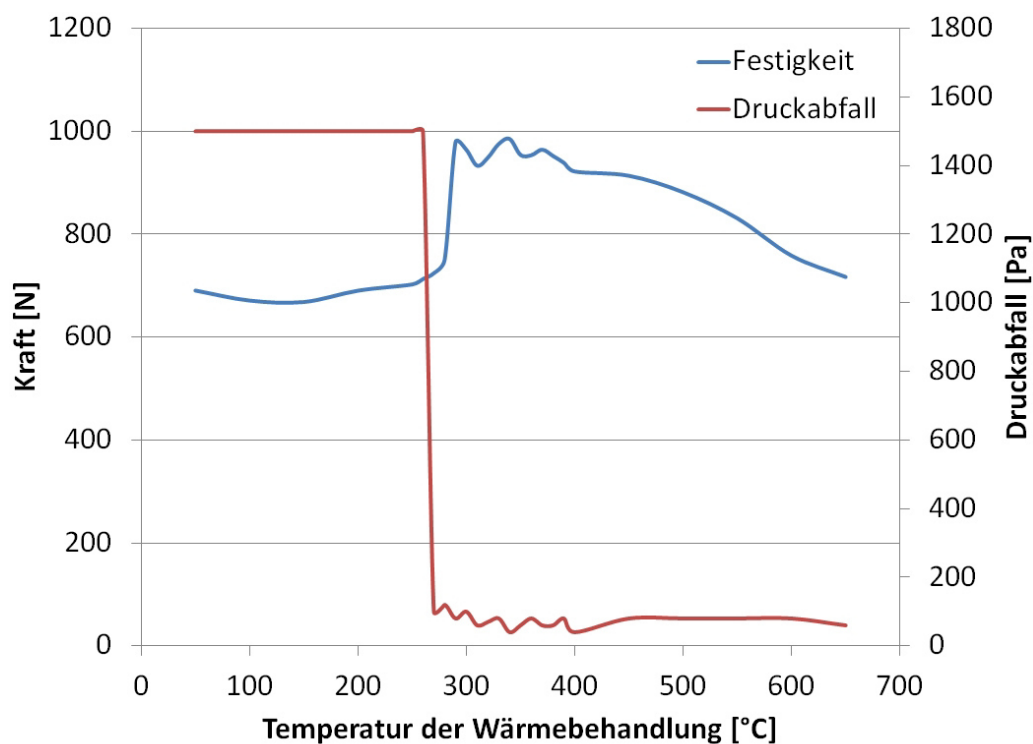


Abbildung 5.4: Einfluss der Wärmebehandlung des Aluminiumrohres auf die Festigkeit und Dichtigkeit (dargestellt durch den Druckabfall). Ab ca. $300\text{ }^\circ\text{C}$ erfolgt eine signifikante Verbesserung der beiden Zielgrößen.

Die signifikante Verbesserung der Festigkeit durch das Umklappen der Stauchung wird durch den verbesserten Hinterschnitt des Aluminiums mit dem Kunststoff erzielt. Die Rohre werden nicht mehr aus dem Kunststoff gezogen, sondern sind durchgehend verklammert. Wie in Abbildung 5.6 dargestellt, wird das Versagen des Verbundes durch das Versagen des Rohres an der umgeklappten Stauchung bei ca. 980 N initiiert. Aufgrund des Hinterschnittes wirkt hier die Hauptbelastung. Das Versagen des Verbundes wird somit von der Grenzfläche in einen der

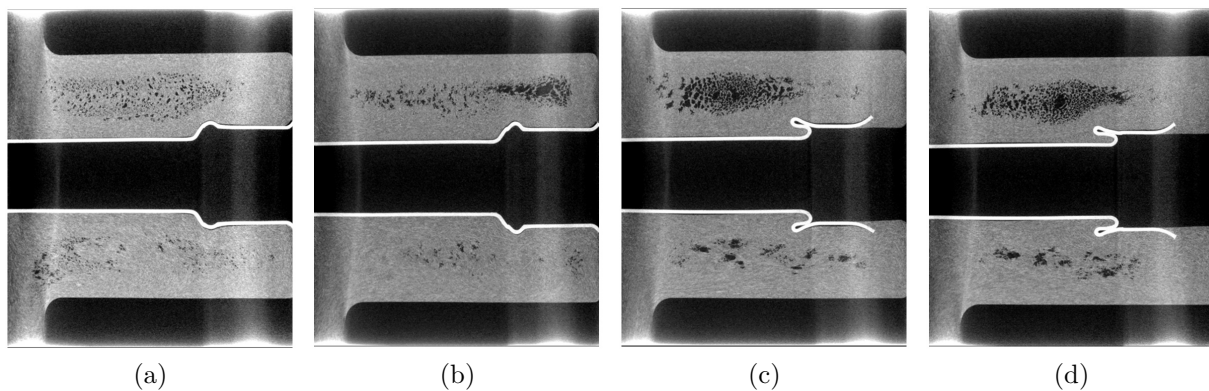


Abbildung 5.5: CT-Aufnahmen bei unterschiedlichen Temperaturen der Wärmebehandlung: (a) Raumtemperatur, (b) 250 °C, (c) 350 °C und (d) 400 °C. Bis ca. 300 °C kann aufgrund der Verfestigung keine weitere Umformung durchgeführt werden. Ab ca. 300 °C kommt es infolge der Rekristallisation und damit der Erhöhung der Duktilität zu einem Umklappen der Stauchung.

Fügepartner verlagert. Dass bei einer optimierten Makroverklammerung der schwächste Fügepartner das Metall ist, wird auch in der Literatur beobachtet [57] und liegt vor allem an der sehr geringen Wandstärke des Inserts. Es ist anzumerken, dass die Wärmebehandlung auch einen schädlichen Einfluss auf die Festigkeit aufweisen kann. Dieser wird bei Temperaturen > 400 °C ersichtlich: infolge der starken Erweichung der Rohre versagen diese bei deutlich geringeren Festigkeiten. Im optimalen Temperaturbereich von ca. 300 °C kann dieser schädliche Einfluss jedoch vernachlässigt werden, da die Zugfestigkeit eines nicht umgeformten Rohres (1027 N) nur ca. 4 % größer als die Festigkeit des Verbundes ist.

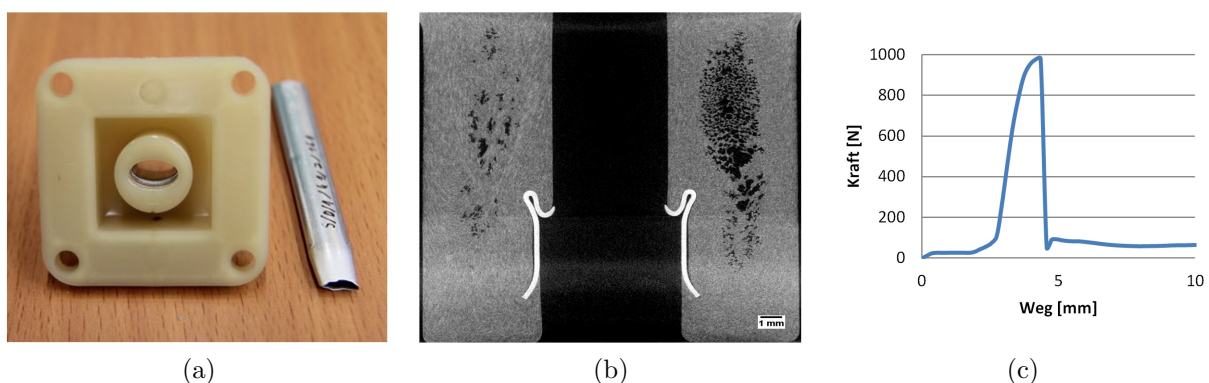


Abbildung 5.6: Zugprüfung von Verbindung 2 mit umgeklappter Stauchung: (a) Fügepartner nach dem Zugversuch, (b) CT-Aufnahme des Verbundes nach dem Versagen und (c) Kraft-Weg-Diagramm. Das Rohr ist so stark verklammert, dass es nicht ausgezogen wird, sondern hinter der umgeklappten Stauchung versagt.

Die Verbesserung der Dichtigkeit ergibt sich aus der Bildung einer dünnen Kunststoffschicht innerhalb des Rohres. Wie Abbildung 5.7 zeigt, sind keine Spalte zwischen diesen Grenzflächen ersichtlich, da der Kunststoff auf das Aluminiumrohr aufschwindet. Obwohl zwischen der äußeren Kunststoffschicht und dem Rohr weiterhin ein Spalt erkennbar ist, wird hinter der umgeklappten Stauchung eine weitere Abdichtung erzielt.

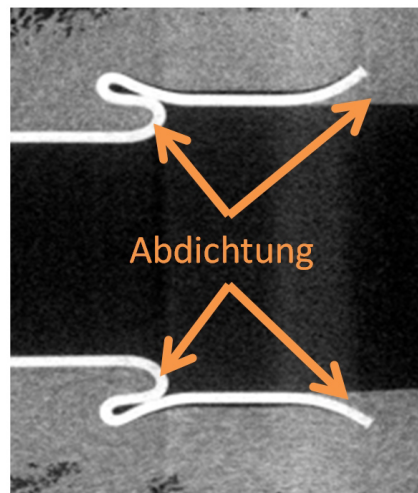


Abbildung 5.7: CT-Aufnahme von Verbindung 2 mit umgeklappter Stauchung. Der Kunststoff dichtet das Aluminiumrohr innen und außen ab.

Abschließend ist anzumerken, dass die Schmelztemperatur von EN-AW 3103 ca. $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ beträgt [120] und damit das Umklappen der Stauchung bei ca. $0,45 \cdot T_S$ beobachtet wird. Da zudem im vorliegenden Fall große Verformungen erzeugt werden, wodurch geringere Temperaturen zur Rekristallisation erforderlich sind [119], scheint diese als Ursache der Duktilitätssteigerung plausibel. Deren endgültiger Nachweis muss jedoch durch Schliffbilder des Gefüges erfolgen. Da die Ätzung von EN-AW 3103 jedoch äußerst komplex ist [121] und im vorliegenden Fall nicht durchgeführt wird, kann kein finaler Beweis erbracht werden.

Dickenänderung des Rohres

Wie bei Verbindung 1 besteht aufgrund der Umformung das Risiko der Ausdünnung des Aluminiums. Dickenmessungen vor dem Umklappen der Stauchung zeigen, dass das Rohr durch die Stauchung in Querrichtung um 6 % und in Längsrichtung um ca. 40 % reduziert wird [102]. Wie in Abbildung 5.8 ersichtlich, liegt diese starke Ausdünnung jedoch nur am Rohrende vor und ist daher für die Festigkeit der Verbindung vernachlässigbar. Aber auch im Bereich der Stauchung findet eine Ausdünnung statt (quer ca. 5 %, längs ca. 20 %). Es wird angenommen, dass diese beim Umklappen der Stauchung konstant bleibt. Da, wie bereits ausgeführt, das Versagen des Rohres an der umgeklappten Stauchung initiiert wird, kann gefolgert wer-

den, dass die Ausdünnung das Versagen begünstigt. Für die weiteren Untersuchungen ist diese jedoch vernachlässigbar, da die Festigkeit des Verbundes ca. 96 % der Festigkeit der Rohre beträgt.

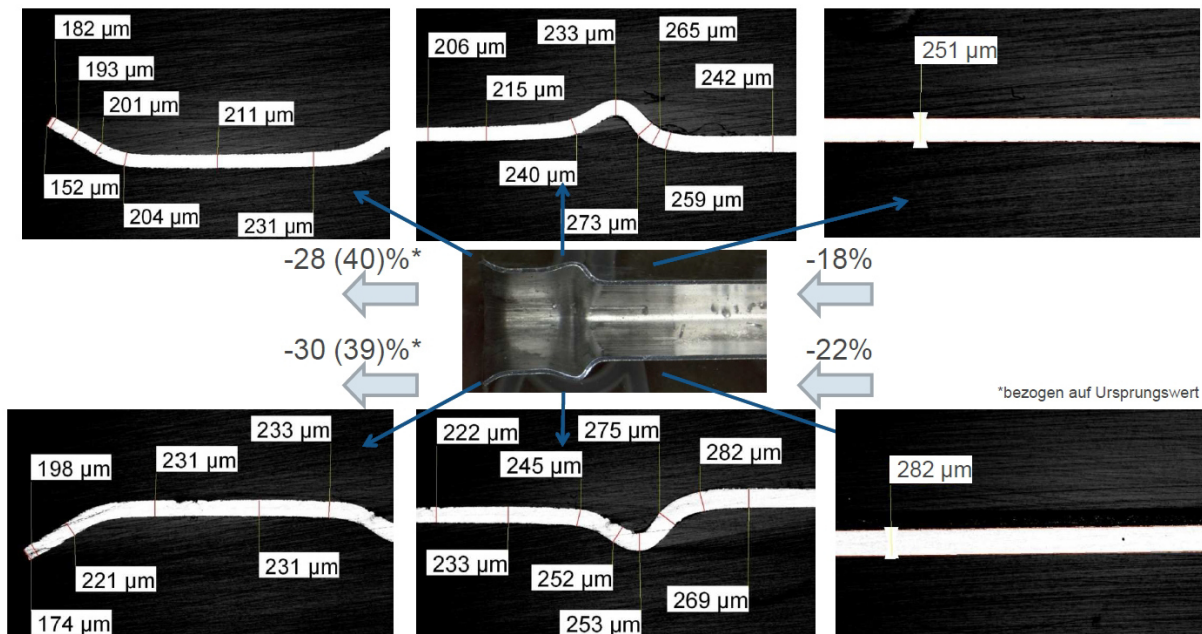


Abbildung 5.8: Dickenänderung des Aluminiumrohres infolge der Stauchung [102].

5.3 Prozessparameteranalyse anhand statistischer Versuchsplanung

Im Spritzgussprozess kann eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter variiert werden. Die Signifikanz dieser Variation ist jedoch u. a. von dem verarbeiteten Kunststoff und der Geometrie sowie der Applikation des Bauteils abhängig. Da der Probekörper bei nicht optimierten Prozessparametern Spritzgussfehler und/oder schlechte Zielgrößen aufweist, ist deren korrekte Einstellung von besonderer Bedeutung. Zwar existiert eine Vielzahl an Datenblättern und Erfahrungswerten für Kunststoffe, diese dienen aber eher als Grundeinstellungen für eine nachfolgende detailliertere Analyse. Da zahlreiche Prozessparameter existieren, wird zur Minimierung des Versuchsaufwandes die Methode der statistische Versuchsplanung angewendet. Ziel ist die Analyse des Einflusses der Spritzgussprozessparameter bei dem vorliegenden Probekörper auf die beiden Zielgrößen und die Berechnung der optimalen Einstellungen. Dazu werden die Beschreibungsfunktionen der Parameter auf die Zielgrößen ermittelt.

5.3.1 Herstellung und Prüfung der Probekörper

Zur Herstellung von Probekörpern mit Verbindung 1 werden die Rohre aufgeweitet und mit Edelkorund 100 ($R_a \approx 3 \mu\text{m}$) gestrahlt. Zur Fertigung von Verbindung 2 wird die umgeklappte Stauchung erzeugt. Nach der Bearbeitung des Aluminiums werden die Rohre umspritzt. Die Zwischenschritte bei der Herstellung können Unterabschnitt 4.3.3 entnommen werden. Die Festigkeitsprüfung erfolgt, wie in Unterabschnitt 3.3.3 dargestellt, die Dichtigkeitsprüfung analog zu Unterabschnitt 4.3.4. Alle im Folgenden vorgestellten Ergebnisse werden mit Verbindung 2 erzielt. Die optimalen Parameter werden anschließend auch mit Verbindung 1 überprüft.

5.3.2 Methodisches Vorgehen

Zur Ermittlung der Beschreibungsfunktionen muss der Einfluss jeden Parameters (d. h. dessen Effekt) auf die Zielgrößen bestimmt werden. Dazu muss auch dessen Wechselwirkung mit anderen Parametern berücksichtigt werden. Da allerdings eine Vielzahl an Parametern im Spritzgussprozess existiert, wäre in einem vollfaktoriellen Versuchsplan (alle Kombinationsmöglichkeiten der Parameter werden überprüft) ein unverhältnismäßig hoher Aufwand erforderlich. Um Parameter mit keinem oder nur einem geringen Einfluss zu neutralisieren, wird zunächst eine Signifikanzanalyse anhand eines Screenings durchgeführt.

Ein Screening bezeichnet einen teilfaktoriellen Versuchsplan, der trotz eines minimalen Versuchsaufwandes nur einen geringen Informationsverlust aufweist. Dieser Versuchsplan beruht auf dem Prinzip der Spärlichkeit der Effekte: Systeme werden gewöhnlich durch wenige Haupteffekte und Wechselwirkungen zwischen wenigen Parametern (Faktoren) dominiert. Daher besteht nur ein geringes Risiko, signifikante Faktoren nicht zu detektieren, wenn viele Faktoren gleichzeitig getestet werden. Durch die Wahl von Auflösungsstufen des Versuchsplans kann dessen Genauigkeit und der Versuchsaufwand genau eingestellt werden. Diese werden grob in die vier Grundtypen III, IV, V und V+ unterschieden. Je höher die Auflösungsstufe, desto höher die Genauigkeit aufgrund geringerer Vermengung der Effekte und Wechselwirkungen, aber desto höher der Versuchsaufwand. Da durch das Screening nur Haupteffekte sicher detektiert werden sollen, wird Auflösungsstufe IV gewählt [104].

Zur Bestimmung, ob ein Parameter im Versuchsplan einen signifikanten Einfluss auf die Zielgrößen aufweist, existieren verschiedene Möglichkeiten. Da viele Methoden nur grafisch sind, aber eine quantitative Aussagen getroffen werden soll, wird im Folgenden das Pareto-Diagramm genutzt. Bei diesem wird auf der Abszisse der standardisierte Effekt aufgetragen und nach dessen Größe geordnet. Der standardisierte Effekt errechnet sich aus dem Quotienten des beobachteten Effekts, dividiert durch seine Standardabweichung. Auf der Ordinate stehen die Faktoren. Dieses Ergebnis ist insofern ein Maß für die Signifikanz, als dass je nachdem, ob ein Fehler in

den Ergebnissen vorliegt oder nicht, verschiedene Grenzen festgelegt werden. Liegt ein Fehlerterm vor, wird die Signifikanzgrenze über die t-Verteilung [122] und damit über das α -Risiko bestimmt. Das α -Risiko gibt die Wahrscheinlichkeit an, einen nicht signifikanten Effekt als signifikant anzunehmen. Existiert kein Fehlerterm, so wird mit Hilfe der Lenth-Methode und dem zuvor definierten α -Risiko eine Schwelle für die Signifikanz eines Effekts errechnet [123]. Die Lenth-Methode darf immer dann angewendet werden, wenn das Design gesättigt, also die Anzahl der Versuche mindestens um eins größer als die Zahl der Faktoren ist. Auch hier wird von der Spärlichkeit der Effekte ausgegangen. Die Konstruktion der Signifikanz-Schwelle erfolgt, indem mit Hilfe der Effekte der sogenannte „Pseudo-Standard-Fehler“ PSE errechnet wird. Alle standardisierten Effekte, welche über diesem Wert liegen, sind mit der Wahrscheinlichkeit des α -Risikos signifikant [123–125]. Die als signifikant ermittelten Parameter werden dann detailliert in einem quadratischen Versuchsplan überprüft, während nicht signifikante Parameter auf ihren berechneten Optimalwert eingestellt werden.

5.3.3 Screening

Zur Einstellung der Grenzen eines Screening-Versuchsplans ist es erforderlich, die Spritzgussparameter auf definierte Bereiche einzuschränken. Da nicht alle Einstellungen verwertbare Proben erzeugen, ist der erste Schritt, eine Probe ohne offensichtlichen Spritzgussfehler herzustellen. Dazu werden die in Tabelle 5.1 dargestellten Spritzgussparameter variiert. Diese Parameter werden aufgrund ihres vermuteten Einflusses auf die Zielgrößen [29, 30] und anhand von Erfahrungswerten ausgewählt. Als Grundeinstellungen werden die Verarbeitungshinweise des Kunststoffdatenblattes (Anhang B) und des Handbuchs der Spritzgussmaschine von Arburg [126] übernommen. Von diesen Einstellungen aus wird sukzessive ein Parameter variiert und die anderen konstant gehalten, bis die Probe Spritzgussfehler (z. B. Deseleffekte, Glasfaserentmischungen etc. [29]) aufwies. Dadurch werden die Ober- und Untergrenzen des Versuchsplanes bestimmt. Parameter, die nicht variiert werden können, werden nicht weiter betrachtet.

In den ermittelten Grenzen wird ein Screeningsversuchsplan erstellt, vgl. Anhang C. Da dieser nur zur Bestimmung der signifikanten Parameter dient, erfolgte die Auswertung durch Erstellung der Pareto-Diagramme für die beiden Zielgrößen, vgl. Abbildung 5.9. Als signifikante Parameter können der Einspritzvolumenstrom, die Kühlzeit, die Nachdruckdauer und die Einzugstemperatur bestimmt werden. Die Wechselwirkungen werden nicht berücksichtigt, da durch die gewählte Auflösungsstufe des Screenings nur Haupteffekte sicher detektiert werden können. Die verbleibenden nicht signifikanten Parameter werden anhand der zusätzlich ermittelten Beschreibungsfunktionen auf die berechneten Optimalwerte eingestellt. Es ist anzumerken, dass der Wert des α -Risikos zur Berechnung des nach Lenth konstruierten Schwellwertes für die

Spritzgussparameter	Vorgeschlagene Einstellung	Grenzen der Parametereinstellungen
Schließkraft	500 kN	500 kN (keine weitere Betrachtung)
Werkzeugwandtemperatur	70 - 120 °C	50 - 70 °C
Massetemperatur	270 - 305 °C	295 °C (keine weitere Betrachtung)
Nachdruckhöhe	500 - 1050 bar	1000 - 2000 bar
Nachdruckdauer	5 s	5 - 25 s
Einspritzdruck	650 - 1550 bar	500 - 2000 bar
Einspritzvolumenstrom	20 - 70 cm ³ /s	5 - 40 cm ³ /s
Kühlzeit	5 - 25 s	5 - 50 s
Staudruck	40 - 80 bar	-10 - 100 bar
Einzugstemperatur	280 °C	280 - 300 °C
Umfangsgeschwindigkeit	9 m/min	6,9 m/min (keine weitere Betrachtung)

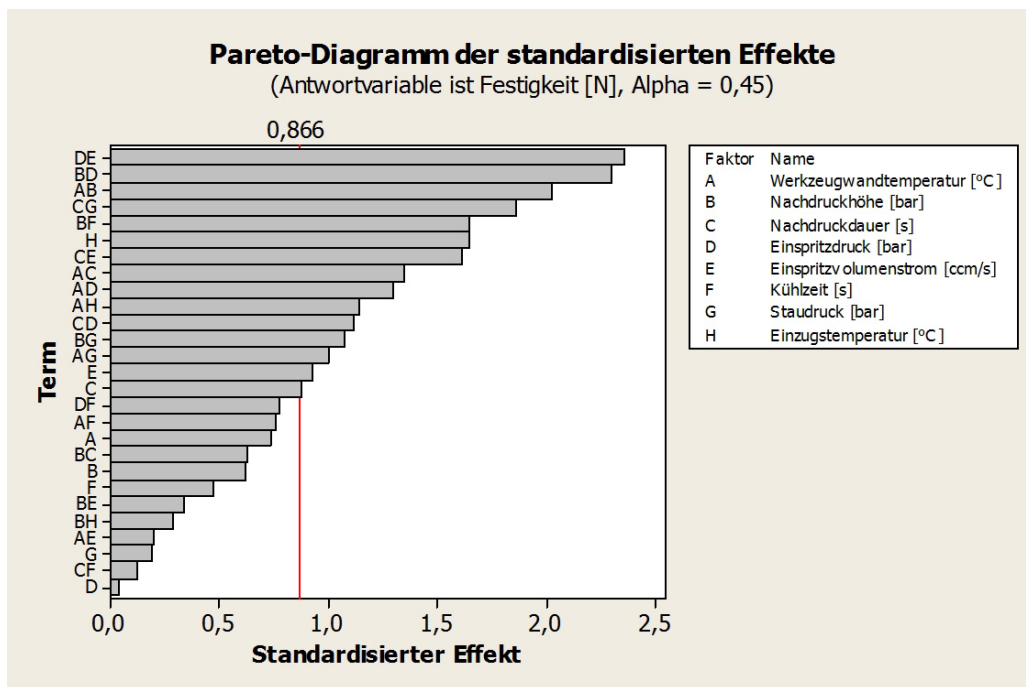
Tabelle 5.1: Untersuchte Spritzgussparameter und deren vorgeschlagene Einstellung nach dem Datenblatt des Zytels (Anhang B) und [126] sowie die ermittelten Grenzen der Parametereinstellungen. Schließkraft, Umfangsgeschwindigkeit und Massetemperatur führen nur bei den angegebenen Werten zu fehlerfreien Proben und werden daher nicht weiter betrachtet.

Signifikanz eines Effektes auf einen hohen Wert von 45 % eingestellt wird. Dieser wird gewählt, da es mit steigendem Risiko wahrscheinlicher wird, nicht-signifikante Effekte als signifikante anzunehmen. Die Sicherheit wird somit gesteigert und die Testschwankungen eliminiert, da mehr Parameter als erforderlich geprüft werden.

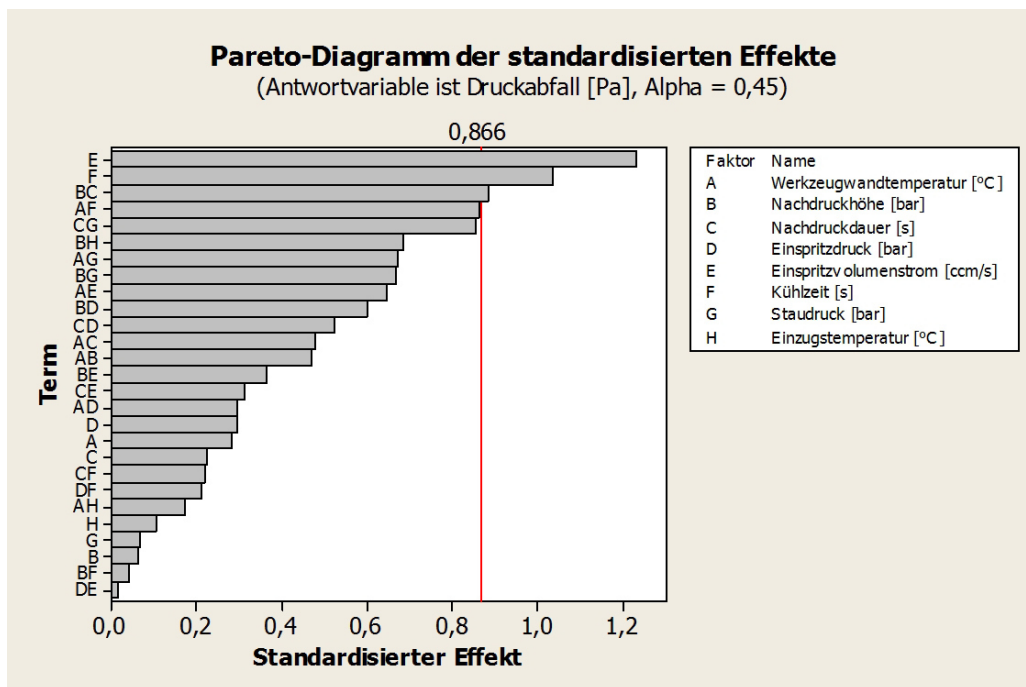
5.3.4 Quadratischer Versuchsplan und Bestimmung der optimalen Parameter

Mit den ermittelten signifikanten Parametern wird ein quadratischer Versuchsplan erstellt, vgl. Anhang C. Um eine statistische Absicherung des Plans zu gewährleisten, muss eine bestimmte Anzahl von Messungen je Parametereinstellung (die sogenannte Stufe) geprüft werden [104]. Die im vorliegenden Fall benötigte Mindestanzahl von sechs Versuchen je Stufe wurde von Ewen [127] ermittelt. Dies ist durch den gewählten Versuchsplan sichergestellt, da sämtliche Parameter mit acht Versuchen je Stufe getestet werden.

Es wird beobachtet, dass die Werte der Zielgrößen wesentlich weniger schwanken als bei den Screeningsproben. Eine erste Verbesserung wird also bereits erreicht. Die statistische Auswertung des Versuchsplans führt zu den in Abbildung 5.10 angegebenen Beschreibungsfunktionen.



(a)



(b)

Abbildung 5.9: Pareto-Diagramme der beiden Zielgrößen: (a) Festigkeit und (b) Dichtigkeit. Durch die Wahl von Auflösungsstufe IV des Versuchsplans [104] können nur Haupteffekte sicher bestimmt werden.

Alle Parameter besitzen einen nichtlinearen Einfluss auf die Zielgrößen. Der Einfluss auf die Festigkeit ist zudem bei allen Parametern ungefähr gleich signifikant. Wird der Einfluss auf die Dichtigkeit betrachtet, zeigt der Einspritzvolumenstrom den stärksten Effekt. Dieser besitzt auch bereits den größten standardisierten Effekt im Pareto-Diagramms. Dessen Signifikanz kann somit durch den quadratischen Versuchsplan bewiesen werden.

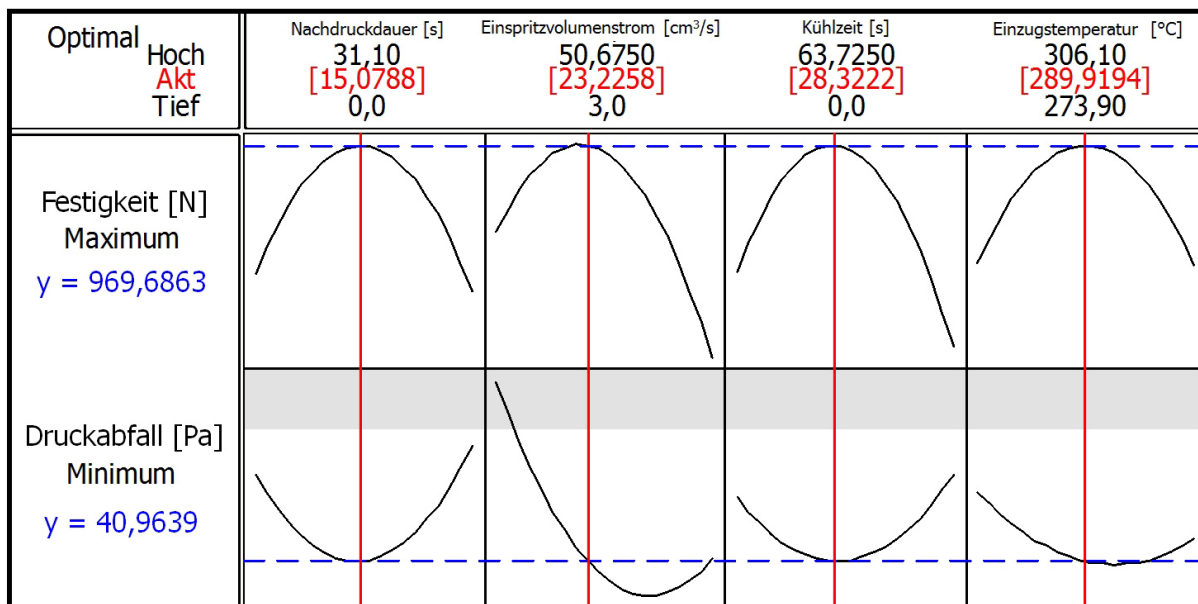


Abbildung 5.10: Beschreibungsfunktionen für die signifikanten Prozessparameter: Darstellung der maximalen und minimalen Einstellungen (schwarz), der optimalen Einstellungen (rot) und der prognostizierten Werte der Zielgröße (blau). Mittlere Parametereinstellungen führen zu den besten Zielgrößen.

Die prognostizierten Zielgrößen werden zu 970 N und 41 Pa berechnet. Die Herstellung und Prüfung mit den als optimal berechneten Parametern resultiert in einer mittleren Festigkeit von 980 N und einem mittleren Druckabfall 40 Pa. Die Abweichung der Zielgrößen von ca. 1 % liegt damit im Rahmen der Standardabweichung. Eine Überprüfung der optimalen Parameter mit Verbindung 1 führt zu einer mittleren Festigkeit von 933 MPa und einem mittleren Druckabfall von 41 Pa. Die Dichtigkeit ist damit annähernd gleich wie bei Verbindung 2, die Festigkeit um ca. 5 % niedriger. Obwohl bei beiden Verbindungen die Festigkeit durch das Aluminium begrenzt wird, ist diese bei Verbindung 2 leicht erhöht. Dieser Unterschied kann auf den Kerbeffekt, der beim Aufrauen von Verbindung 1 entsteht, zurückgeführt werden, vgl. Unterabschnitt 3.1.1).

Abschließend kann festgehalten werden, dass die Festigkeit und die Dichtigkeit durch die Prozessparameter entscheidend beeinflusst werden können. Aufgrund der Verwendung der Methoden der statistischen Versuchsplanung kann zudem ausgeschlossen werden, dass für den

untersuchten Fall geeignetere Parameter als die ermittelten existieren. Weiterhin wird ersichtlich, dass die optimalen Zielgrößen beider Verbindungen zwar auf anderen Mechanismen basieren, aber dennoch nahezu gleich gute Werte erzielen. Zur weiteren Bewertung werden daher Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt.

5.4 Lebensdaueruntersuchungen der Kunststoff-Metall-Verbindungen

Während der Lebensdaueruntersuchungen kann es zu einem deutlichen Einfluss der dauerhaften Belastung auf die Festigkeit und Dichtigkeit kommen. Da Verbindung 1 auf einer Verbesserung der mechanischen und spezifischen Adhäsion basiert, kann bei der Lebensdaueruntersuchung durch Alterungsprozesse gemäß Harris and Beevers [67] die Festigkeit verringert werden. Dies wird durch Hydrolyseprozesse erklärt, die zur Zersetzung der Oxidschicht des Aluminiums führen. Bei rauen Strahlmitteln kann zudem eine schnellere Durchsetzung des Mediums durch den Probekörper aufgrund der Vergrößerung des Kapillareffektes entstehen. Wie allerdings in Abschnitt 2.1.2 erläutert, können diese schädlichen Effekte durch die entstehenden chemischen Bindungen kompensiert werden, da diese sehr stabil gegenüber Feuchtigkeitsbeanspruchung sind [4]. Verbindung 2 basiert dagegen auf einer formschlüssigen Verklammerung. Für diese zeigen Miklavac et al. [57], dass bei guter Gestaltung des Formschlusses die verwendeten Werkstoffe und nicht die Vorgänge an der Grenzfläche die Festigkeit begrenzen. Weiterhin kann bei beiden Verbindungen durch die Änderung der mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes (Verringerung des E-Moduls und der Zugfestigkeit, Vergrößerung der Streckdehnung und Kerbschlagzähigkeit etc., siehe Datenblatt Anhang B) die Festigkeit der Verbindung reduziert werden. Zudem können sich gemäß Menges et al. [99] die Spalte zwischen den Grenzflächen kritisch auswirken: Dringt in diese Wasser ein, diffundiert es in das den Spalt umgebende Material und führt zu dessen Quellung. Durch das Medium werden zudem Mikrorisse initiiert. Der Spalt wird so zusätzlich vergrößert. Dadurch verringert sich die Festigkeit und Dichtigkeit über die Zeit. Allerdings zeigt das hier verwendete Polyamid insbesondere bei einer Konditionierung eine hohe Nachschwindung bzw. Quellung und damit eine Maßvergrößerung [29]. Diese kann sich positiv auswirken, da so die Spalte zwischen den beiden Fügepartnern reduziert werden. Im Folgenden werden daher Untersuchungen zur Konditionierung und Alterung der beiden Verbindungen durchgeführt.

5.4.1 Konditionierung

Die Konditionierung der Probekörper wird gemäß DIN EN ISO 1110 [128] durchgeführt. Es zeigt sich, dass die Proben im vorliegenden Fall nur eine geringe Wasseraufnahme von 0,2 % aufweisen. Die Festigkeit von Verbindung 1 und 2 ist nach der Konditionierung unverändert und das Versagen des Verbundes wird weiterhin durch das Versagen des Rohres initiiert.

Verbindung 1 zeigt mit einem Druckabfall von 35 Pa eine um ca. 15 % verbesserte Dichtigkeit nach der Konditionierung. Es wird vermutet, dass der Kunststoff aufgrund der mit der Wasseraufnahme einhergehenden Volumenänderung auf das Metall aufgepresst wird, ähnlich einer Aufschwindung. Hierdurch werden die Spalte in der Grenzfläche minimiert. Der Druckabfall von Verbindung 2 bleibt dagegen konstant (43 Pa). Da die Messungen jedoch eine hohe Standardabweichung von 9 Pa aufweisen, scheint ein Einfluss ebenfalls möglich zu sein. Dieser wird durch die Konditionierung von undichteren Proben ersichtlich. Dazu werden Proben, die bei der Herstellung einen hohen und einen niedrigen Druckabfall aufweisen, an Luft konditioniert. Wie Abbildung 5.11 zeigt verbessert sich die Dichtigkeit mit zunehmender Lagerdauer und damit Wasseraufnahme. Der Effekt ist bei den dichteren Proben nur sehr gering ausgeprägt, wird bei den undichteren Proben jedoch deutlich signifikanter.

5.4.2 Alterung

Zur Beschreibung der Aufquellung des Kunststoffes bei zusätzlicher chemischer und thermischer Belastung werden Alterungstests durchgeführt. Dabei werden die Probekörper 1000 Stunden in ein 50-50 Wasser-Glyantol (BASF G40) Gemisch bei 120°C eingelagert [129]. Alle Probekörper weisen nach der Langzeitbelastung eine aufgerissene Bindenaht auf, vgl. Abbildung 5.12. Wie bei der Konditionierung kann keine Veränderung der Festigkeit beobachtet werden, da die Rohre weiterhin die schwächste Komponente sind. Der Druckabfall kann trotz gerissener Bindenaht bestimmt werden und liegt bei beiden Verbindungen unverändert bei ca. 41 Pa. Daher kann im untersuchten Fall keine Verschlechterung der Grenzfläche durch die Alterung bestimmt werden. Diese scheint bei beiden Verbindungen unempfindlich gegenüber chemischer und thermischer Langzeitbelastung zu sein. Der Schwachpunkt der Verbindung liegt daher im Kunststoff. Dies wird auch durch die Verwendung eines alterungsbeständigen Kunststoffes ersichtlich. Hierzu werden beide Verbindungen mit dem Polyphthalamid (PPA) Amodel® AS-1933 HS (Datenblatt vgl. Anhang B) umspritzt. Wie Abbildung 5.13 zeigt, weisen die Probekörper nach der Alterung keine Veränderung in der Geometrie oder den Zielgrößen auf.

Die Probekörper aus PA 66 weisen zwar nur einen geringen Druckabfall auf, dennoch ist ersichtlich, dass insbesondere zur Sicherung der Dichtigkeit ein Aufreißen zu vermeiden ist. Die

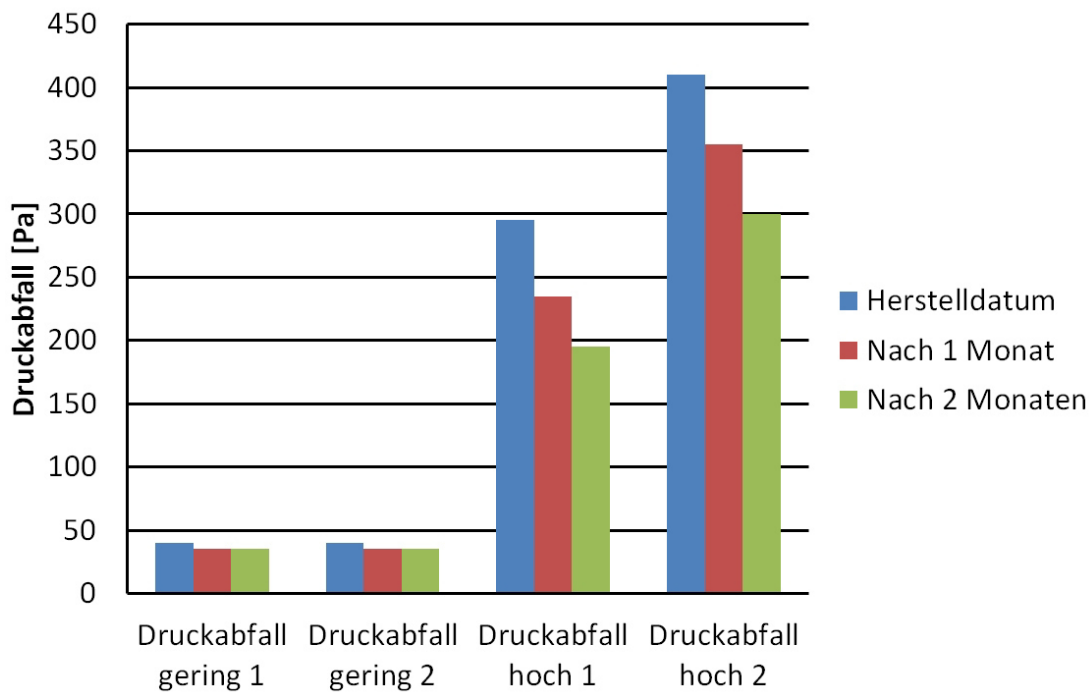


Abbildung 5.11: Ergebnisse der Konditionierung von Verbindung 2 an Luft. Bei längerer Lagerdauer nehmen die Proben Wasser auf, wodurch sich das Volumen des Kunststoffes vergrößert. Dadurch werden Spalte in der Grenzfläche und damit der Druckabfall minimiert. Der Effekt ist bei Proben mit hohem Druckabfall ausgeprägter.

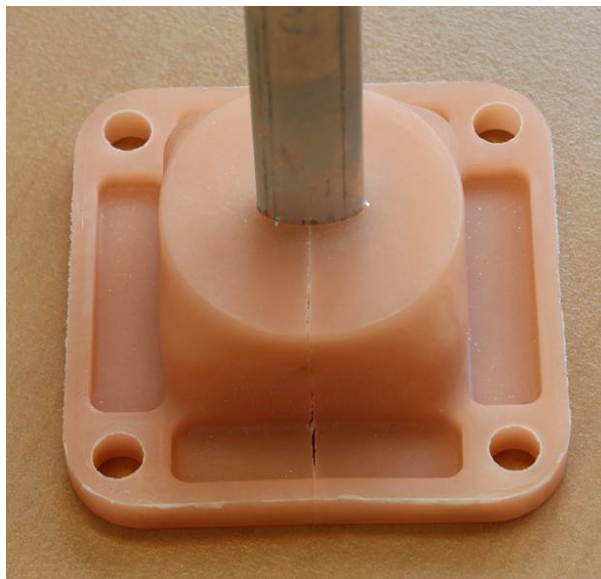


Abbildung 5.12: Probe nach der Alterung. Es ist ein deutliches Aufreißen der Binde-naht zu erkennen.

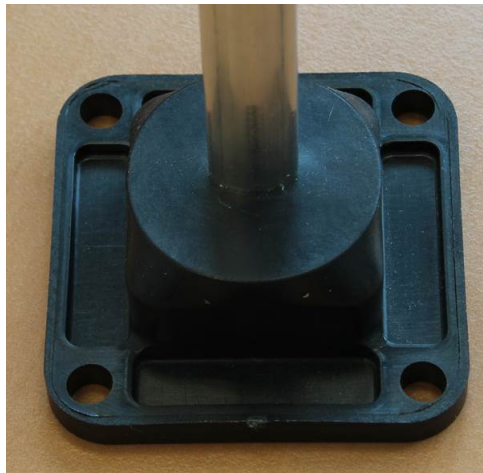


Abbildung 5.13: PPA-Probe nach der Alterung. Es ist keine Veränderung in Farbe, Geometrie oder Zielgrößen zu beobachten.

Bindenaht muss daher verbessert werden. Dies kann durch eine Optimierung des Probekörpers (Abschnitt 5.5) sowie durch eine Optimierung des Spritzgusswerkzeuges und/oder der Prozessparameter (Kapitel 6) erfolgen.

5.5 Minimierung der Kunststoff-Anbindung

Bisher wurde der Kunststoff auf einer Länge von 20 mm mit einer Wandstärke von 4 mm an das Metall gespritzt, vgl. Anhang A. Durch die im Folgenden durchgeführte Reduktion der Länge und Dicke der Anbindung wird überprüft, ob:

- die beobachtete Abdichtung nur aus der Länge der Anbindung (d. h. durch die in Unterabschnitt 4.4.1 vermuteten Labyrinthdichtungen) oder aus der Verbesserung der mechanischen und spezifischen Adhäsion bzw. der formschlüssigen Verklammerung entsteht;
- die Aufschwindung einen Einfluss besitzt;
- das Aufquellen bei der Alterung und damit das Risiko des Reißens der Bindenaht verringert wird.

Im Rahmen der statistischen Versuchsplanung werden Beschreibungsfunktionen ermittelt, die den Dichtigkeits- und Festigkeitsverlauf je nach Größe der Anbindung aufzeigen. Aus diesen kann abgeleitet werden, bis zu welchem Grenzwert eine Minimierung sinnvoll ist. Es werden beide Verbindungen untersucht. Die minimalen Grenzen des Versuchsplans ergeben sich aus der Geometrie von Verbindung 2: Damit diese noch sinnvoll eingebettet werden kann, muss die Anbindung mindestens 7 mm lang und 2 mm dick sein. Aus der aktuellen Geometrie der

Anbindung (Länge 20 mm und Dicke 4 mm) ergibt sich die Obergrenze. Der ermittelte Versuchsplan ist in Anhang C hinterlegt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Beschreibungsfunktionen quadratische Abhängigkeiten aufweisen. Werden allerdings die prognostizierten Zielgrößen bei maximalen und minimalen Abmaßen verglichen, ist ersichtlich, dass diese sich nur unwesentlich unterscheiden. Die prognostizierten Werte werden experimentell verifiziert. Die Faktoren besitzen daher nur einen geringen Einfluss auf die Zielgrößen.

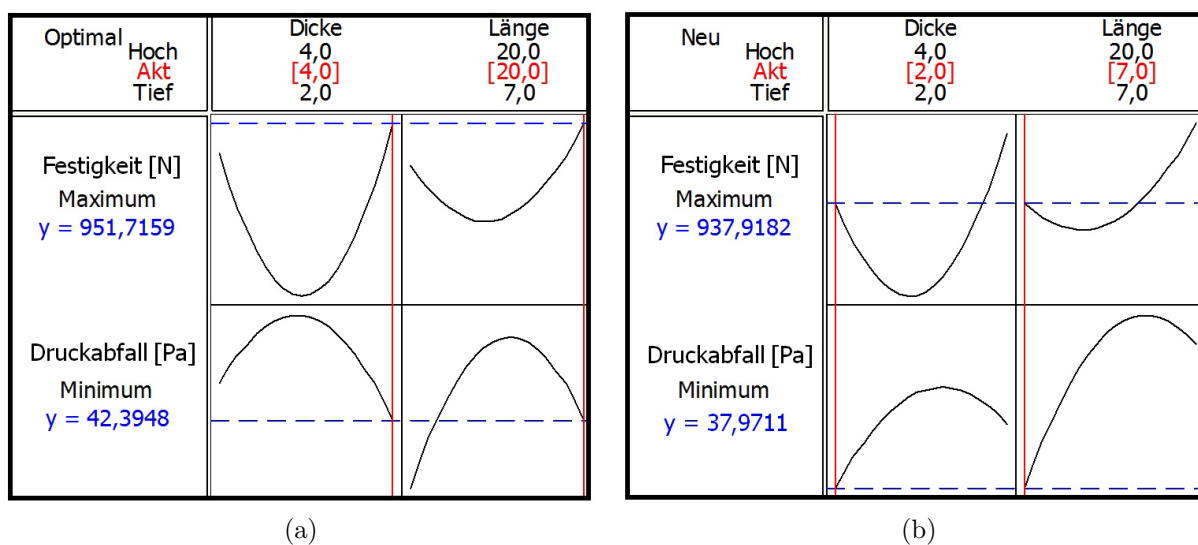


Abbildung 5.14: Beschreibungsfunktionen für die Minimierung der Anbindung: Prognose bei (a) den bisher verwendeten maximalen Abmaßen und (b) minimalen Abmaßen. Die Beschreibungsfunktionen weisen zwar nichtlineare Effekte auf, die Zielgrößen unterscheiden sich jedoch nur unwesentlich voneinander.

Die Bruchflächenanalyse aller Probekörper zeigt, dass die Festigkeit wie bisher durch die Rohre begrenzt wird. Infolgedessen kann durch die Minimierung der Anbindung kein Unterschied beobachtet werden.

Auch die Dichtigkeit wird nur unwesentlich beeinflusst. Das Entstehen von Labyrinthdichtungen und die Aufschwindung scheinen daher nur einen geringen Einfluss aufzuweisen. Die Ergebnisse stehen teilweise im Widerspruch zu den Untersuchungen von Zentgraf [50]: dieser konnte zwar ebenfalls keinen Einfluss der Aufschwindung, aber einen signifikanten Einfluss der Länge detektieren. Es wird vermutet, dass dieser Unterschied in der Verwendung anderer Werkstoffe und damit anderer Werkstoff- und Prozesseigenschaften wie z. B. Wärmeleitfähigkeit des Metalls und Viskosität der Schmelze begründet ist. Bei den hier untersuchten Probekörpern

kann daher gefolgert werden, dass die Abdichtung maßgeblich durch die Modifizierung des Aluminiums (Verbesserung der Adhäsion bzw. formschlüssige Verbindung) entsteht.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die minimale Anbindungsgeometrie ohne Verschlechterung der Zielgrößen verwendet werden kann. Hierdurch wird der benötigte Kunststoff um über 70 % reduziert. Es ist anzumerken, dass bei einer Länge von 7 mm die Makroverformung des Aluminiumrohres bereits geringfügig aus dem Kunststoff herausragt. Obwohl hierdurch kein Einfluss auf die beiden Zielgrößen detektiert werden kann, wird im weiteren Verlauf die Anbindung mit einer Länge von 9 mm und einer Dicke von 2 mm konstruiert. Diese Konstruktion dient als Basis für die erweiterte Anbindung in Kapitel 6 und die Klassifikation der Binde-naht.

Bei der Fertigung der Probekörper mit verkürzter Anbindung werden je nach Geometrie aber bereits ab dem dritten Spritzgusszyklus deutliche Beschädigungen des Probekörpers beobachtet. Wie Abbildung 5.15 zeigt „verrutscht“ das Aluminiumrohr und der Kunststoff verbrennt an der Stirnseite (Dieseeffekt). Abbildung 5.16 veranschaulicht, dass das Verrutschen des Aluminiumrohres durch eine ungewünschten Verformung entsteht und zur Bildung von Rissen führt. Infolgedessen besitzen die Probekörper eine um ca. 50 % verringerte Festigkeit und einen Druckabfall der über der angenommenen Grenzleckage liegt. Mit steigender Zykluszahl wird der Effekt ausgeprägter. Diese Beschädigungen werden bei der Fertigung von Probekörpern mit maximaler Anbindung nicht beobachtet.

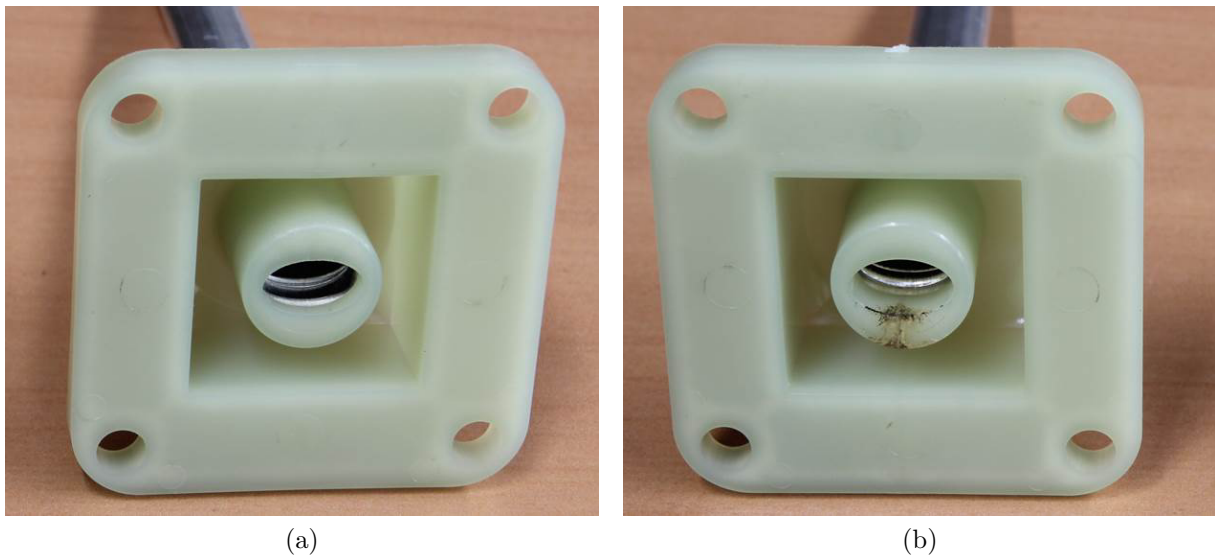


Abbildung 5.15: Beschädigung der verkürzten Probekörper bei der Herstellung: (a) Probe ohne Schäden, (b) dritte hergestellte Probe: es ist ein „Verrutschen“ des Rohres und eine Verbrennung des Kunststoffes zu erkennen.

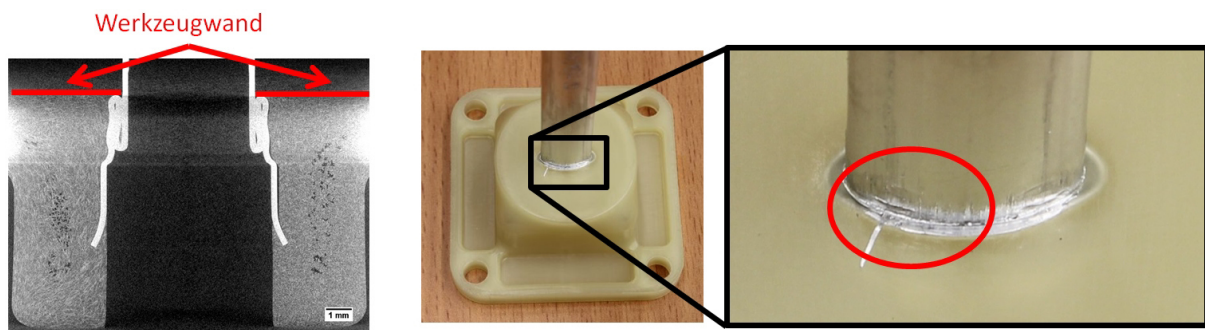


Abbildung 5.16: Beschädigung des Aluminiumrohres bei der Herstellung des minimalen Probekörpers: CT-Aufnahme des „verrutschten“ Rohres (links). Es ist eine ungewollte Umformung zu erkennen. Durch diese wird das Rohr beschädigt (rechts).

Ursache

Da die Spritzgussparameter nicht verändert werden und der Effekt erst nach einigen Probekörpern auftritt, kann die Ursache auf die Temperaturentwicklung in den Werkzeugeinsätzen zurückgeführt werden: diese werden aufgrund der hohen Temperatur der Schmelze erwärmt und durch das kühlere Temperiermedium und die Rüstzeit zwischen zwei Spritzgusszyklen wieder abgekühlt. Kritisch ist dabei die Erwärmung des Kerns, der das Aluminiumrohr gegen die Schmelze abdichtet: Werkzeugwand und Aluminiumrohr weisen zur Entlüftung eine Toleranz von $10 \mu\text{m}$ auf [94]. Dehnt sich nun der Kern infolge einer Erwärmung um mehr als die Toleranz aus, wird das Aluminiumrohr gegen die Werkzeugwand und auf den Kern gedrückt. Dadurch kann beim Spritzgussvorgang die Luft in der Kavität nicht mehr entweichen und es entsteht der beobachtete Dieseleffekt im Kunststoff. Durch die entstehende Presspassung überträgt der Kern zudem eine große Kraft auf das Rohr, wodurch es zur ungewollten Umformung kommt. Der Vergleich der Werkzeugeinsätze zur Herstellung der maximalen und minimalen Anbindung (Abbildung 5.17) zeigt, dass das Volumen des Werkzeugeinsatzes der minimalen Anbindung deutlich größerer ist als das Volumen des Werkzeugeinsatzes der maximalen Anbindung. Daher kann dieser mehr Wärme speichern. Da der Kern weiterhin einen größeren Abstand zur Temperierung besitzt, kann dieser schlechter abkühlen und erreicht nach einigen Zyklen eine kritische Temperatur.

Diese kritische Temperatur des Kerns kann anhand des Wärmeausdehnungskoeffizienten des Werkzeugstahls α_{St} abgeschätzt werden [130]. Mit einem maximalen Kerndurchmesser $L = 10 \text{ mm}$, $\alpha_{St} = 11 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ und einer maximalen Längendehnung ΔL von $10 \mu\text{m}$ ergibt sich der maximale Temperaturunterschied ΔT zu:

$$\Delta T = \frac{\Delta L}{\alpha_{St} \cdot L} = 90,91 \text{ K} \quad (5.1)$$

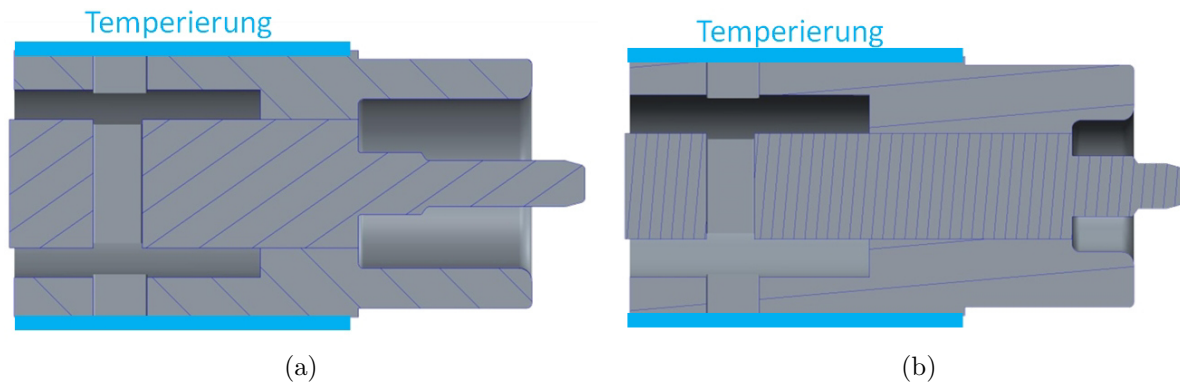


Abbildung 5.17: Vergleich der Werkzeugeinsätze für die (a) maximale und (b) minimale Anbindung: Die Werkzeugeinsätze zur Herstellung der minimalen Anbindung weisen ein deutlich größeres Volumen und der Kern zur Abdichtung des Aluminiumrohres einen größeren Abstand zur Temperierung auf.

Da die Ausgangstemperatur der Werkzeugeinsätze 50 °C (Werkzeugwandtemperatur) beträgt, wird die kritische Ausdehnung ab einer Temperatur von ca. 140 °C erreicht. Zur Verifizierung der Berechnung und Optimierung des Werkzeugeinsatzes wird im Folgenden ein Simulationsmodell aufgestellt.

Simulationsmodell

Für das Simulationsmodell werden folgende Annahmen getroffen: Die Anfangstemperatur des kompletten Werkzeugeinsatzes beträgt 50 °C , d. h. er besitzt die Temperatur des Temperiermediums. Die Oberflächentemperatur des hinteren Endes beträgt konstant 50 °C , da sie direkten Kontakt mit dem Temperiermedium hat. Die Flächen des Werkzeugeinsatzes, die mit der Schmelze in Berührung kommen, werden 5 s mit 150 °C aufgeheizt, vgl. Abbildung 5.18. Anschließend erfolgt die Abkühlung durch freie Konvektion an der Luft für 10 s. Dies ist die Dauer der Rüstzeit (Entnahme des fertigen Probekörpers und Einlegen eines neuen Rohres). Die Wärmeübergangszahlen werden gemäß [130] analytisch abgeschätzt. Der Zyklus wird dreimal wiederholt, da ab der dritten Probe Schädigungen auftraten.

Es werden drei verschiedene Werkzeugeinsätze modelliert: Die Werkzeugeinsätze zur Herstellung der maximalen und minimalen Anbindung sowie eine volumenreduzierte Konstruktion zur Erzeugung der minimalen Anbindung. In diese wird eine Kupferhülse eingesetzt, um einen schnelleren Temperatenausgleich zu ermöglichen.

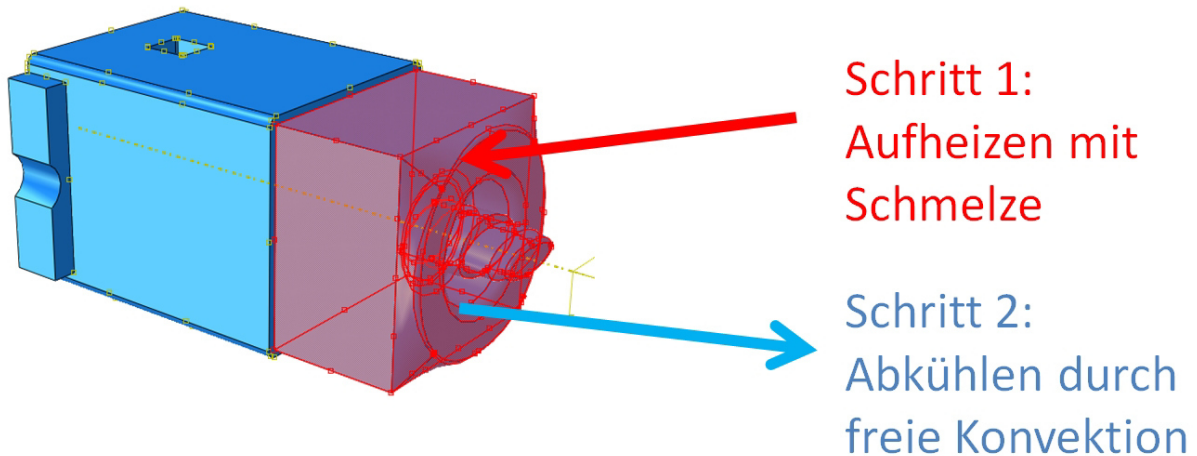


Abbildung 5.18: Simulationsmodell des Werkzeugeinsatzes

Ergebnisse

Abbildung 5.19 zeigt die Ergebnisse der Simulation. Der Werkzeugeinsatz zur Fertigung der maximalen Anbindung weist nur einen geringen Temperaturanstieg auf. Die maximale Temperatur wird bereits bei der zweiten Probe erreicht und bleibt danach konstant. Diese liegt bei ca. 120 °C und ist damit unkritisch. Bei der minimalen Anbindung steigt die Temperatur deutlich steiler an. Bereits die erste Probe besitzt eine Temperatur von ca. 130 °C. Bei den folgenden Zyklen steigt die Temperatur des Einsatzes weiter an und erreicht ca. 140 °C. Infolgedessen dehnt sich der Kern über die Toleranz aus und die oben beobachteten Beschädigungen treten auf. Der volumenreduzierte Werkzeugeinsatz mit Kupferhülse weist dagegen einen flacheren Temperaturanstieg auf. Wie bei der maximalen Anbindung bleibt nach dem ersten Zyklus die maximale Temperatur nahezu konstant. Diese ist zwar ebenfalls erhöht, beträgt aber weniger als 130 °C. Die Volumenausdehnung überschreitet daher nicht die Toleranz.

Abschließend ist anzumerken, dass zur Vermeidung von Beschädigungen neben der Verwendung der volumenreduzierten Konstruktion mit Kupferhülse noch weitere Möglichkeiten existieren: So kann z. B. die Abkühlphase des Werkzeugs verlängert werden. Dadurch entstehen jedoch unnötige Standzeiten. Um diese zu verringern, kann die Konvektion durch ein Gebläse erhöht werden. Die so erreichte Verbesserung des Wärmeübergangskoeffizienten beträgt ca. Faktor 4. Eine weitere Möglichkeit ist es, die Ausdehnung des Werkzeugeinsatzes durch eine Vergrößerung der Toleranz bei der Werkzeugfertigung auszugleichen. Es ist dann allerdings sicherzustellen, dass keine Schmelze durch die vergrößerte Toleranz in das Aluminiumrohr einfließen kann.

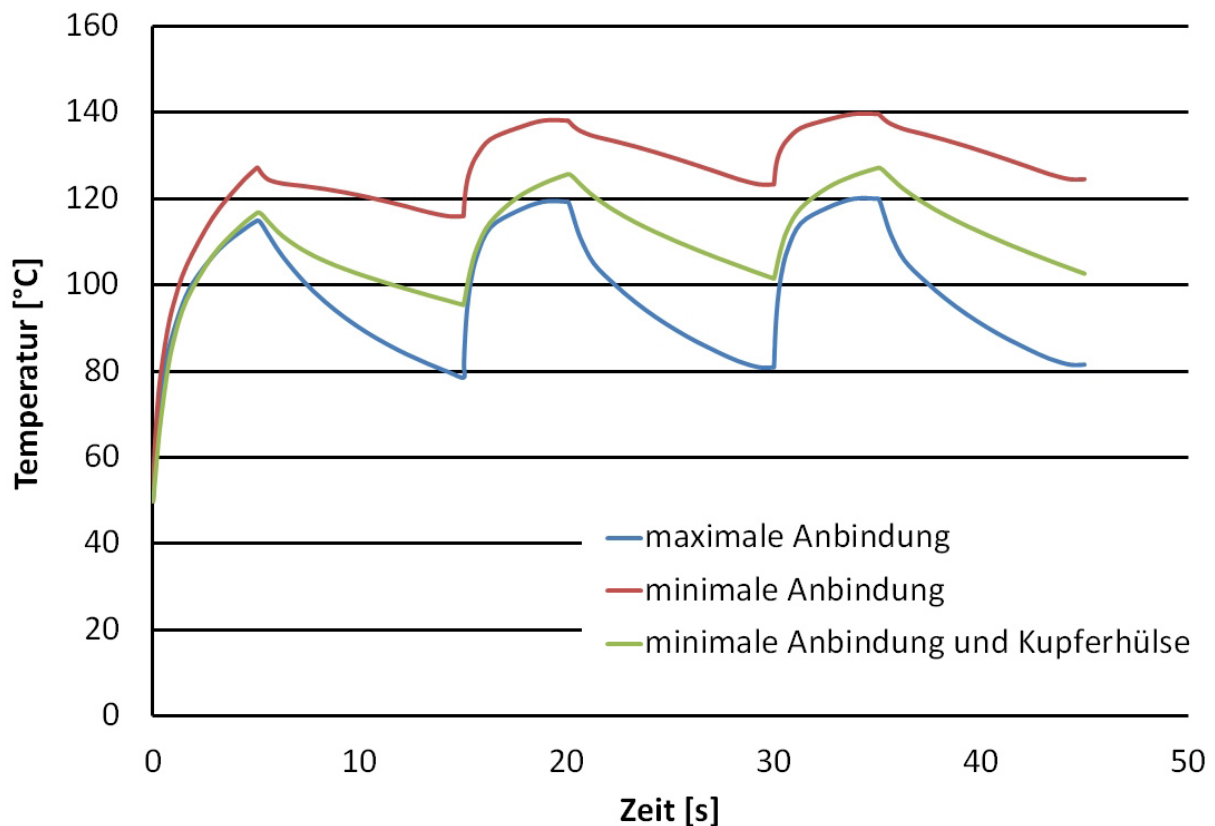


Abbildung 5.19: Ergebnisse der Temperatursimulation der Werkzeugeinsätze

5.6 Vergleich der beiden Vorbehandlungen des Aluminiums

Beide Vorbehandlungen erzielen sehr gute und annähernd gleiche Werte der Zielgrößen. Die durchgeführten Langzeituntersuchungen und die Minimierung der Kunststoffanbindung weisen zudem bei beiden Verbindungen nahezu keinen Einfluss auf. Aufgrund der vorgestellten Ergebnisse sowie der unterschiedlichen Vor- und Nachteile der Vorbehandlungen muss im Hinblick auf weiterführende Anwendungen daher beurteilt werden, welche Modifizierung des Aluminiums für den betrachteten Fall zielführender ist:

- Verbindung 1 (Aufweitung und Oberflächenbearbeitung)

Durch die gezielte Modifizierung der Rauheit der Oberfläche kann eine hohe Festigkeit oder Dichtigkeit der Verbindung erzielt werden. Da allerdings bei der Verbesserung einer Zielgröße die andere verschlechtert wird, kann bei der simultanen Optimierung beider Zielgrößen nur ein Kompromiss erzielt werden. Nachteilig ist zudem die Vorbehandlung der Oberfläche, da diese aufwendige Fertigungsschritte (Strahlen, Reinigen) erfordert.

- Verbindung 2 (Makroverformung zur formschlüssigen Verklammerung)
Durch Verbindung 2 werden beide Zielgrößen gleichzeitig optimiert. Aus den durchgeführten Untersuchungen ist kein Kompromiss der Zielgrößen zueinander erkennbar. Zudem kann die Modifizierung des Aluminiums ohne zusätzliche Fertigungsschritte im Spritzgusswerkzeug durchgeführt werden. Die Kontur ist allerdings nur sehr schwer weiter modifizierbar, so dass keine besseren als die vorliegenden Zielgrößen erreicht werden können.
-

6 Erweiterung des kombinierten Probekörpers

6.1 Zielsetzung und Methode

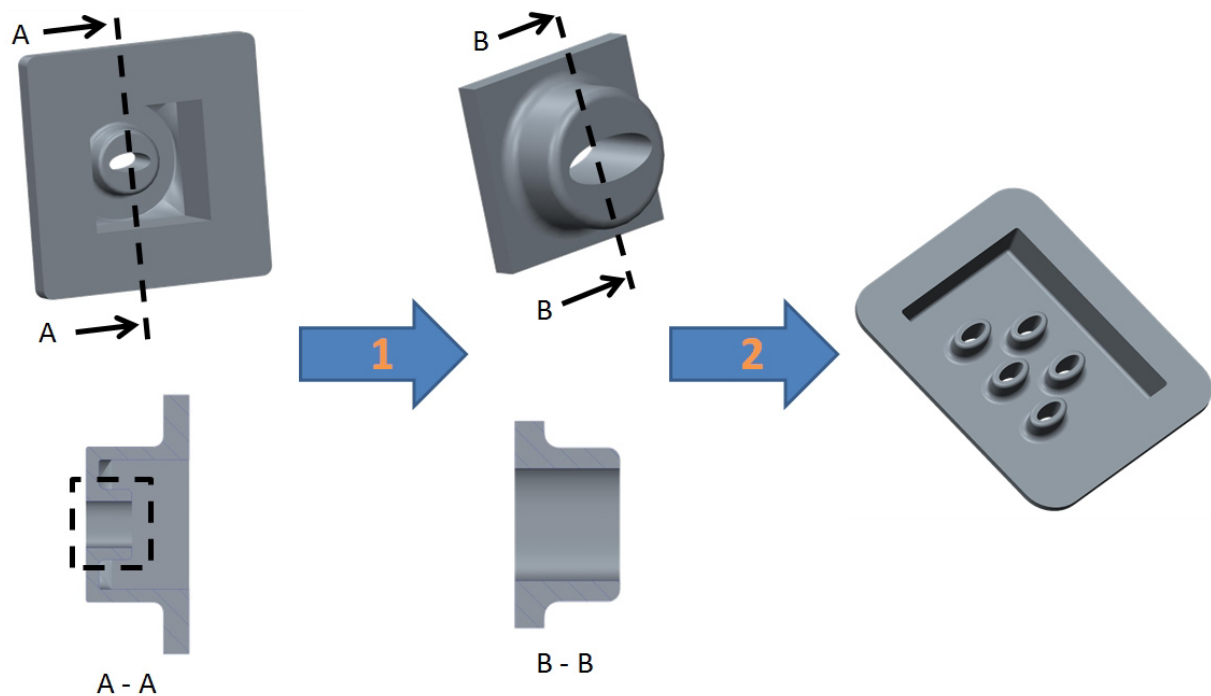
Die bisher erzielten Ergebnisse sind für einen Probekörper mit einer Kunststoff-Metall-Anbindung gültig. Dieser wird im Weiteren als 1-Rohr-Verbund (1RV) bezeichnet. Ausgehend von den Ergebnissen der Minimierung der Kunststoffanbindung wird im Folgenden ein Probekörper entwickelt, der mehrere Anbindungen besitzt. Dazu wird zunächst ein Bauteil mit fünf Aluminiumrohren konstruiert (5-Rohr-Verbund, 5RV). Für dieses Bauteil wird erneut eine Prozessparameteranalyse durchgeführt und experimentell verifiziert. Es wird insbesondere überprüft, wie sich der Druckabfall bei der Umspritzung mehrerer Rohre verändert. Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein Konzept für ein Bauteil mit einer Vielzahl an Anbindungen vorgestellt.

6.2 Simultane Herstellung von fünf Anbindungen in einem Probekörper

6.2.1 Konstruktion, Fertigung und Prüfung des Probekörpers

Abbildung 6.1 zeigt das Vorgehen zur Konstruktion des 5-Rohr-Verbundes: basierend auf dem 1-Rohr-Verbund mit minimaler Anbindung aus Abschnitt 5.5, wird die Geometrie der Anbindung beibehalten, aber der Flansch entfernt. Diese Geometrie wird nun elliptisch geformt und zu einem Verbund mit fünf Anbindungen zusammengesetzt. Zur Prüfung des Probekörpers wird abschließend eine umlaufende Wand mit Flansch hinzugefügt. Wie bereits beim 1RV, werden auch die Radien des 5RV simulativ optimiert, damit bei einer hohen Beanspruchung die Fügefläche nur eine geringe Verformung erfährt und die Dichtigkeit durchgehend gewährleistet ist. Die Zeichnung des 5RV ist in Anhang A hinterlegt. Die Fertigung des 5-Rohr-Verbundes erfolgt analog zu Fertigung des 1-Rohr-Verbundes. Als Vorbehandlung des Aluminiumrohres wird aufgrund des einfacheren Handlings Verbindung 2 verwendet.

Da der Probekörper eine neue Geometrie aufweist, muss erneut eine Prozessparameteranalyse durchgeführt werden. Diese ist zudem erforderlich, da die Zielgrößen verändert werden.



- 1: Aussparen des Flansches und Beibehalten der Anbindungsgeometrie
- 2: Zusammensetzung zu einem Verbund mit fünf Anbindungen und Hinzufügen einer Wand für die Prüfungen

Abbildung 6.1: Vorgehen zur Konstruktion des 5-Rohr-Verbundes (5RV)

Beim 1RV wurde gezeigt, dass die Festigkeit nur durch das Aluminium limitiert und durch die Prozessparameter nicht messbar beeinflusst wird. Daher wird die Festigkeit nicht weiter als Zielgröße betrachtet. Vielmehr wird, aufgrund des signifikanten Einflusses der Spritzgussparameter auf die Bindenaht [29], die Qualität der Bindenaht als Zielgröße hinzugefügt. Wie die Ergebnisse der Alterungsuntersuchungen in Unterabschnitt 5.4.2 zeigen, besteht bei einer nicht optimierten Bindenaht das Risiko des Reißens infolge einer starken Aufquellung. Die Bindenaht wird daher anhand der Geometrieänderung nach einem Bindenahtschnelltest klassifiziert. Dazu werden die in Abbildung 6.2 gezeigten Abmaße des Probekörpers bestimmt. Alle Proben weisen annähernd die gleichen Maße auf. Anschließend werden diese 48 Stunden in Glysantin (BASF G 40) bei 135 °C gelagert [129] und erneut vermessen. Aus den Ergebnissen kann für jede Probe eine mittlere prozentuale Geometrieabweichung bestimmt werden. Diese muss bei der Ermittlung der optimalen Prozessparameter minimiert werden. Als zweite Zielgröße wird wie zuvor die Dichtigkeit (beschrieben durch den Druckabfall) berücksichtigt. Deren Prüfung erfolgt analog zu Unterabschnitt 4.3.4.

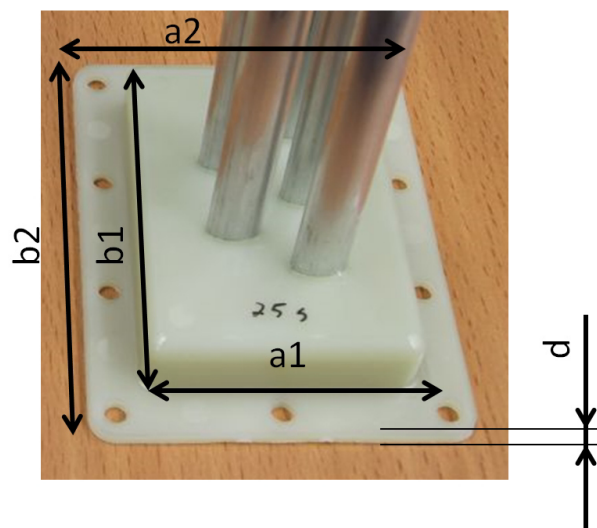


Abbildung 6.2: Maße zur Klassifikation der Geometrieabweichung und damit der Binde-nahtqualität

6.2.2 Prozessparameteranalyse

Die Analyse der Prozessparameter erfolgt wie in Abschnitt 5.3 beschrieben: Zuerst werden in Vorversuchen die Grenzen eines Versuchsplanes bestimmt. In diesen Grenzen wird ein Screening durchgeführt und die signifikanten Faktoren detektiert. Basierend auf den Ergebnissen des Screenings wird ein quadratischer Versuchsplan aufgestellt und ausgewertet. Hieraus können die optimalen Prozessparameter bestimmt werden. Diese werden experimentell verifiziert.

Ermittlung der Grenzen des Versuchsplans

Tabelle 6.1 zeigt die in den Vorversuchen untersuchten Spritzgussparameter und deren ermittelte Grenzen für einen Versuchsplan. Da das Spritzgusswerkzeug zur Fertigung des 5RV auf einem Heißkanal basiert, wird dessen Temperatur als Parameter übernommen. Weiterhin kann die Umfangsgeschwindigkeit im Gegensatz zum 1RV in großen Grenzen variiert werden. Die Einzugstemperatur zeigt dagegen keinen Einfluss und wird nicht weiter betrachtet. Insgesamt ist zu erkennen, dass der 5RV teilweise in anderen Grenzen als der 1RV variiert werden kann. Dies ist in der unterschiedlichen Gestaltung des Probekörpers und des Werkzeugs begründet.

Screening

Der in diesen Grenzen erstellte Versuchsplan zur Durchführung des Screenings ist in Anhang C hinterlegt. Zur Signifikanzanalyse werden die Pareto-Diagramme betrachtet, vgl. Abbildung 6.3. Da aus den Vorversuchen ersichtlich wird, dass die Versuchsschwankung deutlich geringer als beim 1RV ist, wird das α -Risiko auf den Standardwert von 5% [104] reduziert. Es

Spritzgussparameter	Grenzen der Parametereinstellungen
Einspritzvolumenstrom	15 - 50 cm ³ /s
Einspritzdruck	1500 - 2000 bar
Kühlzeit	5 - 25 s
Nachdruckdauer	5 - 25 s
Nachdruckhöhe	500 - 2000 bar
Werkzeugwandtemperatur	70 - 110 °C
Umfangsgeschwindigkeit	15 - 30 m/min
Massetemperatur	300 - 315°C
Heißkanaltemperatur	285 - 310 °C
Staudruck	-50 - 0 bar

Tabelle 6.1: Untersuchte Spritzgussparameter des 5-Rohr-Verbundes und die in den Vorversuchen ermittelten Grenzen der Parametereinstellungen.

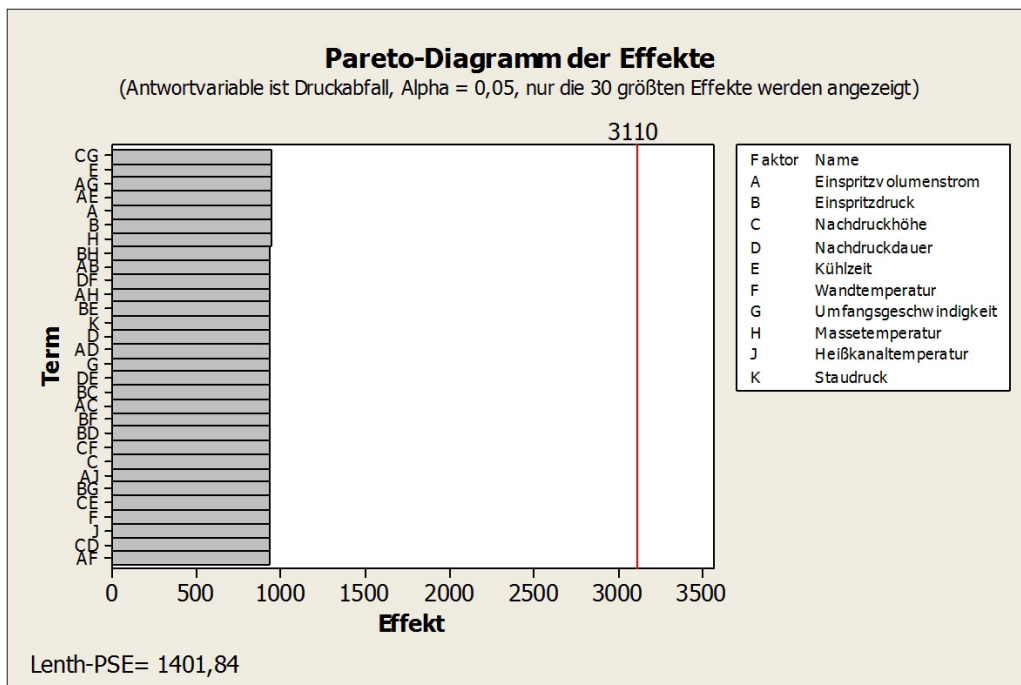
ist zu erkennen, dass alle Parameter den gleichen nicht-signifikanten Einfluss auf den Druckabfall besitzen. Die Geometrieabweichung wird dagegen stark vom Einspritzvolumenstrom und der Umfangstemperatur beeinflusst. Da der gewählte Versuchsplan nur Haupteffekte sicher bestimmen kann, ist die Wechselwirkung Einspritzdruck - Werkzeugwandtemperatur als nicht-signifikant anzunehmen. Aufgrund des geringen Aufwandes des Versuchsplans werden diese beiden Faktoren dennoch ebenfalls untersucht.

Obwohl der gleiche Werkstoff verwendet wird, weisen der 1-Rohr-Verbund und der 5-Rohr-Verbund unterschiedliche signifikante Parameter auf. Dadurch wird erneut die Notwendigkeit einer detaillierten Prozessparameteranalyse bei anderer Geometrie des Kunststoffprobekörpers, anderer Konstruktion des Werkzeugs und/oder unterschiedlichen Zielgrößen ersichtlich.

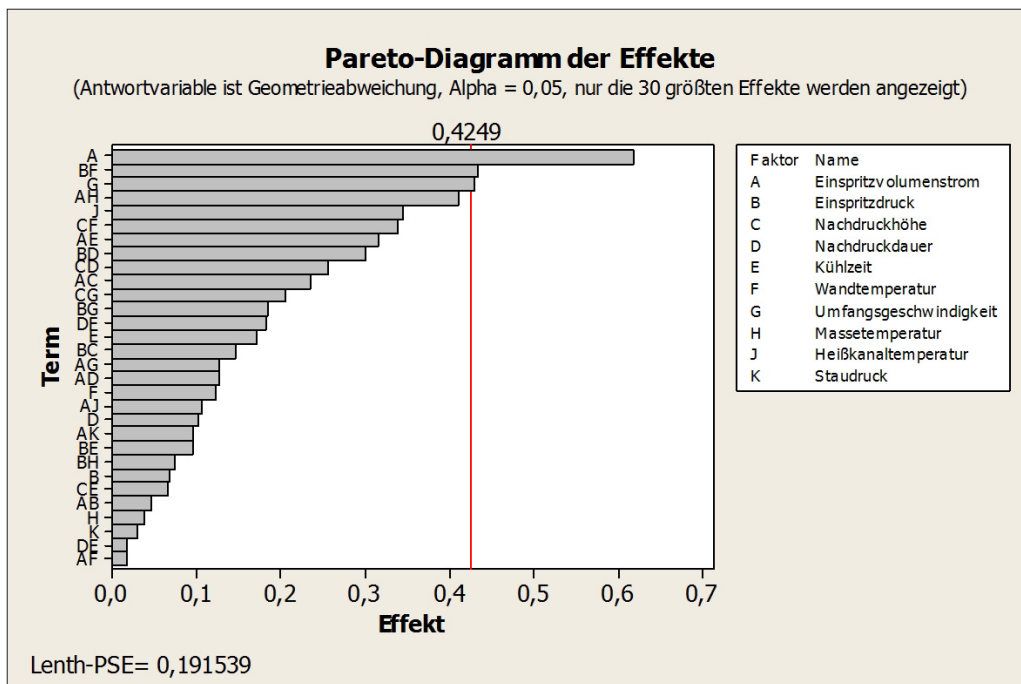
Quadratischer Versuchsplan und Bestimmung der optimalen Parameter

Der Versuchsplan, der aus diesen vier signifikanten Parametern ermittelt wird, findet sich in Anhang C. Abbildung 6.4 zeigt die ermittelten Beschreibungsfunktionen. Wie beim 1RV weisen alle Parameter einen nichtlinearen Verlauf auf und der Einspritzvolumenstrom besitzt den signifikantesten Einfluss auf die Zielgrößen. Dies wurde auch bereits im Pareto-Diagramm ersichtlich, da dieser den größten standardisierten Effekt aufwies. Diese Beobachtung stimmt zudem mit dem Stand der Technik überein, da zur Verbesserung von Bündenähten ein hoher Einspritzvolumenstrom empfohlen wird [29]. Die Werkzeugwandtemperatur und der Einspritzdruck, deren Wechselwirkungen als nicht-signifikant angenommen wurden, besitzen auch den geringsten Einfluss auf die Zielgrößen.

Die prognostizierten Zielgrößen werden mit experimentellen Probekörpern verifiziert. Der Druckabfall bei diesen Probekörpern betrug 52 Pa, die Geometrieabweichung 0,85 %. In Alterungs-



(a)



(b)

Abbildung 6.3: Pareto-Diagramme der beiden Zielgrößen: (a) Dichtigkeit und (b) Geometrieabweichung. Durch die Wahl von Auflösungsstufe IV des Versuchsplans [104] können nur Haupteffekte sicher bestimmt werden.

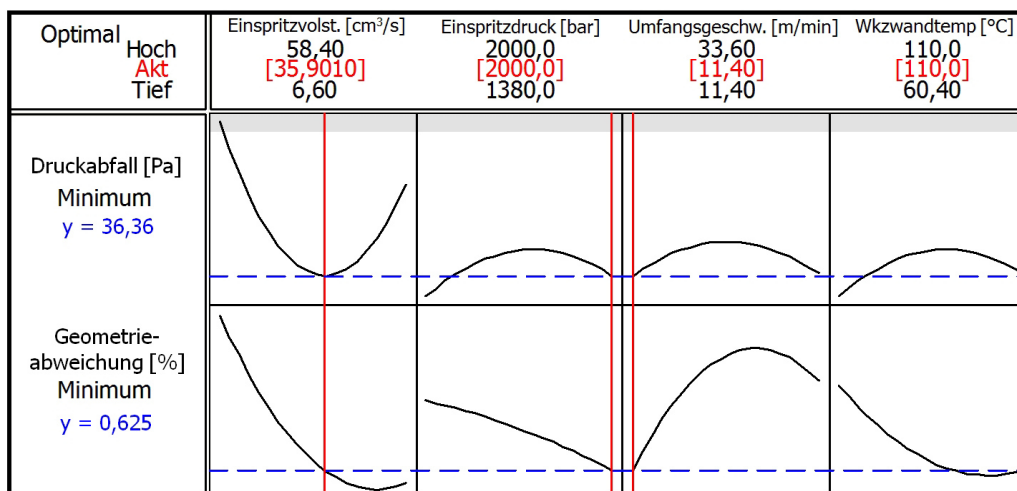


Abbildung 6.4: Beschreibungsfunktionen für die signifikanten Prozessparameter: Darstellung der maximalen und minimalen Einstellungen (schwarz), der optimalen Einstellungen (rot) und der prognostizierten Werte der Zielgröße (blau).

tests kann zudem kein Aufreißen der Bindenaht beobachtet werden. Die Abweichungen vom prognostizierten Wert liegen im Rahmen der Standardabweichung. Es ist anzumerken, dass für beide Zielgrößen Prozessparametereinstellungen existieren, bei denen sie einen besseren Wert erzielen können. Die weitere Optimierung einer Zielgröße führt jedoch zur Verschlechterung der jeweils anderen. Die als optimal berechneten Parameter erzielen daher den besten Kompromiss.

6.2.3 Vergleich 1-Rohr-Verbund und 5-Rohr-Verbund

Zur Analyse, wie sich der Druckabfall bei der Umspritzung von einem oder fünf Rohren verändert, wird ein zusätzlicher 1-Rohr-Probekörpers konstruiert. Dieser besitzt nahezu dieselbe Anbindungsgeometrie um das Aluminiumrohr wie der 5RV (vgl. Anhang A). Anschließend wird der Druckabfall bei beiden Probekörpern gemessen und verglichen.

Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse der Prüfungen: bei optimalen Parametern ist der Druckabfall beim 5-Rohr-Verbund leicht erhöht. Die Durchführung der Dichtprüfung des 5RV unter Wasser zeigt, dass alle Anbindungen ungefähr gleich dicht sind. Es wird gefolgert, dass sich die Leckage auf die einzelnen Anbindungen verteilt. Folglich entsteht keine Verfünffachung des Druckabfalls. Da allerdings mehr Grenzflächen und damit mehr Spalte (durch die ein Medium entweichen kann) existieren, ist der Druckabfall im Vergleich zum 1-Rohr-Verbund erhöht. Ferner besitzt eine Verschmutzung (z.B. Fett) der Oberfläche beim 5-Rohr-Verbund größere Auswirkungen, da sich der negative Effekt der Verschmutzung summiert.

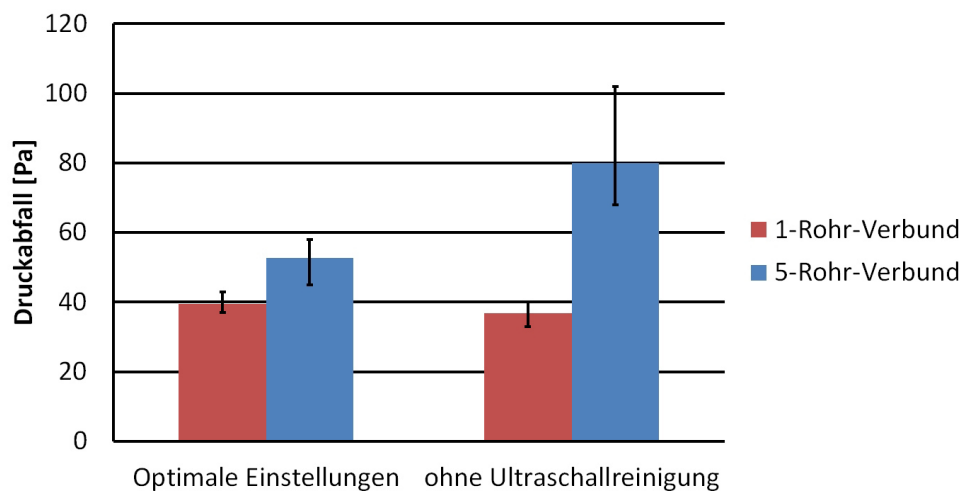


Abbildung 6.5: Vergleich des Druckabfalls beim 1-Rohr-Verbund und 5-Rohr-Verbund bei optimalen Parametereinstellungen und ohne Ultraschallreinigung der Rohre vor dem Umspritzen. Beide Probekörper weisen nahezu dieselbe Anbindungsgeometrie um das Aluminiumrohr auf.

6.3 Konzept eines Bauteils mit einer Vielzahl von Anbindungen

Anhand der vorgestellten Ergebnisse kann ein mediendichter, fester und alterungsbeständiger Probekörper mit fünf Kunststoff-Metall-Anbindungen gefertigt werden. Soll nun die Anzahl der Anbindungen vergrößert werden, entsteht je nach Anzahl und Lage der Anbindungen ein Kunststoffteil mit großen Abmaßen. Abbildung 6.6 zeigt beispielhaft eine Verlängerung des 5-Rohr-Probekörpers mit insgesamt 50 Anbindungen. Dieses Bauteil weist einige Nachteile auf z. B. eine große Schwindung [131], die Notwendigkeit großer Spritzgusswerkzeuge etc.

Daher wird zur Fertigung eines Bauteils mit einer Vielzahl an Anbindungen und Vermeidung dieser Nachteile ein Konzept entwickelt, dass auf einem modularen Aufbau basiert. Aus der Bionik ergibt sich der Ansatz, den Probekörper der menschlichen Wirbelsäule nachzuempfinden:

- Als „**Wirbel**“ dient der 5-Rohr-Verbund. Dieser wird wie zuvor hergestellt.
- Zur Herstellung der „**Bandscheibe**“ werden mehrere der 5-Rohr-Verbunde (Module) in eine zweite, größere Spritzgussmaschine eingelegt und mit Kunststoff geringer Steifigkeit (z. B. Elastosil® LR 3074/60 A/B, vgl. Anhang B.) umspritzt. Abbildung 6.7 zeigt dies beispielhaft. Alternativ können die Module auch mit Polyurethan oder Silikon umgossen werden.

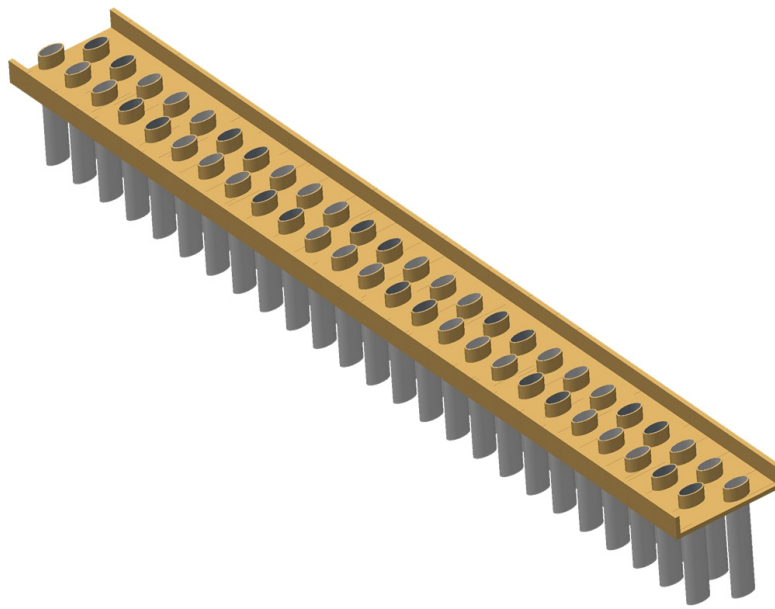


Abbildung 6.6: Konzept eines Bauteils mit 50 Kunststoff-Metall-Anbindungen, basierend auf der Verlängerung des 5-Rohr-Probekörpers. Dieses Bauteil weist entscheidende Nachteile auf z. B. eine sehr große Schwindung.

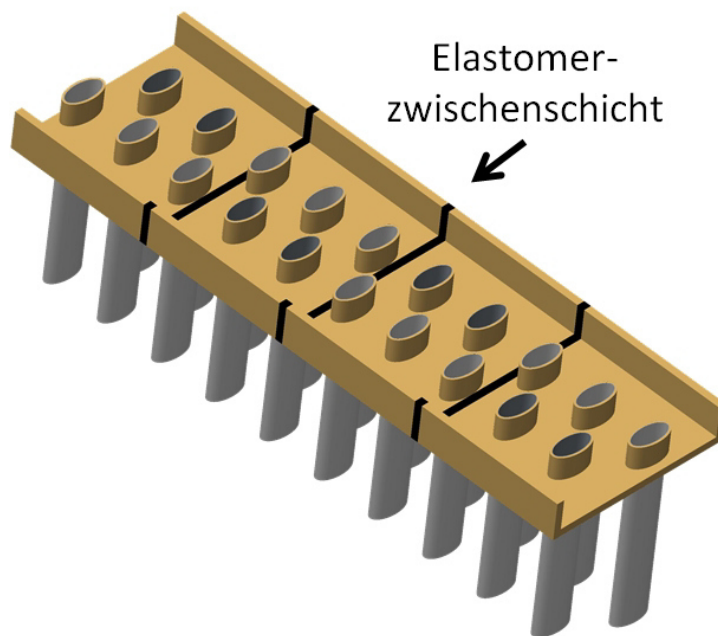


Abbildung 6.7: Bionischer Ansatz „Wirbelsäule“ zur Herstellung eines Bauteils mit mehreren Anbindungen. Durch das Konzept werden die Nachteile eines großen Kunststoffbauteils ausgeglichen.

Durch den modularen Aufbau sind die einzelnen Module elastisch gelagert, wodurch schwingende Belastungen aufgefangen werden können. Weiterhin ergibt sich durch die geringe Bauteilgröße der einzelnen Module eine geringere Fertigungskomplexität (z. B. eine deutlich verringerte Schwindung). Zudem ist die Fertigung deutlich flexibler, da bei einem fehlerhaften Bauteil nur ein Modul entsorgt werden muss. Nachteilig ist hingegen die Notwendigkeit eines zusätzlicher Fertigungsschrittes. Zudem ist ein Festigkeitsnachweiß der Kunststoffzwischenschicht für die Betriebsdauer des Bauteils erforderlich. Dennoch ermöglicht dieser modulare Aufbau, ein Bauteil mit einer nahezu beliebigen Anzahl an Anbindungen herzustellen.

6.4 Zusammenfassung

Basierend auf den vorgestellten Ergebnissen kann ein mediendichtes Bauteil mit einer oder mehreren Kunststoff-Metall-Anbindungen gefertigt werden. Der letzte Schritt ist daher die Überprüfung der Upscale-Fähigkeit. Dies ist jedoch nicht mehr Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wird eine mediendichte und feste Kunststoff-Metall-Verbindung im In-Mould Assembly (IMA) entwickelt. Da insbesondere die Vorgänge an der Grenzfläche zwischen den beiden Fügepartnern von Interesse sind, werden zunächst die grundlegenden chemischen, physikalischen und prozesstechnischen Eigenschaften einer Kunststoff-Metall-Verbindung analysiert. Es zeigt sich, dass zur Fertigung einer Verbindung mit hoher Qualität eine Oberflächenmodifizierung des Metalls zielführend ist. Durch diese kann die zugrunde liegende mechanische und spezifische Adhäsion verbessert werden. Da eine Vielzahl an Vorbehandlungen existiert, werden Vorversuche durchgeführt. Soll primär die Dichtigkeit verbessert werden, kann die Vorbehandlung mit einer Ätzung oder einer Plasmabehandlung erfolgen. Sollen dagegen die Festigkeit und die Dichtigkeit optimiert werden, empfiehlt sich das Aufrauen der Oberfläche durch Strahlen mit einem abrasiven Strahlmittel, z. B. mit Edelmetall. Um detailliert die Umspritzung einer aufgerauten Oberfläche sowie deren Verhalten unter Last zu beschreiben, werden die beiden Zielgrößen anfangs getrennt voneinander untersucht.

Zunächst wird der Stand der Technik zur Optimierung der Festigkeit einer IMA-Verbindungen betrachtet. Da jedoch in der Literatur nur wenige Ergebnisse vorhanden sind, werden auch Ergebnisse aus der Klebforschung auf den konkreten Fall übertragen. Sowohl bei geklebten Verbunden, als auch bei IMA-Verbunden ist die Verbundfestigkeit und die Bruchart von der Festigkeit des Kleb- oder Kunststoffes sowie der Ausprägung des Oberflächeneffektes und der Kerb- und Dickeneffekte 1 & 2 abhängig. Die Ausprägung dieser Effekte nimmt mit größerer Rauheit der Metalloberfläche zu. Hieraus kann eine theoretische Rauheits-Festigkeitskurve für geklebte Verbunde abgeleitet werden: Die Festigkeit nimmt mit steigender Rauheit bis zu einem Maximum zu und die Proben versagen adhäsiv. Bei höheren Rauheiten und dem Auftreten von Misch- und Kohäsionsbrüchen sinkt die Festigkeit jedoch. Durch die Entwicklung von Probekörpern und die Durchführung von Untersuchungen kann eine solche Kurve auch für IMA-Verbunde entwickelt werden: Bei geringen Rauheiten weist der IMA-Verbund einen ähnlichen Kurvenverlauf auf. Bei hohen Rauheiten und kohäsivem Versagen steigt die Festigkeit jedoch erneut an. Dies ist darin begründet, dass die Effekte, die einen schädlichen Einfluss auf eine geklebte Verbindung besitzen, beim IMA-Verbund nicht existieren oder geringer ausgeprägt sind. Weiterhin weist der verwendete Kunststoff eine höhere Festigkeit auf übliche Klebstoffe.

Als Ursprung des Versagens wird die mikro-mechanische Verankerung bestimmt. Die Entwick-

lung eines numerischen Simulationsmodells kann diese Aussage verifizieren. Zudem erlaubt dieses Modell die Prognose der Versagenswahrscheinlichkeit, der Verbundfestigkeit sowie der Bruchart. Die durchgeführten Versuche zeigen weiterhin, dass die maximale Verbundfestigkeit durch eine Werkstoffkerbe an der Fügestelle limitiert wird und daher ein verfrühtes kohäsives Versagen eintritt. Die Ursache liegt in der unterschiedlichen Querkontraktion der beiden Fügepartner.

Bei der Untersuchung der Mediendichtigkeit werden, analog zu den Festigkeitsuntersuchungen, ebenfalls Probekörper mit unterschiedlichen Rauheiten geprüft und eine Rauheits-Dichtigkeitskurve entwickelt. Es wird beobachtet, dass mit zunehmender Rauheit die Dichtigkeit des Verbundes linear abnimmt. Dies ist in der Entstehung ungefüllter Oberflächenstrukturen auf der Metalloberfläche begründet. Durch die entstehenden Spalte entweicht ein Medium infolge des Kapillareffektes. Neben der Aufrauung der Oberfläche werden punkt- und linienförmige Laserstrukturen untersucht. Da eine Vielzahl von Geometrien erzeugt werden kann, wird die Methode der statistischen Versuchsplanung angewendet. So kann mit geringem Versuchsaufwand der Einfluss verschiedener Geometrien beschrieben werden. Die Ergebnisse zeigen einerseits, dass zur Erzeugung der Mediendichtigkeit eine minimale bzw. maximale Größe der Punkt- und Linienstrukturen nicht unter- bzw. überschritten werden darf. Ansonsten werden die Strukturen nicht mehr vollständig mit Kunststoff gefüllt und/oder der positive Effekt der Laserstrukturierung reduziert. Folglich reduziert sich die Dichtigkeit. Andererseits wird ersichtlich, dass keine weitere Verbesserung der Abdichtung im Vergleich zu einer abrasiven Oberflächenbehandlung erreicht werden kann.

Die Untersuchungen der einzelnen Optimierungen lassen erkennen, dass mit groben Strahlmitteln eine sehr gute Festigkeit, mit feinen Strahlmitteln dagegen eine sehr gute Dichtigkeit erzielt wird. Da, wie der Verlauf der Rauheits-Festigkeitskurve zeigt, auch bereits bei geringen Rauheiten hohe Festigkeiten erzielt werden, wird zur Herstellung einer Verbindung mit hoher Festigkeit und Dichtigkeit eine geringe Oberflächenrauheit verwendet. Die simultane Optimierung ist daher zwar ein Kompromiss der beiden Zielgrößen, der aber dessen ungeachtet die Fertigung einer festen und dichten Verbindung ermöglicht. Die zusätzliche Analyse einer makro-mechanischen Verklammerung des Metalls im Kunststoff führt zu nahezu den gleichen Werten der Zielgrößen.

Zur weiteren Optimierung wird eine Prozessparameteranalyse des Spritzgussprozesses durchgeführt. Aufgrund der Vielzahl an Spritzgussparametern wird auch hier die Methode der statistischen Versuchsplanung eingesetzt. So können zunächst die signifikanten Prozessparameter detektiert und diese dann detaillierter untersucht werden. Zur Überprüfung der dauerhaften Funktionalität der Verbindung werden die Probekörper konditioniert und gealtert. Die Konditionierung zeigt einen positiven Einfluss, da infolge der Wasseraufnahme und des damit verbun-

denen Aufquellens des Probekörpers Spalte zwischen den Fügepartnern geschlossen werden. Die chemische Alterung bei erhöhter Temperatur führt jedoch zum Reißen der Bindaht. Eine weitere Untersuchung zielt auf die Minimierung der Anbindung des Kunststoffes an das Metall. Es zeigt sich, dass trotz signifikanter Reduktion der Anbindung die Zielgrößen unverändert bleiben. Die Dichtigkeit und Festigkeit der Verbindung hängt daher maßgeblich von der Modifizierung des Metalls ab.

Basierend auf diesen Ergebnissen wird ein Probekörper mit fünf Kunststoff-Metall-Verbindungen entwickelt. Aufgrund der Ergebnisse der Alterung wird bei diesem zusätzlich die Qualität der Bindaht betrachtet. Der Probekörper wird mit der Spritzgussparameteranalyse soweit optimiert, dass kein Reißen der Bindaht mehr auftritt. Der Vergleich der Mediendichtigkeit zwischen einem Probekörper mit einer Verbindung und einem Probekörper mit fünf Verbindungen zeigt, dass der Druckabfall bei fünf Verbindungen nur gering vergrößert ist. Dies ist darin begründet, dass mehr Spalte existieren, durch die ein Medium entweichen kann. Da sich der Druck des Mediums allerdings auf die fünf Anbindungen verteilt, entsteht keine Verfünffachung des Druckabfalls. Abschließend wird ein Konzept entwickelt, das durch einen modularen Aufbau die Herstellung eines Probekörpers mit einer Vielzahl an Kunststoff-Metall-Verbindungen ermöglicht. Hierbei werden mehrere Probekörper mit fünf Anbindungen hergestellt und anschließend durch einen elastischen Kunststoff zu einem großen Probekörper verbunden.

Soll der Probekörper nun als eine industrielle Komponente appliziert werden, ist in weiteren Untersuchungen zunächst eine Prüfung von dessen Upscale-Fähigkeit erforderlich. Wird zusätzlich eine Vielzahl an Verbindungen gefordert, ist zudem die experimentelle Überprüfung des modularen Konzeptes erforderlich.

Zusammenfassend ermöglichen die vorgestellten Ergebnisse die Fertigung eines Probekörpers mit mehreren, über die Lebensdauer festen und mediendichten Kunststoff-Metall-Verbindungen. Im Vergleich zu herkömmlichen Fügeverfahren, wie z. B. Kleben oder Löten, werden aufgrund der Gewichts- und Kostenersparnis, der Vereinfachung des Fertigungsprozesses, des einfacheren Materialrecyclings und der möglichen Integration von Zusatzfunktionen oder Bauteilen im Kunststoff neuartige und wirtschaftliche Produkte ermöglicht. Die Ergebnisse können z. B. bei der Produktneugestaltung oder bei der Materialsubstitution (Leichtbau) zum Einsatz kommen.

Literaturverzeichnis

- [1] ENDEMANN, Ulrich ; GLASER, Stefan ; VÖLKER, Martin: Kunststoff und Metall im festen Verbund. In: *Kunststoffe* 92 (2002), Nr. 11, S. 110–113
 - [2] EHRENSTEIN, Gottfried W. ; EHRENSTEIN, Gottfried W. (Hrsg.): *Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik*. Carl Hanser Verlag, 2004
 - [3] FEDLER, Marius: Standards für die Dichtigkeiten beim Umspritzen von Einlegeteilen. In: *K-Impulse* 36 (2006), Nr. 6
 - [4] HABENICHT, Gerd: *Kleben - Grundlagen, Technologie, Anwendung*. Bd. 4. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2002
 - [5] GRUJICIC, M. ; SELLAPPAN, V. ; OMAR, M. ; OBIEGLO, N. SeyN. S. ; ERDMANN, M. ; HOLZLEITNER, J.: An overview of the polymer-to-metal and direct- adhesion hybrid technologies for load- bearing automotive components. In: *J. Mater. Process. Technol.* 197 (2008), S. 363– 373
 - [6] POISSON, C. ; HERVAIS, V. ; LACRAMPE, M.F. ; KRAWCZAK, P.: Optimization of PE/binder/PA extrusion blow-molded films. II. Adhesion properties improvement using binder/EVA blends. In: *J. Appl. Polym. Sci.* 101 (2006), Nr. 1, S. 118–127
 - [7] QIN, R.Y. ; SCHREIBER, H.P.: Adhesion at partially restructured polymer surfaces. In: *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects* 156 (1999), Nr. 1-3, S. 85–93
 - [8] POSSART, Wulff ; POSSART, Wulff (Hrsg.): *Adhesion – Current Research and Application*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2005
 - [9] ACHEREINER, Frédéric: *Verbesserung von Adhäsionseigenschaften verschiedener Polymerwerkstoffe durch Gasphasenfluorierung*, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2009
 - [10] SCHINDEL-BIDINELLI, E.H. ; GUTHERZ, W.: *Konstruktives Kleben*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1988
 - [11] BISCHOF, C. ; POSSART, W.: *Adhäsion - Theoretische und experimentelle Grundlagen*. Akademie Verlag, 1983
-

-
- [12] MACBAIN, W. ; HOPKINS, D.G.: In: *J. Phys. Chem.* 29 (1925), 88 S.
- [13] LEEDEN, M.C. van d. ; FRANS, G.: Surface Properties of Plastic Materials in Relation to Their Adhering Performance. In: *Adv. Eng. Mater.* 4 (2002), Nr. 5, S. 280–289
- [14] BROCKMANN, W.: Reaktivität und Morphologie von Metalloberflächen als Basis für ein Modell der Adhäsion. In: *Farbe und Lack* 86 (1980), Nr. 9, S. 420–425
- [15] AWAJA, F. ; GILBERT, M. ; KELLY, G. ; FOX, B. ; PIGRAM, P.: Adhesion of polymers. In: *Prog. Polym. Sci.* 34 (2009), S. 948– 968
- [16] BALDAN, A.: Adhesion phenomena in bonded joints. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 38 (2012), S. 95–116
- [17] POPOV, Valentin: *Kontaktmechanik und Reibung*. Bd. 2. Springer Verlag, 2009
- [18] BRUYNE, N.A. de: The nature of adhesion. In: *Aircraft Engineer* 18 (1939), Nr. 12, S. 51–54
- [19] KINLOCH, A.J.: The science of adhesion. In: *J. Mater. Sci.* 15 (1980), Nr. 9, S. 2141–2166
- [20] YANG, S. ; GU, L. ; GIBSON, R. F.: Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures. In: *Compos. Struct.* 51 (2001), Nr. 1, S. 63–71
- [21] VOYUTSKII, S.S. ; VAKULA, V.L.: The role of diffusion phenomena in polymer-to-polymer adhesion. In: *J. Appl. Polym. Sci.* 7 (1963), Nr. 2, S. 475–491
- [22] BROCKMANN, W. ; HENNEMANN, O.-D. ; KOLLEK, H. ; MATZ, Ch.: Adhäsion in Aluminiumklebungen des Flugzeugbaus. In: *International Journal of Adhesion and Adhesives* 6 (1986), S. 115–143
- [23] SHARPE, L.H. ; SCHONBORN, H.: Surface Energetics, Adhesion and Adhesive Joints. In: *Advan. Chem. N.Y. Ser.* 43 (1964), S. 189–201
- [24] FOWKES, F.M. ; MITTAL, K.L. (Hrsg.): *Physicochemical Aspects of Polymer Surfaces*. Bd. 2. Plenum Press: New York, 1983
- [25] BIKERMAN, J.J.: The science of adhesive joints. In: *New Yory, Academic Press* (1961)
- [26] FOWKES, F.M.: Role of Acid-Base Interfacial Bonding in Adhesion. In: *J. Adhes. Sci. Technol.* 1 (1987), Nr. 1, S. 7–27
-

-
- [27] DIN 8593-0: *Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines: Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. 2003
- [28] FLOCK, D.: *Wärmeleitungsfügen hybrider Kunststoff-Metall-Verbindungen*, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Diss., 2011
- [29] JOHANNABER, F. ; MICHAELI, W.: *Handbuch Spritzgießen*. Bd. 2. Carl Hanser Verlag, 2004
- [30] BAUR, E. ; BRINKMANN, S. ; OSSWALD, T. ; SCHMACHTENBERG, E.: *Saechtling Kunststoff-Taschenbuch*. Bd. 30. Carl Hanser Verlag, 2007
- [31] http://kunststoff-marktplatz.de/Kunststoff_News_24527_DuPont_Kapazitaetserweiterung_bei_Hochleistungspolyamiden?nmax=100&kat=&nmin=2000
- [32] PAUL, Hanna ; LUKE, Michael ; HENNING, Frank: Kunststoff-Metall-Hybridverbunde - Experimentelle Untersuchungen zum Verformungs- und Versagensverhalten. In: *Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology* 10 (2014), Nr. 4, S. 118–141
- [33] MALEK, T.: Leichter als Stahl. In: *Kunststoffe* 3 (2010), S. 80–84
- [34] RIEKE, J.: Präzise gespritzt. Kunststoff-Funktionsteile mit Outsert-Technik auf Metallplatinen. In: *KEM* 33 (1996), Nr. 8, S. 96–97
- [35] SEMLER, S. ; FALLENBECK, W.: Montage ohne zu montieren. In: *Plastverarbeiter* (2010)
- [36] ZHAO, G.: *Spritzgegossene, tragende Kunststoff-Metall-Hybridstrukturen*, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 2001
- [37] <http://www.kunststoff-magazin.de/fvk-werkstoffe/aluminium-kunststoff-hybrid-geht-in-die-serienproduktion.htm>
- [38] GOLDBACH, H. ; HOFFNER, J.: Hybridbauteile in der Serienfertigung. In: *Kunststoffe* 87 (1997), Nr. 9, S. 1133
- [39] BROCKMANN, W. ; DORN, L. ; KÄUFER, H.: *Kleben von Kunststoffen mit Metall*. Springer Verlag, 1989
- [40] DIN EN 13887: *Strukturklebstoffe Leitlinien für die Oberflächenvorbehandlung von Metallen und Kunststoffen vor dem Kleben Deutsche Fassung EN 13887:2003*. 2003
-

-
- [41] DAVID, E. ; LAZAR, A.: Adhesive bonding between aluminium and polytetrafluoroethylene. In: *J. Mater. Process. Technol.* 143- 144 (2003), S. 191– 194
- [42] BERGMANN, J. ; STAMBKE, M.: Potential of laser- manufactured polymer- metal hybrid joints. In: *Physics Procedia* 39 (2012), S. 84– 91
- [43] POTENTE, H.: *Fügen von Kunststoffen: Grundlagen, Verfahren, Anwendung*. Carl Hanser Verlag, 2004
- [44] ABIBE, A. ; ARMANICO-FILHO, S. ; SANTOS, J. ; JR., E. H.: Mechanical and failure behaviour of hybrid polymer- metal staked joints. In: *Mater. Des.* 46 (2013), S. 338– 347
- [45] GRUJICIC, M. ; SELLAPPAN, V. ; KOTRIKA, S. ; ARAKERE, G. ; OBIEGLO, Andreas ; ERDMANN, Marc ; HOLZLEITNER, Jochen: Suitability analysis of a polymer-metal hybrid technologie based on high-strength steels and direct polymer-to-metal adhesion for use in load-bearing automotive body-in-white applications. In: *J. Mater. Process. Technol.* 209 (2009), S. 1877–1890
- [46] LUCCHETTA, G. ; MARINELLO, F. ; BARIANI, P.: Aluminium sheet surface roughness correlation with adhesion in polymer metal hybrid overmolding. In: *CIRP annals - Manufacturing Technology* 60 (2011), S. 559– 562
- [47] FABRIN, P. ; HOIKKANEN, M. ; VUORINEN, J.: Adhesion of Thermoplastic Elastomer On Surface Treated Aluminium by Injection Molding. In: *Polym. Eng. Sci.* 47 (2007), Nr. 8, S. 1187–1191
- [48] RAMANI, K. ; MORIARTY, B.: Thermoplastic Bonding to Metal Via Injection Molding for Macro- Composite Manufacture. In: *Polym. Eng. Sci.* 38 (1998), May, S. 870– 877
- [49] MITSCHANG, Peter ; VELTHUIS, Rudi ; EMRICH, Stefan ; KOPNARSKI, Michael: Induction Heated Joining of Aluminum and Carbon Fiber Reinforced Nylon 66. In: *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 00 (2009), S. 1–35
- [50] ZENTGRAF, Thomas: Mediendichtes Umspritzen von Einlegeteilen aus Metall und Keramik / SKZ - Das Kunststoff Zentrum. 2011 (1). – Abschlussbericht
- [51] BERRY, D. H. ; NAMKANISORN, A.: Fracture Toughness of a Silane Coupled Polymer-Metal Interface: Silane Concentration Effects. In: *J. Adhes.* 81 (2005), Nr. 3-4, S. 347–370
-

- [52] PLEUDEMANN, E. P.: Silane Coupling Agents. In: *Plenum Press, New York* (1991)
- [53] MOHSENI, M. ; MIRABEDINI, M. ; HASHEMI, M. ; THOMPSON, G.: Adhesion performance of an epoxy clear coat on aluminium alloy in the presence of vinyl and amino-silane primers. In: *Prog. Org. Coat.* 57 (2006), S. 307– 313
- [54] BOERIO, F. ; SHAH, P.: Adhesion of Injection Molded PVC to Steel Substrates. In: *The Journal of Adhesion* 81 (2005), S. 645– 675
- [55] SASAKI, H. ; KOBAYASHI, I. ; SAI, S. ; OMOTO, T. ; MORI, K.: Direct adhesion of nylon resin to stainless steel plates coated with triazine thiol polymer by electropolymerization during injection-molding. In: *Jpn. J. Poly. Sci. Tech.* 55 (1998), Nr. 8, S. 470–476
- [56] QIU, J. ; SAKAI, E. ; LEI, L. ; TAKARADA, Y. ; MURAKAMI, S.: Improving the shear strength by silane treatment of aluminium for direct joining of phenolic resin. In: *J. Mater. Process. Technol.* 212 (2012), S. 2406– 2412
- [57] MIKLAVEC, M ; KLEMENC, J. ; KOSTANJEVEC, A. ; FAJDIGA, M.: Fatigue strength of a hybrid joint formed between a PA6- GF60 polymer matrix and a S420MC steel insert. In: *Mater. Des.* 51 (2013), S. 493–500
- [58] FREY, Philipp ; HEINLE, Martina ; LEISEN, Christoph ; DRUMMER, Dietmar ; MERKLEIN, Marion: Embossing of Metal Inserts for Subsequent Assembly Injection Moulding of Media Tight Electronic Systems. In: *Key Eng. Mater.* 639 (2015), S. 99–106
- [59] UEHLA, M. ; SPÄTH, H.: *Deutsches Patent 19854707C2: Rohr, insbesondere Metallrohr, mit Verbindungsstück aus Kunststoff sowie dessen Verwendung.* Patent, Februar 2001
- [60] DIGBY, R. P. ; PACKHAM, D. E.: Pretreatment of aluminium: topography, surface chemistry and adhesive bond durability. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 15 (1995), S. 61–71
- [61] LUNDER, Otto: *Chromate-free pre-treatment of aluminium for adhesive bonding*, Norwegian University of Science and Technology, Diss., 2003
- [62] KIM, Won-Seock ; YUN, Il-Han ; LEE, Jung-Ju ; JUNG, Hee-Tae: Evaluation of mechanical interlock effect on adhesion strength of polymer-metal interfaces using micro-patterned surface. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 30 (2010), S. 408–417
- [63] PROLONGO, S. G. ; URENA, A.: Effect of surface pre-treatment on the adhesive strength of epoxy-aluminium joints. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 29 (2009), S. 23–31
-

- [64] WAN, Kai-Tak ; PRIMA, A. D. ; YE, Lin ; MAI, Yiu-Wing: Adhesion of nylon-6 on surface treated aluminium substrates. In: *J. Mater. Sci.* 31 (1996), S. 2109–2116
- [65] BORSELLINO, C. ; BELLA, G. D. ; RUISI, V. F.: Adhesive joining of aluminium AA6082: The effects of resin and surface treatment. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 29 (2009), S. 36–44
- [66] CRITCHLOW, G. W. ; BREWIS, D. M.: Influence of surface macroroughness on the durability of epoxide-aluminium joints. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 15 (1995), S. 173–176
- [67] HARRIS, A. F. ; BEEVERS, A.: The effects of grit-blasting on surface properties for adhesion. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 19 (1999), S. 445–452
- [68] BYSKOV-NIELSEN, J. ; BOLL, J. ; HOLM, A. ; HOJSHOLT, R. ; BALLING, P.: Ultra-high-strength micro-mechanical interlocking by injection molding into laser-structured surfaces. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 30 (2010), S. 485– 488
- [69] ROESNER, A. ; SCHEIK, S. ; OLOWINSKY, A. ; GILLNER, A. ; REISGEN, U. ; SCHLESER, M.: Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids. In: *Physics Procedia* 12 (2011), S. 370– 377
- [70] SPADARO, Chiara ; SUNSERI, Carmelo ; DISPENZA, Clelia: Laser surface treatments for adhesion improvement of aluminium alloys structural joints. In: *Radiat. Phys. Chem.* 76 (2007), S. 1441–1446
- [71] GRISHIN, A. ; KNOSPE, A. ; BUSKE, C.: Application of PLASMAPLUS plasma coating technology for hybrid polymer- metal components in the automotive industry. In: *SPE electronic conference*, 2013, S. 4– 9
- [72] BISCHOF, C.: ND-Plasmatechnik im Umfeld der Haftungsproblematik bei Metall-Polymer-Verbunden. In: *Mat.-wiss u. Werkstofftech.* 24 (1993), S. 33–41
- [73] DAYSS, E. ; LEPS, G. ; MEINHARDT, J.: Surface modification for improved adhesion of a polymer- metal compound. In: *Surf. Coat. Technol.* 116- 119 (1999), S. 986– 990
- [74] DRUMMER, D. ; SCHMACHTENBERG, E. ; HÜLDER, G. ; MEISTER, S.: MK²- A novel assembly injection molding process for the combination of functional metal surfaces with polymer structures. In: *J. Mater. Process. Technol.* 210 (2010), S. 1852– 1857
- [75] CRITCHLOW, G. W. ; BREWIS, D. M.: Review of surface pretreatments for aluminium alloys. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 16 (1996), S. 255–275
-

- [76] BYSKOV-NIELSEN, J. ; HOLM, A. ; HOJSHOLT, R. ; SÁ, P. ; BALLING, P.: Testing the permeability and corrosion resistance of micro- mechanical interlocked joints. In: *Applied Physics A: Materials Science & Processing* 104 (2011), S. 975– 979
- [77] FEDLER, Marius: Erzielung mediendichte Verbände beim Umspritzen von Einlegeteilen. In: *1. Märkischer Werkstofftag*, 2008, S. 1–21
- [78] SHAHID, M. ; HASHIM, S. A.: Effect of surface roughness on the strength of cleavage joints. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 22 (2002), S. 235–244
- [79] WEGMAN, R.F. ; BODNAR, M.J. ; LEVI, D.W.: *US Patent H284 H: Non-carcinogenic, non-polluting sulfuric acid etchants for preparing aluminum surfaces for adhesive bonding*. Patent. <http://www.google.com/patents/USH284> Version: 1987
- [80] <http://www.oberflaeche.com/strahlverfahren/glasperlen-strahlen-essen.html>
- [81] *DIN EN ISO 4287: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit (ISO 4287:1997 + Cor 1:1998 + Cor 2:2005 + Amd 1:2009); Deutsche Fassung EN ISO 4287:1998 + AC:2008 + A1:2009*. 2010
- [82] AMADA, Shigeyasu ; YAMADA, Hiroshi: Introduction of fractal dimension to adhesive strength evaluation of plasma-sprayed coatings. In: *Surf. Coat. Technol.* 78 (1996), S. 50–55
- [83] UEHARA, Kunio ; SAKURAI, Mitsuru: Bonding strength of adhesives and surface roughness of joined parts. In: *J. Mater. Process. Technol.* 127 (2002), S. 178–181
- [84] SEKERCIOGLU, Tezcan ; RENDE, Hikmet ; GÜLSÖZ, Alper ; MERAN, Cemal: The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical components. In: *J. Mater. Process. Technol.* 142 (2003), S. 82–86
- [85] MECKELBURG, H.: Beanspruchungsarten und Dimensionierungsgrundlagen von Metallklebverbindungen. In: *Ind.-Anz.* 86 (1964), S. 2226–2234
- [86] BASIN, V. E.: Advances in understanding the adhesion between solid substrates and organic coatings. In: *Prog. Org. Coat.* 12 (1984), Nr. 3, S. 213–250
- [87] CHEN, M.-A. ; LI, H.-Z. ; ZHANG, X.-M.: Improvement of shear strength of aluminium-polypropylene lap joints by grafting maleic anhydride onto polypropylene. In: *Int. J. Adhes. Adhes.* 27 (2007), Nr. 3, S. 175–187
-

-
- [88] *DIN EN 1465: Klebstoffe – Bestimmung der Zugscherfestigkeit von Überlappungskle-
bungen; Deutsche Fassung EN 1465:2009.* 2009
- [89] *DIN 50125: Prüfung metallischer Werkstoffe – Zugproben.* 2009
- [90] *DIN EN ISO 527-2: Kunststoffe – Bestimmung der Zugeigenschaften – Teil 2: Prüf-
bedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:2012); Deutsche Fassung EN
ISO 527-2:2012.* 2012
- [91] RASCHE, Manfred: Der Zugscherversuch in der Klebtechnik. In: *Adhäsion* 11 (1990),
S. 36–43
- [92] SCHLIEKELMANN, R.J.: *Metallkleben - Konstruktion und Fertigung in der Praxis.* DVS,
1971
- [93] *DIN EN 15870: Klebstoffe – Bestimmung der Zugfestigkeit von Stumpfkle-
bungen (ISO 6922:1987modifiziert); Deutsche Fassung EN 15870:2009.* 2008
- [94] MENGES, G. ; MICHAELI, W. ; MOHREN, P.: *Spritzgießwerkzeuge: Auslegung, Bau,
Anwendung.* Bd. 6. Hanser, 2007
- [95] *DIN EN ISO 4288: Geometrische Produktspezifikationen (GPS) Oberflächenbeschaffen-
heit: Tastschnittverfahren Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbe-
schaffenheit (ISO 4288 : 1996) Deutsche Fassung EN ISO 4288 : 1997.* 1998
- [96] *DIN EN ISO 10365: Klebstoffe Bezeichnung der wichtigsten Bruchbilder.* 1995
- [97] SCHRICKER, Klaus ; STAMBE, Martin ; BERGMANN, Jean P. ; BRÄUTIGAM, Kevin ;
HENCKELL, Phillip: Macroscopic Surface Structures for Polymer-Metal Hybrid Joints
manufactured by Laser Based Thermal Joining. In: *Physics Procedia* 56 (2014), S.
782–790
- [98] DASSAULT SYSTEMS (Hrsg.): *Abaqus/CAE User's Manual.* Abaqus 6.12. Providence,
RI, USA: Dassault Systems, 2012
- [99] MENGES, G. ; HABERSTROH, E. ; MICHAELI, W. ; SCHMACHTENBERG, E.: *Menges
Werkstoffkunde Kunststoffe.* Bd. 6. Carl Hanser Verlag, 2011
- [100] GROTE, K.-H. (Hrsg.) ; FELDHUSEN, J. (Hrsg.): *Dubbel: Taschenbuch für den Ma-
schinenbau.* Bd. 23. Springer Verlag, 2011
-

-
- [101] HEINLE, Christoph ; VETTER, Martina ; BROCKA-KRZEMINSKA, Zaneta ; EHRENSTEIN, Gottfried ; DRUMMER, Dietmar: Mediendichte Materialverbunde in mechatronischen Systemen durch Montagespritzguss. In: *Zeitschrift Kunststofftechnik / Journal of Plastics Technology* 5 (2009), Nr. 6, S. 428 – 450
- [102] SAILER, C.: Schliffbilder ComRad - umgeformte Rohre / MAHLE Behr GmbH. 2014. – Interner Bericht
- [103] PAULI, A.: GFH Applikationsbericht / GFH GmbH. 2013. – Interner Bericht
- [104] SIEBERTZ, Karl ; BEBBER, David van ; HOCHKIRCHEN, Thomas: *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [105] BYSKOV-NIELSEN, J. ; BALLING, P.: Laser structuring of metal surface: Micro-mechanical interlocking. In: *Appl. Surf. Sci.* 255 (2009), S. 5591– 5594
- [106] *DIN EN 1779: Zerstörungsfreie Prüfung, Dichtheitsprüfung, Kriterien zur Auswahl von Prüfmethode und -verfahren; Deutsche Fassung EN 1779 : 1999*. 1999
- [107] *DIN EN 13184: Zerstörungsfreie Prüfung, Dichtheitsprüfung, Druckänderungsverfahren; Deutsche Fassung EN 13184:2001*. 2001
- [108] *DIN EN 1330-8: Zerstörungsfreie Prüfung, Terminologie, Teil 8: Begriffe für die Dichtheitsprüfung; Dreisprachige Fassung EN 1330-8 : 1998*. 1998
- [109] F.FINCK: Prüfnorm AR. 00239 Abschnitt 3.2.1 / MAHLE Behr GmbH. 2011. – Interner Bericht
- [110] <http://www.drwiesner.de/grundlagen/grenzwerte.html>
- [111] HOISCHEN, H. ; FRITZ, A. (Hrsg.): *Hoischen: Technisches Zeichnen: Grundlagen, Normen, Beispiele, Darstellende Geometrie. Fachbuch*. Bd. 35. Cornelsen, 2016
- [112] STEINHILPER, W. ; SAUER, B. ; SAUER, B. (Hrsg.): *Konstruktionselemente des Maschinenbaus* 2. Bd. 7. Springer Verlag, 2012
- [113] QUIRIN, S.: *Untersuchungen zur Anwendbarkeit zerstörungsfreier Prüfung zur Charakterisierung intrinsischer Fügestellen von Aluminium-Kunststoff-Hybridbauteilen*, Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Leichtbausysteme, Masterarbeit, 2013
- [114] HERING, M.: *Angewandte statistische Optik in der Weißlicht-Interferometrie: Räumliches Phasenschieben und Einfluss optisch rauer Oberflächen*, Universität Heidelberg, Diss., 2007
-

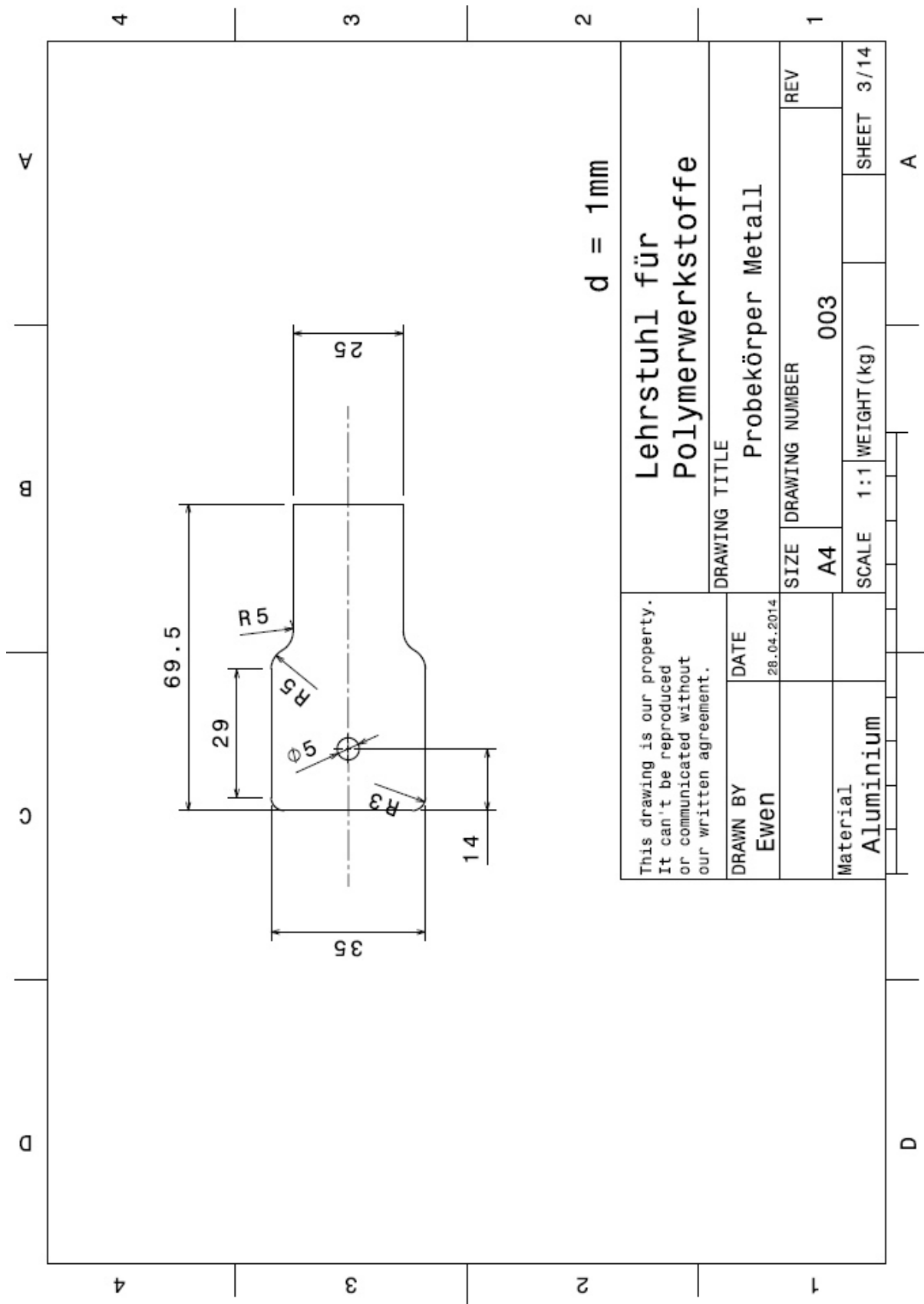
-
- [115] BASTIAN, Martin ; HEIDMEYER, Peter ; ZENTGRAF, Thomas ; POPP, Manfred: Beim Umspritzen dicht gemacht. In: *Plastverarbeiter* (2012)
- [116] ASHBY, M. F. ; JONES, D. R. H. ; HEINZELMANN, M. (Hrsg.): *Werkstoffe 2: Metalle, Keramiken und Gläser, Kunststoffe und Verbundwerkstoffe*. Bd. 3. Spektrum, 2007
- [117] LAMMINGER, B. ; GÖRLICH, R. / Goerlich Kunststofftechnik GmbH. 2013. – Interner Bericht
- [118] BONPAIN, B. ; DAUBITZER, N. ; GÖRLICH, R. ; HERRMANN, H. G. ; MOSER, M. ; QUIRIN, S. ; SAILER, C. ; SAUTTER, N. ; STOMMEL, M. ; WIEBELT, A. ; RAIBLE, D. ; SCHALL, V.: *Verfahren zum Herstellen einer Anordnung mit einem Rohrkörper und einem Bauteil*. Deutsches Patent DE 10 2014 219 308 A1, März 2016
- [119] OETTEL, H. (Hrsg.) ; SCHUHMANN, H. (Hrsg.): *Metallografie - Mit einer Einführung in die Keramografie*. Bd. 15. Wiley-VCH, 2004
- [120] ALISTER, A. J. ; MURRAY, J. L.: The (Al-Mn) Aluminum-Manganese System. In: *Bulletin of Alloy Phase Diagrams* 8 (1987), Nr. 5
- [121] N.N. / Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren IZfP. 2014. – Interner Bericht
- [122] REINERT, U. ; BLASCHKE, H. ; BROCKSTIEGER, U.: *Technische Statistik in der Qualitätssicherung - Grundlagen für Produktions- und Verfahrenstechnik*. Springer Verlag, 1998
- [123] *Einführung in Minitab 16. : Einführung in Minitab 16*
- [124] LENTH, R.: Lenth's Method for the Analysis of Unreplicated Experiments. (2006)
- [125] LARNTZ, K.: Use of replication in almost unreplicated factorials.
- [126] ARBURG (Hrsg.): *Betriebsanleitung für Maschinenummer 209042*. 2013
- [127] EWEN, S.: *Einfluss der Oberflächenbehandlung auf die Festigkeit und Dichtheit von Kunststoff-Metall-Verbunden*, Universität des Saarlandes, Lehrstuhl für Polymerwerkstoffe, Masterarbeit, 2015
- [128] *DIN EN ISO 1110: Kunststoffe Polyamide Beschleunigte Konditionierung von Probekörpern (ISO 1110 : 1995) Deutsche Fassung EN ISO 1110 : 1997*. 1998
-

- [129] N.N.: Gütenorm zur Lagerung von Kunststoffen in Betriebsmittel / MAHLE Behr GmbH. – Interner Bericht
- [130] CHEMIEINGENIEURWESEN, VDI-Gesellschaft V. (Hrsg.): *VDI-Wärmeatlas*. Bd. 11. Springer Verlag, 2013
- [131] BASF: Verzugsverhalten von faserverstärkten Spritzgussteilen. 2014. – Technische Information
-

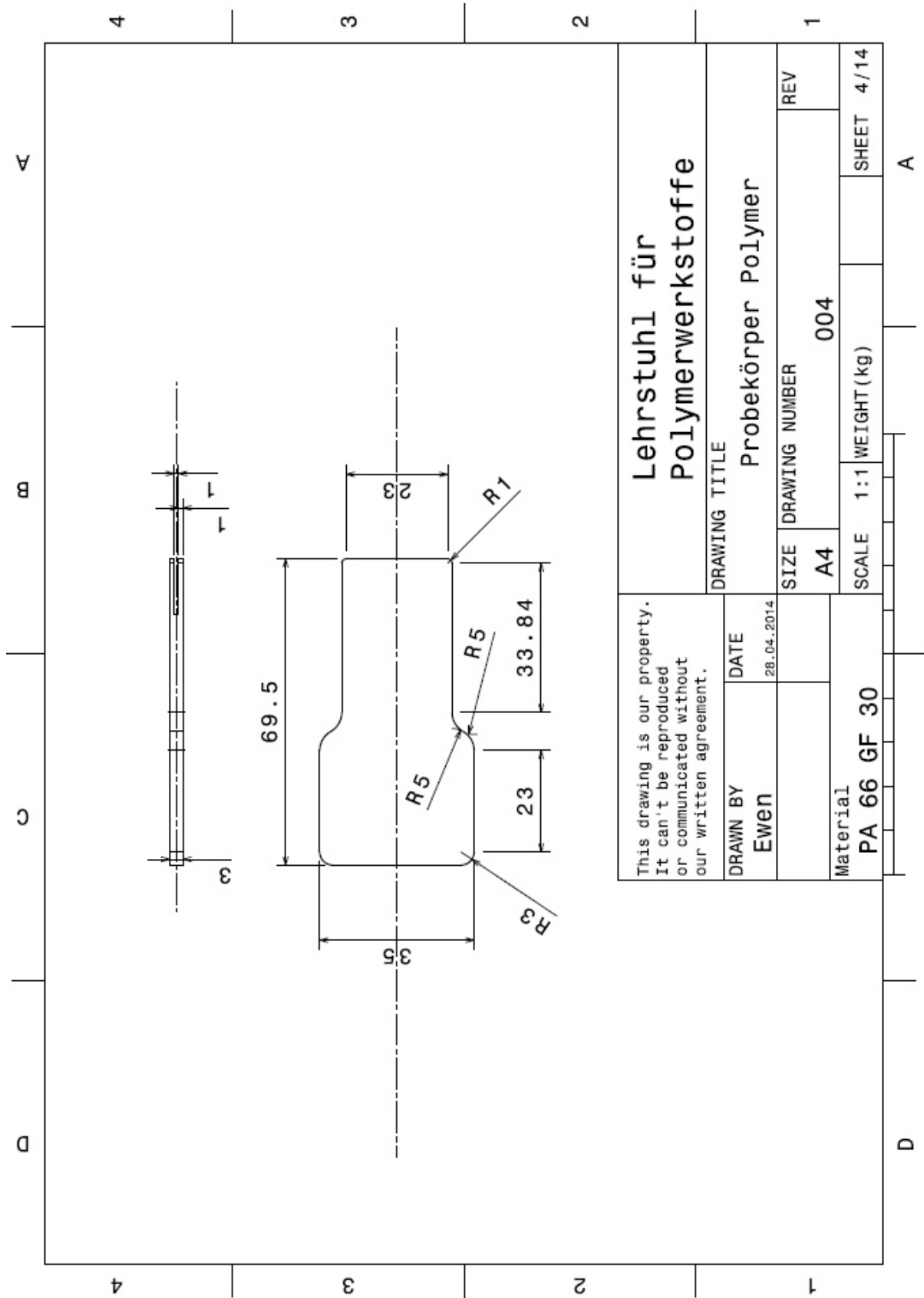
Anhang A: Technische Zeichnungen

In Anhang A werden die für die Arbeit relevanten technischen Zeichnungen vorgestellt:

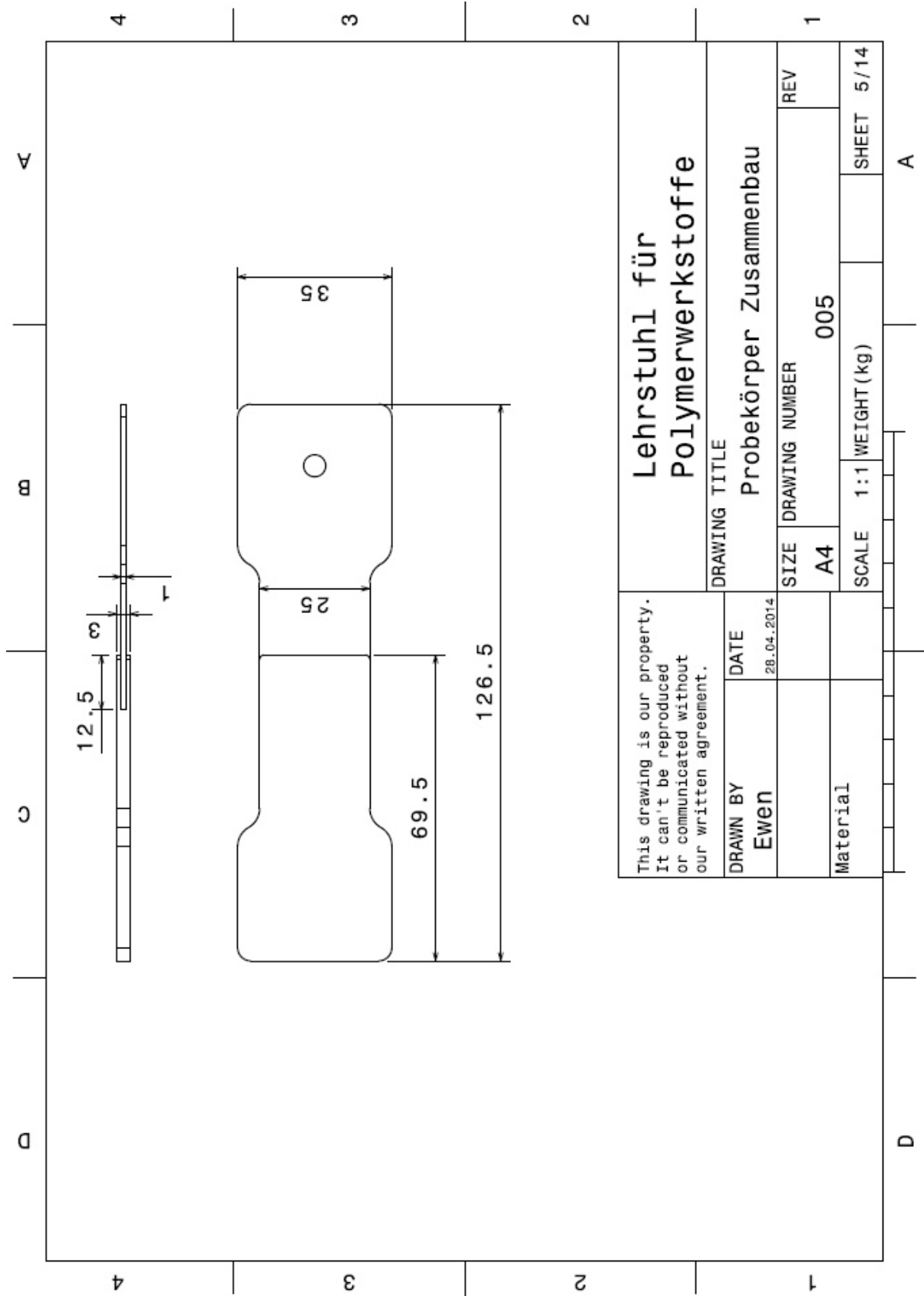
- Der IMA-Double-Lap-Joint
 - Die IMA-Stumpfklebung
 - Der Dicht- bzw. kombinierte Probekörper
 - Der 5-Rohr-Probekörper
 - Der Probekörper für einen 1-Rohr-Verbund, der dieselbe Anbindungsgeometrie wie der 5-Rohr-Verbund besitzt
-



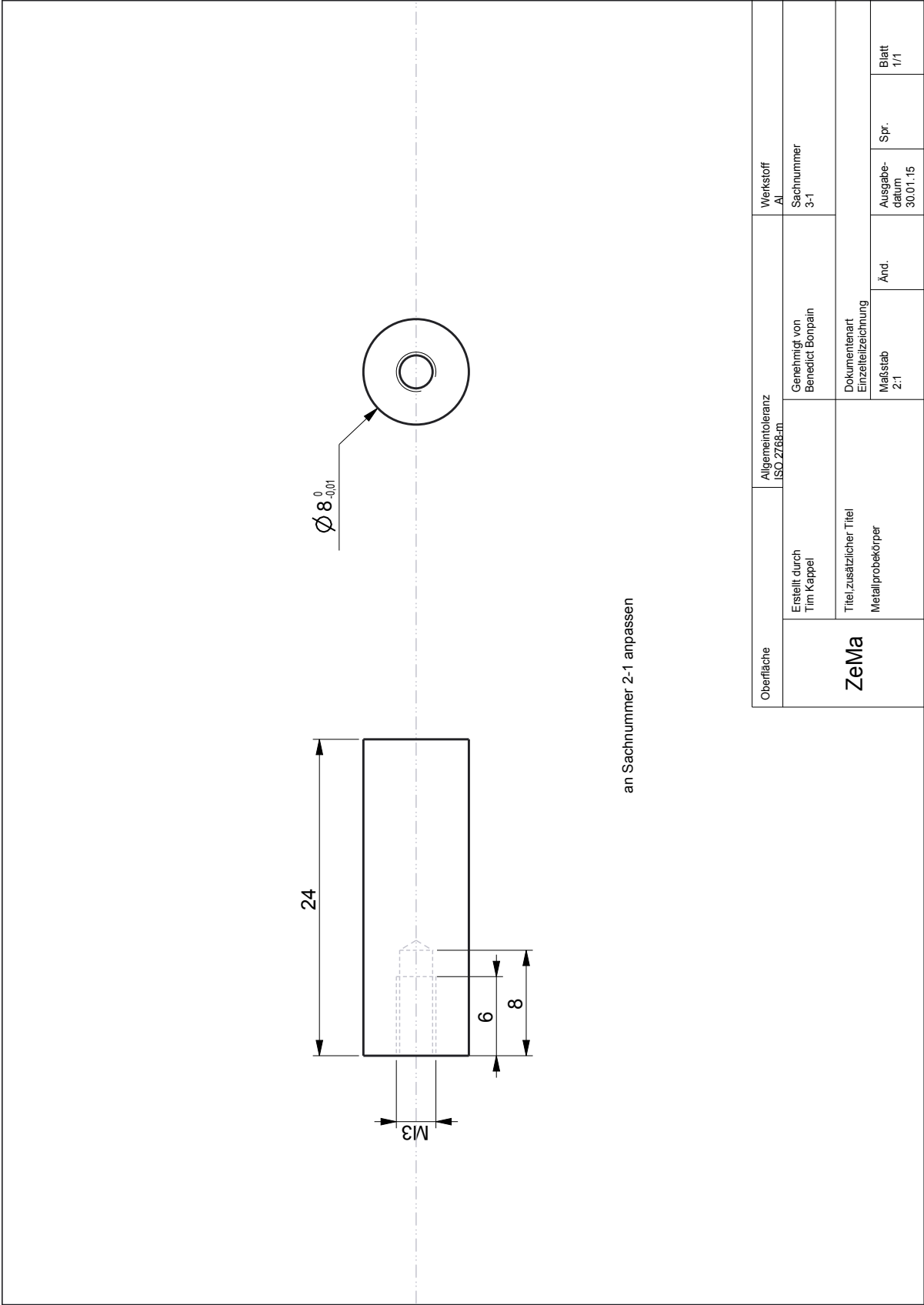
Maße des Metalls für den Double-Lap-Joint

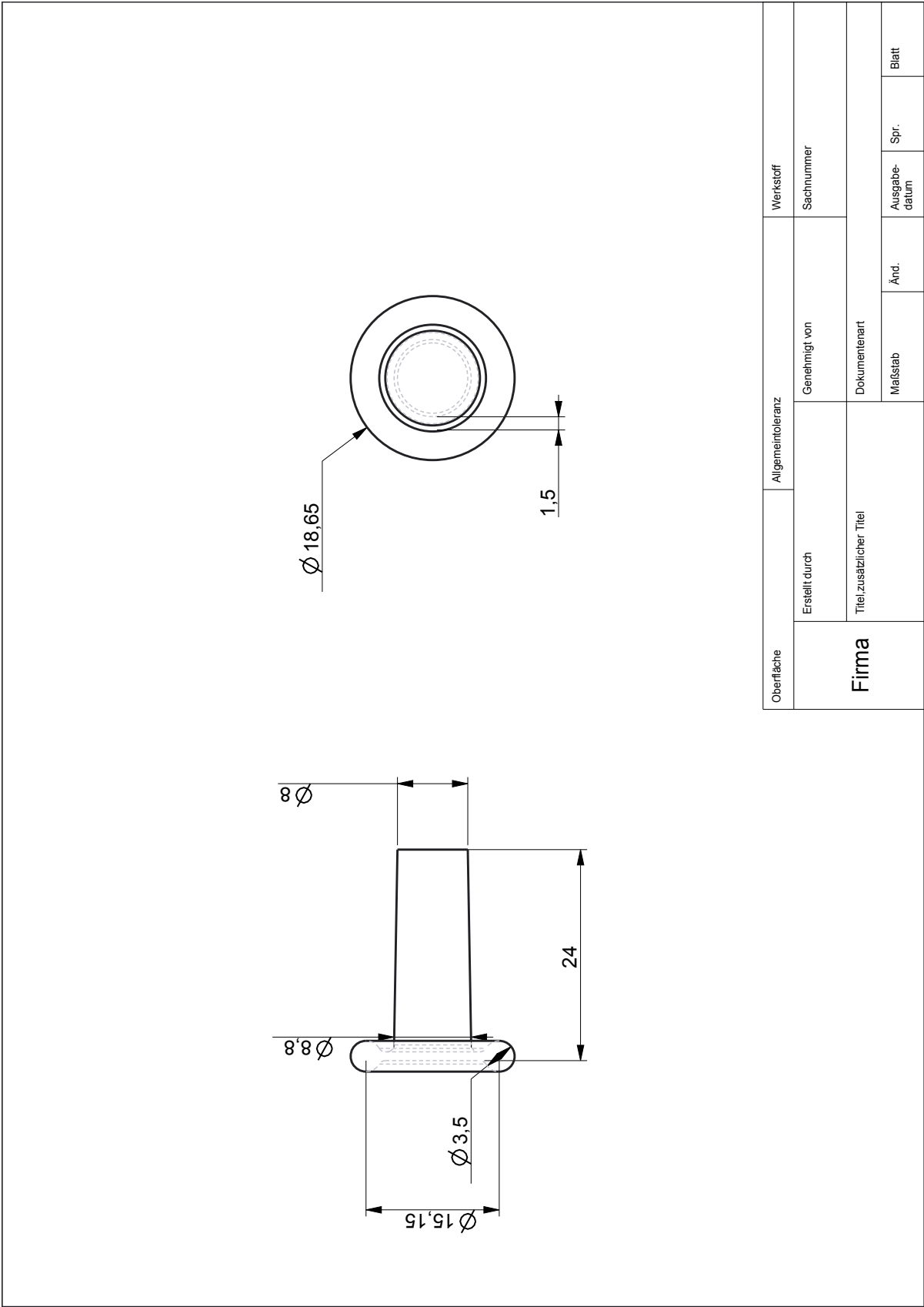


Maße des Kunststoffes für den Double-Lap-Joint



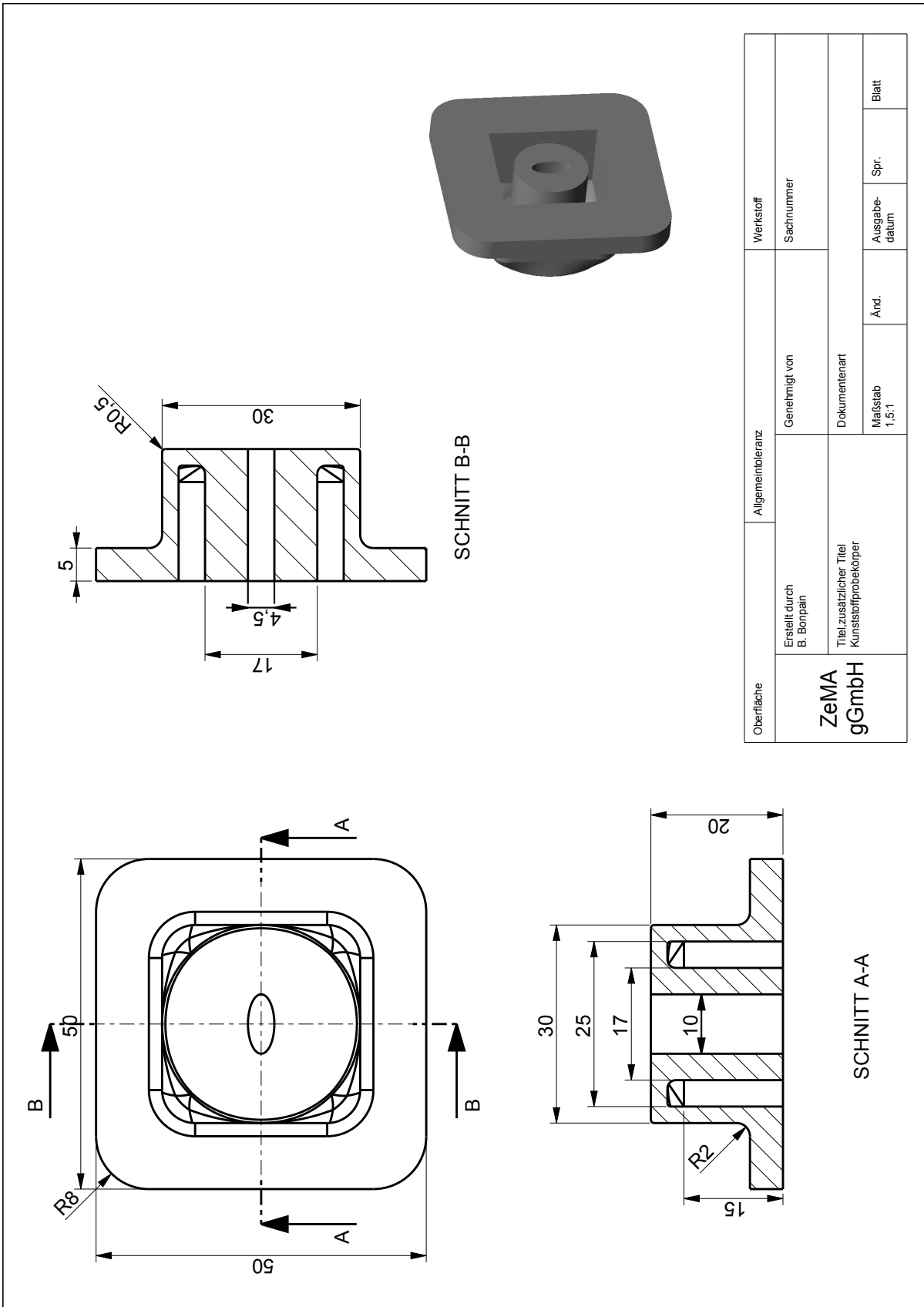
Maße des Double-Lap-Joint



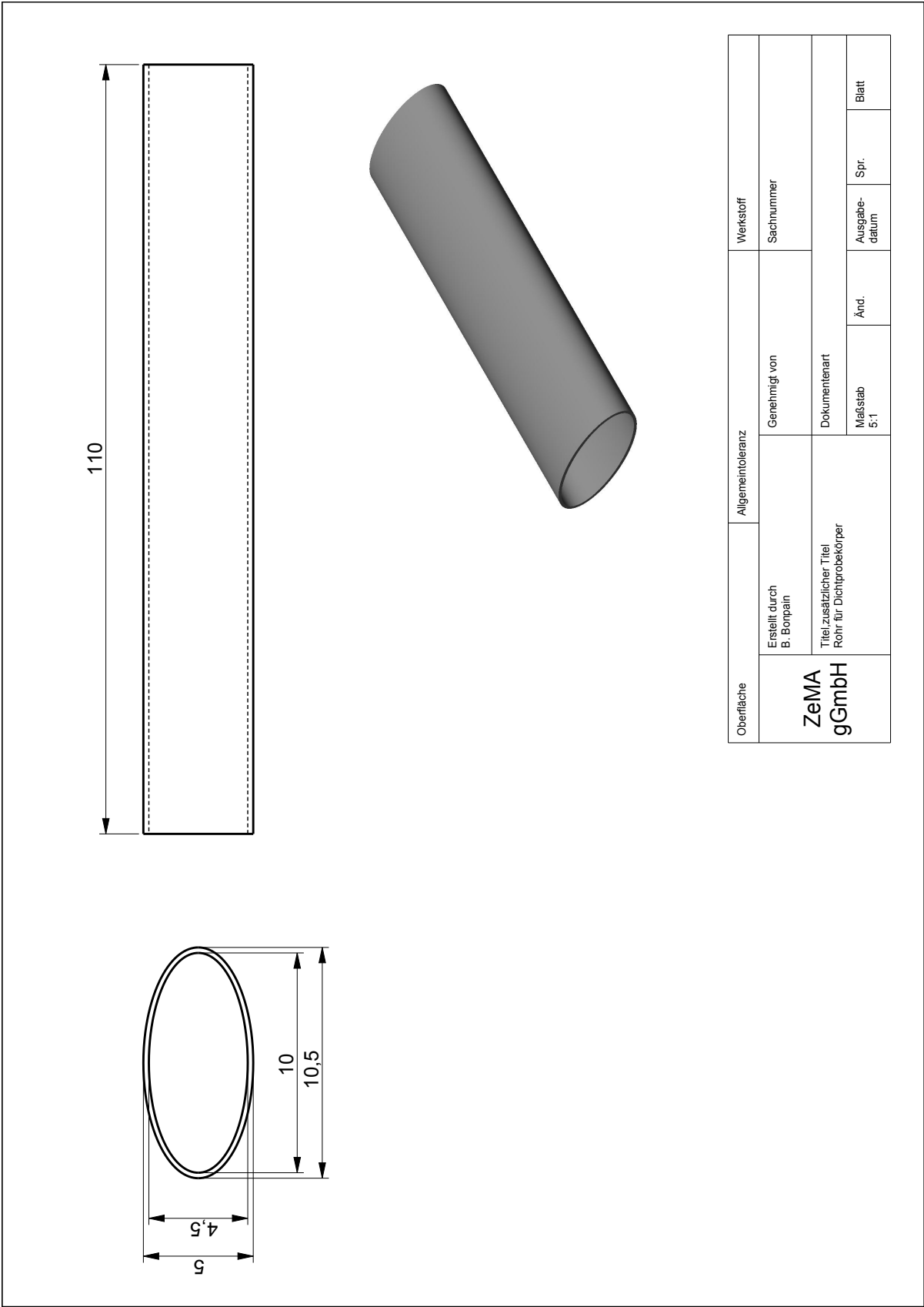


Maße des Kunststoffes für die IMA-Stumpfklebung

Oberfläche	Allgemeintoleranz		Werkstoff	
	Erstellt durch	Genehmigt von	Sachnummer	
Firma	Titel/zusätzlicher Titel		Dokumentenart	
			Maßstab	Änd.
			Ausgabedatum	Spr.

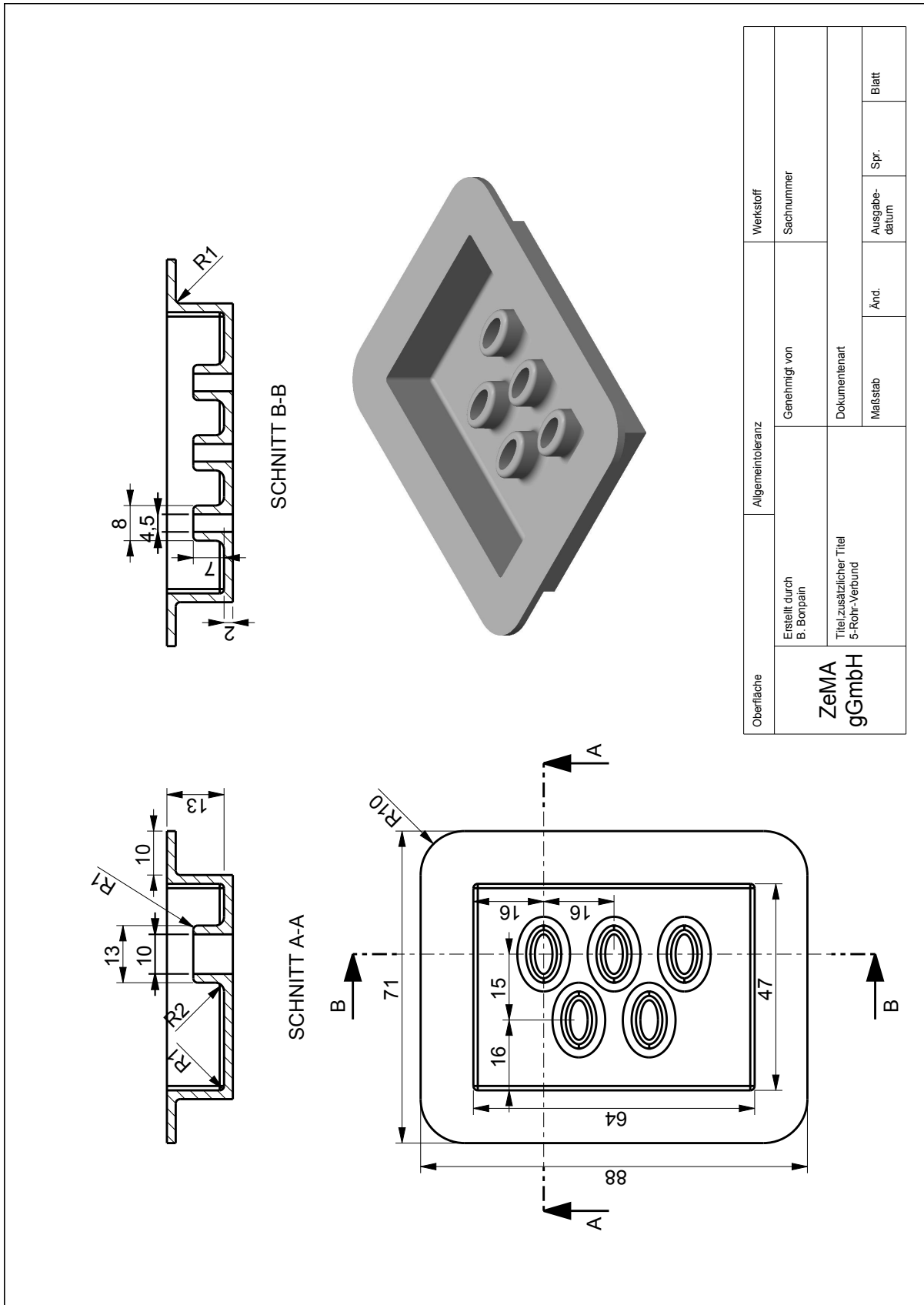


Maße des Kunststoffes für den Dichtprobekörper und den kombinierten Probekörper

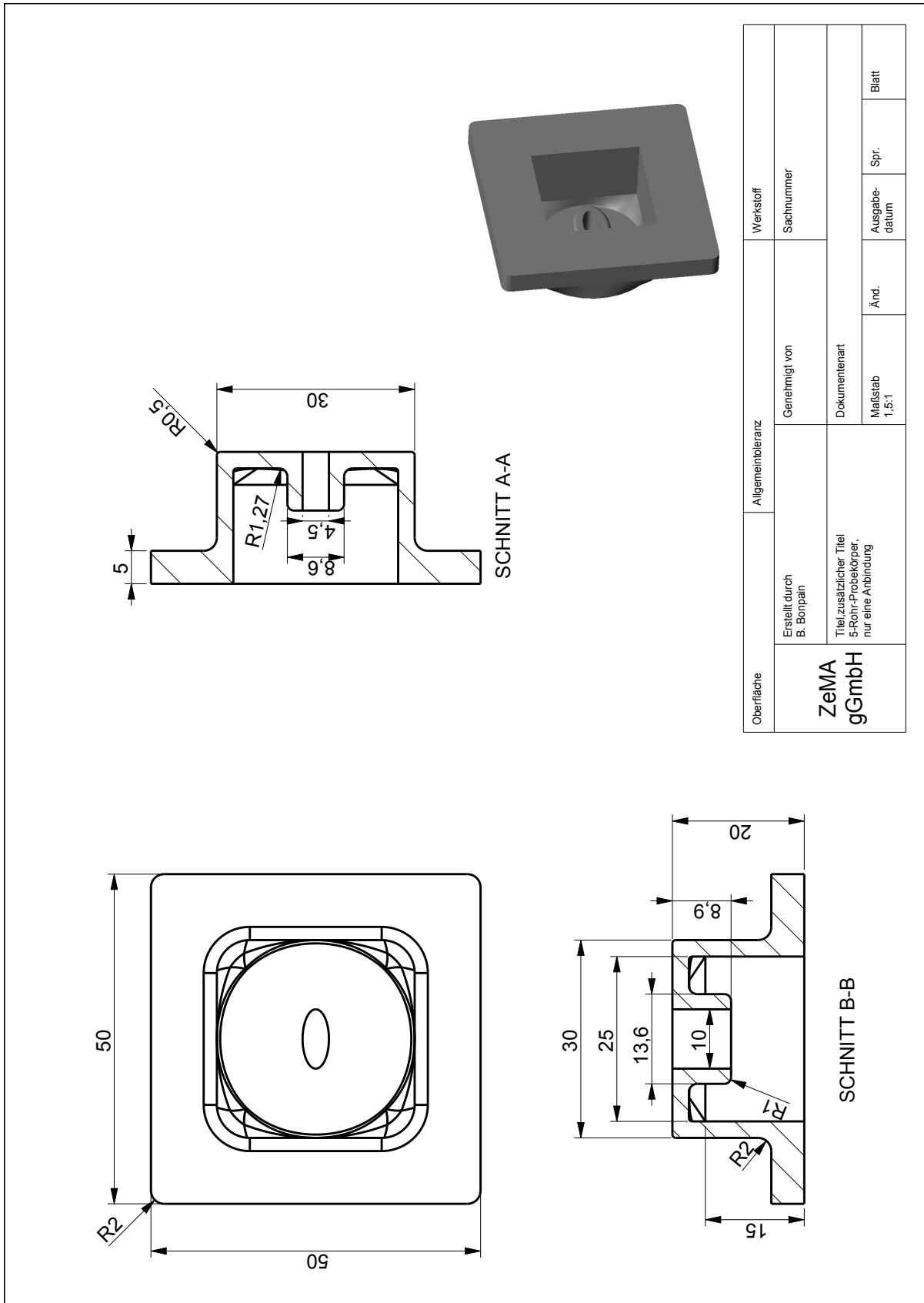


Oberfläche	Allgemeintoleranz	Werkstoff	Sachnummer		
			Blatt		
ZeMA gGmbH	Erstellt durch B. Boppain	Genehmigt von	Ausgabe- datum		Spr.
			Blatt		
Titel,zusätzlicher Titel Rohr für Dichtprobekörper		Dokumentenart	Änd.	Ausgabe- datum	Spr.

Maße des Aluminiumrohres



Maße des Kunststoffes für den 5-Rohr-Probekörpers



Maße des Kunststoffprobekörper für einen 1-Rohr-Verbund, der dieselbe Anbindungsgeometrie wie der 5-Rohr-Verbund besitzt.

Anhang B: Werkstoffdaten

In Anhang B sind die Datenblätter der in der Arbeit verwendeten Werkstoffe hinterlegt:

- DuPont™ Zytel® 70G30HSLR NC010
 - Loctite® 640™
 - Spannungs-Dehnungs-Diagramm ENAW-3103
 - Amodel® AS-1933 HS
 - Elastosil® LR 3074/60 A/B
-

PRODUCT INFORMATION

DuPont™ Zytel® 70G30HSLR NC010

NYLON RESIN

Product Information

Common features of Zytel® nylon resin include mechanical and physical properties such as high mechanical strength, excellent balance of stiffness and toughness, good high temperature performance, good electrical and flammability properties, good abrasion and chemical resistance. In addition, Zytel® nylon resins are available in different modified and reinforced grades to create a wide range of products with tailored properties for specific processes and end-uses. Zytel® nylon resin, including most flame retardant grades, offer the ability to be coloured.

The good melt stability of Zytel® nylon resin normally enables the recycling of properly handled production waste. If recycling is not possible, DuPont recommends, as the preferred option, incineration with energy recovery (-31kJ/g of base polymer) in appropriately equipped installations. For disposal, local regulations have to be observed.

Zytel® nylon resin typically is used in demanding applications in the automotive, furniture, domestic appliances, sporting goods and construction industry.

Zytel® 70G30HSLR NC010 is a 30% glass fiber reinforced, heat stabilized, hydrolysis resistant polyamide 66 resin for injection molding.

General information	Value	Unit	Test Standard
Resin Identification	PA66-GF30	-	-
Part Marking Code	>PA66-GF30<	-	ISO 11469
Rheological properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Moulding shrinkage, parallel	0.3 / *	%	ISO 294-4, 2577
Moulding shrinkage, normal	1.1 / *	%	ISO 294-4, 2577
Mechanical properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Tensile Modulus	10000 / 7200	MPa	ISO 527-1/-2
Stress at break	200 / 130	MPa	ISO 527-1/-2
Strain at break	3.3 / 5	%	ISO 527-1/-2
Tensile creep modulus			ISO 899-1
1h	* / 6800	MPa	
1000h	* / 5100	MPa	
Charpy impact strength			ISO 179/1eU
23°C	82 / 92	kJ/m ²	
-30°C	70 / 72	kJ/m ²	
Charpy notched impact strength			ISO 179/1eA
23°C	13 / 15	kJ/m ²	
-30°C	10 / 10	kJ/m ²	
Izod notched impact strength			ISO 180/1A
23°C	12 / 14	kJ/m ²	
-30°C	12 / 10	kJ/m ²	
Thermal properties	dry / cond	Unit	Test Standard
Melting temperature, 10°C/min	262 / *	°C	ISO 11357-1/-3
Glass transition temperature, 10°C/min	80 / -	°C	ISO 11357-1/-2
Temp. of deflection under load			ISO 75-1/-2
1.8 MPa	253 / *	°C	
0.45 MPa	261 / *	°C	
Vicat softening temperature, 50°C/h, 50N	250 / *	°C	ISO 306
Coeff. of linear therm. expansion, parallel	22 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Coeff. of linear therm. expansion, normal	107 / *	E-6/K	ISO 11359-1/-2
Flammability	dry / cond	Unit	Test Standard
Burning Behav. at 1.5 mm nom. thickn.	HB / *	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested	1.5 / *	mm	IEC 60695-11-10
UL recognition	UL / *	-	-
Burning Behav. at thickness h	HB / *	class	IEC 60695-11-10
Thickness tested	0.8 / *	mm	IEC 60695-11-10
Oxygen index	24 / *	%	ISO 4589-1/-2
Electrical properties	dry / cond	Unit	Test Standard

To find out more, visit [DuPont Performance Polymers](#) or contact nearest DuPont location.

North America

Tel: +1 302 999-4592

Toll-Free (USA): 800 441-0575

Asia Pacific

Tel: +81 3 5521 8600

Europe/Middle East/Africa

Tel: +41 22 717 51 11



DuPont™ Zytel® 70G30HSLR NC010

NYLON RESIN

Relative permittivity				IEC 60250
100Hz	4.3 / 10.8	-		
1MHz	4.1 / 4.6	-		
Dissipation factor				IEC 60250
100Hz	70 / 4600	E-4		
1MHz	150 / 650	E-4		
Volume resistivity	>1E13 / 1E9	Ohm*m		IEC 60093
Surface resistivity	* / 1E13	Ohm		IEC 60093
Electric strength	38 / 32	kV/mm		IEC 60243-1
Comparative tracking index				
3.0mm	450 / -	-		IEC 60112
	1 / -	PLC		UL 746A
Other properties	dry / cond	Unit		Test Standard
Humidity absorption, 2mm	1.9 / *	%		Sim. to ISO 62
Water absorption, 2mm	6 / *	%		Sim. to ISO 62
Density	1370 / -	kg/m ³		ISO 1183
Material specific properties	dry / cond	Unit		Test Standard
Viscosity number	140 / *	cm ³ /g		ISO 307, 1157, 1628
Rheological calc. properties		Value	Unit	Test Standard
Density of melt	1200	kg/m ³		-
Thermal conductivity of melt	0.21	W/(m K)		-
Spec. heat capacity melt	2290	J/(kg K)		-
Eff. thermal diffusivity	6.85E-8	m ² /s		-
Ejection temperature	190	°C		-
VDA Properties		Value	Unit	Test Standard
Burning rate, Thickness 1 mm	0 ⁽¹⁾	mm/min		ISO 3795 (FMVSS 302)
1: SE/B24				

Characteristics

Processing	• Injection Moulding		
Delivery form	• Pellets		
Additives	• Lubricants	• Release agent	
Special characteristics	• Heat stabilised or stable to heat		
Regional Availability	• North America	• Asia Pacific	• Near East/Africa
	• Europe	• South and Central America	• Global

Processing Texts

Injection molding

PREPROCESSING

Drying recommended = Yes, if moisture content of resin exceeds recommended level

Drying temperature = 80 °C

Drying time, dehumidified dryer = 2-4 h

Processing moisture content = <0.2 %

PROCESSING

Melt temperature optimum = 295 °C

Melt temperature range = 285-305 °C

Mould temperature optimum = 100 °C

Mould temperature range = 70-120 °C

Maximum Screw tangential Speed : 0.15 m/s

Flow front speed : 150 mm/s

Hold pressure optimum : 85 MPa

Hold pressure range : 50-100 MPa

PDF Created: 2013-11-28 - Revised: 2004-07-30

Page: 2 of 18

To find out more, visit [DuPont Performance Polymers](#) or contact nearest DuPont location.

North America

Tel: +1 302 999-4592

Toll-Free (USA): 800 441-0575

Asia Pacific

Tel: +81 3 5521 8600

Europe/Middle East/Africa

Tel: +41 22 717 51 11



Copyright 2013 DuPont. The DuPont Oval Logo is a trademark or registered trademark of E.I. du Pont de Nemours and Company or its affiliates. All rights reserved.



Technisches Datenblatt

LOCTITE® 640™

Dezember 2013

PRODUKTBE SCHREIBUNG

LOCTITE® 640™ besitzt die folgenden Produkteigenschaften:

Technologie	Acrylat
Chemische Basis	Urethanmethacrylat
Aussehen (unausgehärtet)	Grün, flüssig ^{LMS}
Fluoreszenz	Ja, unter UV-Licht ^{LMS}
Komponenten	Einkomponentig - kein Mischen erforderlich
Viskosität	Niedrig
Aushärtung	anaerob
Sekundärhärtung	Aktivator
Anwendung	Fügen von Welle-Nabe-Verbindungen
Festigkeit	Hoch

LOCTITE® 640™ wird zum Kleben von zylindrischen Füge­teilen eingesetzt. Das Produkt härtet unter Luftabschluss zwischen enganliegenden Metallflächen aus und verhindert selbständiges Losdrehen und Undichtheiten durch Stöße und Vibrationen. Das Produkt wird für das Fügen von Passfeder- und Keilverbindungen eingesetzt. Es verhindert übermäßiges Spiel bei ausgeschlagenen Verbindungen, befestigt Lager und verhindert Durchdrehen, befestigt Rotoren auf Wellen von Klein- und Kleinstmotoren, befestigt Gleitbuchsen in Gehäusen und auf Wellen, verstärkt Presspassungen, dient zum Spielausgleich bei abgenutzten Teilen bzw. Teilen, die außer Toleranz liegen.

Mil-R-46082B

LOCTITE® 640™ wird chargenweise nach den Anforderungen der Mil-R-46082B geprüft.

ASTM D5363

Alle in Nordamerika hergestellten Klebstoffchargen werden gemäß den in Abs. 5.1.1 und 5.1.2 festgelegten allgemeinen Anforderungen sowie den in Abs. 5.2 festgelegten speziellen Anforderungen geprüft

MATERIALEIGENSCHAFTEN

Spez. Dichte bei 25 °C	1,2
Viskosität, Fallkugel 'D', bei 25°C, mPa·s (cP)	450 bis 750 ^{LMS}
Viskosität, Cannon Fenske, ISO 3104, mPa·s (cP): Nr. 400	*450 bis 750 ^{LMS}

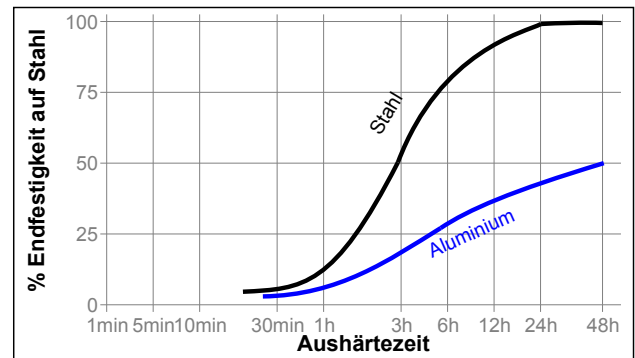
* Betrifft in Nordamerika gefertigtes Material

Flammpunkt - siehe Sicherheitsdatenblatt

TYPISCHE AUSHÄRTEEIGENSCHAFTEN

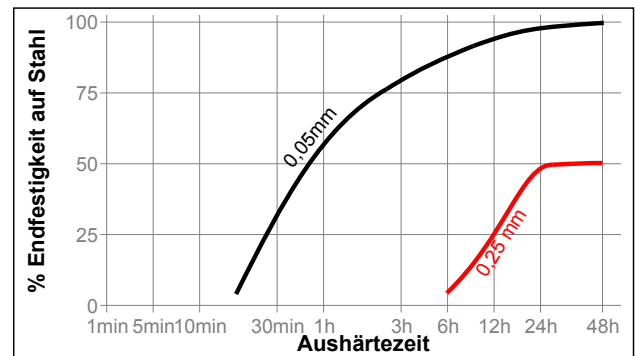
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Material

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der verwendeten Materialoberfläche. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei Wellen und Naben aus Stahl verglichen mit anderen Materialien. Geprüft gemäß ISO 10123.



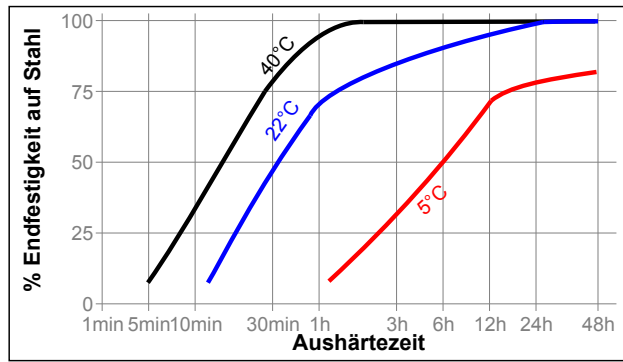
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Spalt

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig vom Klebespalt. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei unterschiedlichen Spalten mit Wellen und Naben aus Stahl unter Verwendung von AKTIVATOR T (7471). Geprüft gemäß ISO 10123.



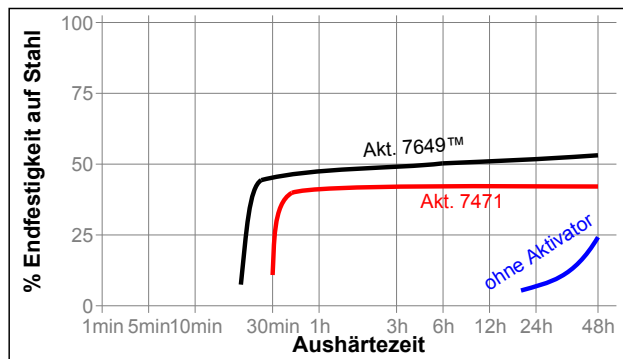
Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur

Die Aushärtegeschwindigkeit ist abhängig von der Temperatur. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei unterschiedlichen Temperaturen mit Wellen und Naben aus Stahl unter Verwendung von AKTIVATOR T (7471). Geprüft gemäß ISO 10123.



Aushärtegeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Aktivator

Ist die Aushärtegeschwindigkeit zu langsam, oder sind große Spalten vorhanden, kann durch Einsatz eines Aktivators die Aushärtung beschleunigt werden. Das folgende Diagramm zeigt die zeitliche Entwicklung der Scherfestigkeit bei zinkdichromatierten Stahlwellen und -naben unter Verwendung von Aktivator 7471™ oder 7649™. Geprüft gemäß ISO 10123.



TYPISCHE EIGENSCHAFTEN IM AUSGEHÄRTETEN ZUSTAND

Physikalische Eigenschaften:

Wärmeausdehnungskoeffizient, ASTM D 696, K ⁻¹	100×10 ⁻⁶
Wärmeleitfähigkeitskoeffizient, ASTM C 177, W/(m·K)	0,1
Spezifische Wärmekapazität, kJ/(kg·K)	0,3

FUNKTIONSEIGENSCHAFTEN IM AUSGEHÄRTETEN ZUSTAND

Eigenschaften

Aushärtezeit 30 Minuten bei 22°C, aktiviert mit AKTIVATOR T (7471)

Druckscherfestigkeit, ISO 10123:

Wellen und Naben aus Stahl	N/mm ²	≥15 ^{LMS}
	(psi)	(≥2.175)
Wellen und Naben aus Stahl	N/mm ²	* ≥11 ^{LMS}
	(psi)	(≥1.595)

* Betrifft in Nordamerika gefertigtes Material

Aushärtezeit 24 Stunden bei 22°C

Druckscherfestigkeit, ISO 10123:

Wellen und Naben aus Stahl	N/mm ²	22
	(psi)	(3.190)
Losbrechmoment ohne Vorspannung, MIL-S-46163	N·m	20 bis 40
	(lb.in.)	(175 bis 350)
Weiterdrehmoment, MIL-S-46163	N·m	30 bis 60
	(lb.in.)	(265 bis 530)
Losbrechmoment unter Vorspannung, ISO 10964, Anzugsmoment 5 N·m	N·m	30 bis 50
	(lb.in.)	(265 bis 440)
Max. Weiterdrehmoment unter Vorspannung, ISO 10964, Anzugsmoment 5 N·m	N·m	40 bis 60
	(lb.in.)	(350 bis 530)

Warmhärtung für 1 Stunde bei 93°C, getestet bei 22°C

Druckscherfestigkeit, ISO 10123:

Wellen und Naben aus Stahl	N/mm ²	≥26 ^{LMS}
	(psi)	(≥3.770)
Wellen und Naben aus Stahl	N/mm ²	* ≥22,7 ^{LMS}
	(psi)	(≥3.291)

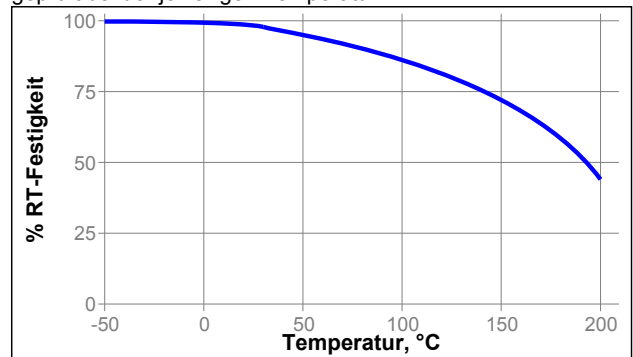
* Betrifft in Nordamerika gefertigtes Material

BESTÄNDIGKEIT GEGEN UMGEBUNGSEINFLÜSSE

Aushärtezeit 1 Woche bei 22°C
Druckscherfestigkeit, ISO 10123:
Wellen und Naben aus Stahl

Temperaturfestigkeit

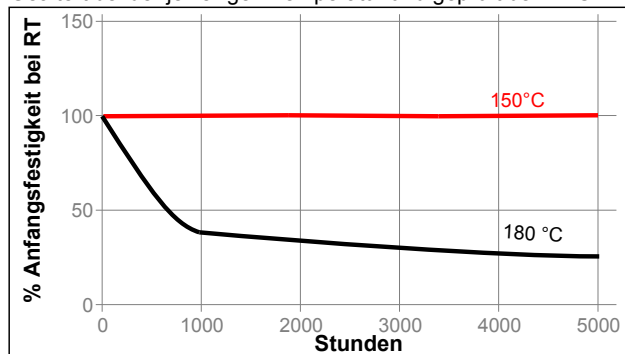
geprüft bei der jeweiligen Temperatur



TDB LOCTITE® 640™, Dezember 2013

Wärmealterung

Gealtert bei der jeweiligen Temperatur und geprüft bei 22°C

**Beständigkeit gegen Medien**

Alterungstest wie beschrieben und geprüft bei 22°C.

Medium	°C	% Anfängsfestigkeit		
		100 h	500 h	1000 h
Motoröl	125	100	100	100
Bleifreies Benzin	22	100	100	100
Bremsflüssigkeit	22	100	100	100
Wasser/Glycol 50/50	87	100	90	75
Ethanol	22	100	100	100
Aceton	22	100	100	100

ALLGEMEINE INFORMATION

Dieses Produkt ist nicht geeignet für reinen Sauerstoff und/oder sauerstoffangereicherte Systeme und sollte nicht als Dichtstoff für Chlor oder stark oxidierende Medien gewählt werden.

Sicherheitshinweise zu diesem Produkt entnehmen Sie bitte dem Sicherheitsdatenblatt.

Wenn die zu verklebenden Oberflächen vorher mit einem wässrigen Reinigungssystem gereinigt werden, ist darauf zu achten, dass die Verträglichkeit zwischen Reiniger und Kleb- bzw. Dichtstoff gegeben ist. In manchen Fällen können diese wässrigen Reiniger die Aushärtung bzw. die Eigenschaften des Klebstoffes beeinträchtigen.

Dieses Produkt wird nicht für Kunststoffe empfohlen (insbesondere bei thermoplastischen Materialien können Spannungsrisse auftreten). Dem Anwender wird empfohlen, vorher die Verträglichkeit mit solchen Materialien zu prüfen.

Gebrauchshinweise**Montage**

1. Zur Erzielung optimaler Ergebnisse alle Oberflächen (innen und aussen) mit einem Loctite® Reiniger reinigen und trocknen lassen.
2. Bei inaktiven Metalloberflächen oder zu langsamer Aushärtegeschwindigkeit Teile mit Aktivator 7471 oder 7649 besprühen und trocknen lassen.
3. **Für Schiebeseite** den Klebstoff ringförmig außen an der Vorderkante der Welle und auf die Innenseite der Nabe

auftragen und Teile beim Zusammenfügen gegeneinander drehen, um eine optimale Verteilung des Klebstoffes zu gewährleisten.

4. **Für Presspassungen** den Klebstoff gleichmäßig auf beide Fügeflächen auftragen und Teile schnell und zügig fügen.
5. **Für Schrumpfverbindungen** die Welle mit Klebstoff benetzen und die Nabe erwärmen, damit ausreichend Spiel zum Fügen der Teile entsteht.
6. Die Teile sollten nicht bewegt werden, bis Handfestigkeit erreicht wird.

Demontage

1. die Verbindung lokal auf ca. 250 °C erwärmen. Im erwärmten Zustand demontieren.

Reinigung

1. Ausgehärtetes Produkt kann durch Anquellen mit einem Loctite Lösungsmittel und anschließende mechanische Bearbeitung z.B. mit einer Drahtbürste entfernt werden.

Loctite Material-Spezifikation LMS

LMS vom 07. Juli 2006 (* February 15, 1996). Prüfberichte über die angegebenen Eigenschaften sind für jede Charge erhältlich. LMS-Prüfberichte enthalten ausgewählte, im Rahmen der Qualitätskontrolle festgelegte Prüfwerte, die als relevant für Kunden-Spezifikationen erachtet werden. Darüber hinaus sind umfassende Kontrollmaßnahmen in Kraft, die eine gleichbleibend hohe Produktqualität gewährleisten. Spezifikationen unter Berücksichtigung von speziellen Kundenwünschen können über die Qualitätsabteilung von Henkel koordiniert werden.

Lagerung

Produkt im ungeöffneten Behälter in trockenen Räumen lagern. Hinweise zur Lagerung können sich auf dem Etikett des Produktbehälters befinden.

Optimale Lagerung: 8 °C bis 21 °C Durch Lagerung unter 8°C und über 28°C können die Produkteigenschaften nachteilig beeinflusst werden.

Aus dem Gebinde entnommenes Produkt kann beim Gebrauch verunreinigt worden sein. Deshalb keine Produktreste in den Originalbehälter zurückschütten. Henkel kann keine Haftung für Material übernehmen, das verunreinigt oder in einer Weise gelagert wurde, die von den oben aufgeführten Bedingungen abweicht. Wenn Sie weitere Informationen benötigen, wenden Sie sich bitte an Ihren zuständigen technischen Service oder den Kundenbetreuer vor Ort.

Umrechnungsfaktoren

$(^{\circ}\text{C} \times 1.8) + 32 = ^{\circ}\text{F}$
 $\text{kV/mm} \times 25.4 = \text{V/mil}$
 $\text{mm} / 25.4 = \text{inches}$
 $\mu\text{m} / 25.4 = \text{mil}$
 $\text{N} \times 0.225 = \text{lb}$
 $\text{N/mm} \times 5.71 = \text{lb/in}$
 $\text{N/mm}^2 \times 145 = \text{psi}$
 $\text{MPa} \times 145 = \text{psi}$
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 8.851 = \text{lb}\cdot\text{in}$
 $\text{N}\cdot\text{m} \times 0.738 = \text{lb}\cdot\text{ft}$
 $\text{N}\cdot\text{mm} \times 0.142 = \text{oz}\cdot\text{in}$
 $\text{mPa}\cdot\text{s} = \text{cP}$

Haftungsausschluss**Hinweis:**

Die vorstehenden Angaben in diesem technischen Datenblatt (TDS),

Henkel Americas
+860.571.5100

Henkel Europe
+49.89.9268.0

Henkel Asia Pacific
+81.45.758.1810

Den direktesten Zugang zu Informationen und Unterstützung in kaufmännischen und technischen Fragen finden Sie im Internet unter: www.henkel.com/industrial

insbesondere Vorschläge für die Verarbeitung und den Einsatzbereich unserer Produkte, beruhen auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Auf Grund der unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten und der außerhalb unseres Einflussbereiches liegenden Einsatz- und Arbeitsbedingungen übernehmen wir keine Haftung für die Eignung unserer Produkte für die relevanten Produktionsverfahren unter den konkreten Arbeitsbedingungen sowie die beabsichtigten Verarbeitungszwecke und Ergebnisse. Um eine solche Eignung sicherzustellen empfehlen wir in jedem Fall ausreichende vorherige Eigenversuche und Tests.

Jede aus den Hinweisen in diesem technischen Datenblatt und jede aus sonstiger schriftlicher oder mündlicher Beratung für das vorliegende Produkt resultierende Haftung ist ausdrücklich ausgeschlossen, es sei denn, dass individualvertraglich etwas anderes vereinbart wurde, ein Fall der Verletzung von Leib, Leben oder Gesundheit vorliegt, uns Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt oder eine Haftung nach zwingendem Produkthaftungsrecht besteht.

Bei Lieferung unserer Produkte durch Henkel Belgium NV, Henkel Electronic Materials NV, Henkel Nederland BV, Henkel Technologies France SAS und Henkel France SA beachten Sie bitte zusätzlich folgendes:

Für den Fall, dass Henkel dennoch, aus welchem Rechtsgrund auch immer, in Anspruch genommen wird, ist die Haftung von Henkel in jedem Fall beschränkt auf den Wert der jeweils betroffenen Lieferung.

Bei Lieferung unserer Produkte durch Henkel Colombiana, S.A.S. findet Folgendes Anwendung:

Die vorstehenden Angaben in diesem technischen Datenblatt (TDS), insbesondere Vorschläge für die Verarbeitung und den Einsatzbereich unserer Produkte, beruhen auf unseren derzeitigen Kenntnissen und Erfahrungen. Wir übernehmen keine Haftung für die Eignung unserer Produkte für die relevanten Produktionsverfahren unter den konkreten Arbeitsbedingungen sowie die beabsichtigten Verarbeitungszwecke und Ergebnisse. Um eine solche Eignung sicherzustellen empfehlen wir in jedem Fall ausreichende vorherige Eigenversuche und Tests.

Jede aus den Hinweisen in diesem technischen Datenblatt und jede aus sonstiger schriftlicher oder mündlicher Beratung für das vorliegende Produkt resultierende Haftung ist ausdrücklich ausgeschlossen, es sei denn, dass individualvertraglich etwas anderes vereinbart wurde, ein Fall der Verletzung von Leib, Leben oder Gesundheit vorliegt, uns Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt oder eine Haftung nach zwingendem Produkthaftungsrecht besteht.

Bei Lieferung unserer Produkte durch Henkel Corporation, Resin Technology Group, Inc. oder Henkel Canada Corporation, findet Folgendes Anwendung:

Die hierin enthaltenen Daten dienen lediglich zur Information und gelten nach bestem Wissen als zuverlässig. Wir können jedoch keine Haftung für Ergebnisse übernehmen, die von anderen erzielt wurden, über deren Methoden wir keine Kontrolle haben. Der Anwender selbst ist dafür verantwortlich, die Eignung von hierin erwähnten Produktionsmethoden für seine Zwecke festzustellen und Vorsichtsmaßnahmen zu ergreifen, die zum Schutz von Sachen und Personen vor den Gefahren angezeigt wären, die möglicherweise bei der Handhabung und dem Gebrauch dieser Produkte auftreten. **Dementsprechend lehnt die Firma Henkel im besonderen jede aus dem Verkauf oder Gebrauch von Produkten der Firma Henkel entstehende ausdrücklich oder stillschweigend gewährte Garantie ab, einschließlich aller Gewährleistungsverpflichtungen oder Eignungsgarantien für einen bestimmten Zweck. Die Firma Henkel lehnt im besonderen jede Haftung für Folgeschäden oder mittelbare Schäden jeder Art ab, einschließlich entgangener Gewinne.**

Die Tatsache, dass hier verschiedene Verfahren oder Zusammensetzungen erörtert werden, soll nicht zum Ausdruck bringen, dass diese nicht durch Patente für andere geschützt sind, bzw. unter Patenten der Firma Henkel lizenziert sind, die solche Verfahren oder Zusammensetzungen abdecken. Wir empfehlen jedem Interessenten, die von ihm beabsichtigte Anwendung vor dem serienmäßigen Einsatz zu testen und dabei diese Daten als Anleitung zu benutzen. Dieses Produkt kann durch eines oder mehrere in- oder ausländische Patente oder Patentanmeldungen geschützt sein.

Verwendung von Warenzeichen

Sofern nicht anderweitig ausgewiesen sind alle in diesem Dokument genannten Marken solche der Henkel Corporation in den USA und in anderen Ländern. Mit © gekennzeichnet sind alle beim US- Patent- und Markenamt registrierte Marken.

Referenz 1.2



06.11.13

Prüfprotokoll

Werkstoff :
 Überschrift : Prüfprotokoll
 Kunde :
 Auftrags-Nr. :
 Prøve norm : DIN EN 10002-1
 Art und Bezeichnung :

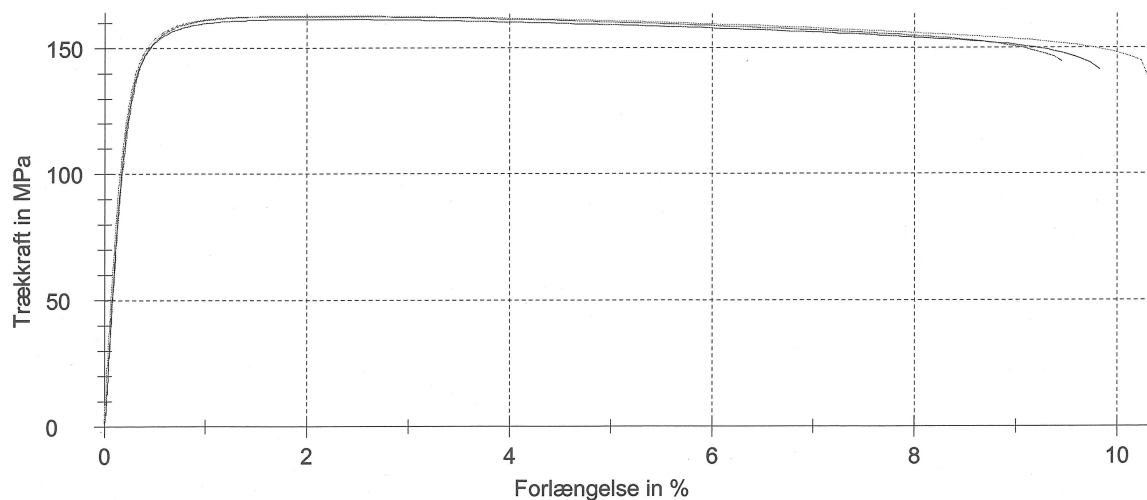
Probenentnahme :
 Probentyp :
 Vorbehandlung :
 Prüfer :
 Bemerkung :
 Maschinendaten :

Vorkraft : 2 MPa
 Geschwindigkeit E-Modul : 10 MPa/s
 Prüfgeschwindigkeit : 0,006 1/s

Prüfergebnisse:

Nr	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %
1	148,3	162,5	1,7	9,2
2	148,9	162,7	1,9	10,1
3	148,1	161,3	1,8	9,6

Seriengrafik:



Statistik:

Serie n = 3	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %
\bar{x}	148,4	162,2	1,8	9,7
s	0,5	0,8	0,1	0,4
v	0,31	0,48	5,36	4,61



06.11.13

Prüfprotokoll

Werkstoff :
 Überschrift : Prüfprotokoll
 Kunde :
 Auftrags-Nr. :
 Probe norm : DIN EN 10002-1
 Art und Bezeichnung :

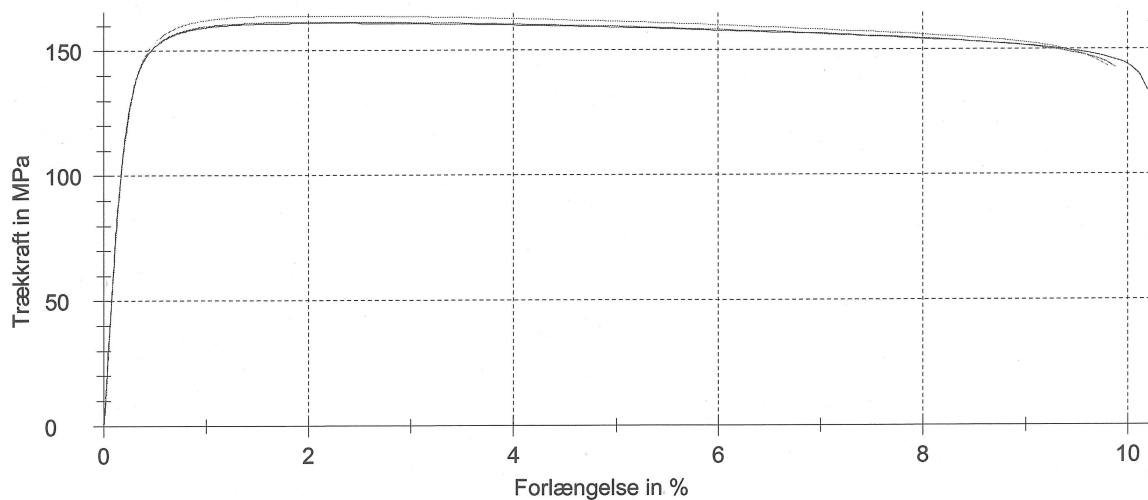
Probenentnahme :
 Probentyp :
 Vorbehandlung :
 Prüfer :
 Bemerkung :
 Maschinendaten :

Vorkraft : 2 MPa
 Geschwindigkeit E-Modul : 10 MPa/s
 Prüfgeschwindigkeit : 0,006 1/s

Prüfergebnisse:

Nr	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %
1	147,6	161,4	1,9	9,7
2	148,6	163,9	1,7	9,6
3	147,4	161,0	1,9	10,0

Seriengrafik:



Statistik:

Serie n = 3	R _{p0.2} MPa	R _m MPa	A _g %	A ₅ %
\bar{x}	147,9	162,1	1,8	9,8
s	0,6	1,6	0,1	0,2
v	0,43	0,98	6,13	2,21

Technical Data

SOLVAY SPECIALTY POLYMERS
More Products with More Performance™

Amodel® AS-1933 HS

polyphthalamide

Amodel AS-1933 HS is a 33% glass reinforced grade of polyphthalamide (PPA) resin developed specifically for improved performance in a 50/50 ethylene glycol and water environment. This material exceeds the performance required by the automotive industry for polymeric materials exposed to antifreeze at 226°F (108°C), even when tested at 275°F (135°C).

Potential applications include a variety of automotive components such as thermostat housings, heater core endcaps, heater hose connectors, and water inlets, outlets and valves.

- Black: AS-1933 HS BK 324

General

Material Status	• Commercial: Active
Availability	• Africa & Middle East • Asia Pacific • Europe • North America • South America
Filler / Reinforcement	• Glass Fiber Reinforcement, 33% Filler by Weight
Additive	• Heat Stabilizer
Features	• Antifreeze Resistant • Glycol Resistant • Good Chemical Resistance • Good Creep Resistance • Good Dimensional Stability • Good Stiffness • Heat Stabilized • High Heat Resistance • High Strength
Uses	• Automotive Applications • Automotive Under the Hood • Housings • Industrial Applications • Industrial Parts • Machine/Mechanical Parts • Metal Replacement • Power/Other Tools • Thick-walled Parts • Valves/Valve Parts
RoHS Compliance	• RoHS Compliant
Automotive Specifications	• ASTM D4000 PA121 G35 Color: BK324 Black • ASTM D6779 PA121G35 • BOSCH N28 BN05-OX1 BN0510-GF45-3Gsw01SO Color: BK324 Black • CHRYSLER MS-DB478 CPN4116 Color: Black • FORD WSS-M4D861-A3 Color: BK324 Black • GM GMP.PPA.019 • GM GMW16360 GMW 16360P-PPA-GF35 • ISO 1874 PA6T/6I/66, MH, 12-120, GF33 Color: BK324 Black • PSA Peugeot-Citroën SPA X62 4203 • VALEO PDT NVB 10 057 Color: BK324 Black
Appearance	• Black
Forms	• Pellets
Processing Method	• Injection Molding

Physical	Typical Value	Unit	Test Method
Density	1.45	g/cm ³	ISO 1183/A
Molding Shrinkage			ASTM D955
Flow	0.20	%	
Across Flow	0.60	%	
Water Absorption (24 hr)	0.21	%	ASTM D570
Mechanical	Typical Value	Unit	Test Method
Tensile Modulus			
-- ¹	7580	MPa	ASTM D638
--	11700	MPa	ASTM D638
--	12600	MPa	ISO 527-2

Amodel® AS-1933 HS

SOLVAY SPECIALTY POLYMERS
More Products with More Performance™

Mechanical	Typical Value	Unit	Test Method
Tensile Strength			
Break ¹	75.8	MPa	ASTM D638
Break	221	MPa	ASTM D638
Break	212	MPa	ISO 527-2
Tensile Elongation (Break)	2.5	%	ASTM D638 ISO 527-2
Flexural Modulus			
--	10800	MPa	ASTM D790
--	10600	MPa	ISO 178
Flexural Strength			
--	309	MPa	ISO 178
Yield	313	MPa	ASTM D790
Impact	Typical Value	Unit	Test Method
Charpy Notched Impact Strength	10	kJ/m ²	ISO 179/1eA
Charpy Unnotched Impact Strength	76	kJ/m ²	ISO 179/1eU
Notched Izod Impact			
-- ¹	53	J/m	ASTM D256
--	91	J/m	ASTM D256
--	9.5	kJ/m ²	ISO 180/1A
Thermal	Typical Value	Unit	Test Method
Deflection Temperature Under Load			
1.8 MPa, Unannealed	277	°C	ASTM D648
1.8 MPa, Unannealed	278	°C	ISO 75-2/Af
Melting Temperature	312	°C	ISO 11357-3
Injection	Typical Value	Unit	
Drying Temperature	121	°C	
Drying Time	4.0	hr	
Suggested Max Moisture	0.10	%	
Hopper Temperature	79.4	°C	
Rear Temperature	304 to 318	°C	
Front Temperature	316 to 329	°C	
Processing (Melt) Temp	321 to 343	°C	
Mold Temperature	135	°C	



ELASTOSIL® LR 3074/60 A/B

SELF-ADHESIVE LIQUID SILICONE RUBBER

Product description

Self-adhesive liquid silicone rubber ELASTOSIL® LR 3074/60 A/B is a paste-like, easily-pigmentable two-component compound with extremely short curing times and improved coolant resistance.

Special features

ELASTOSIL® LR 3074/60 A/B is a primerless, self-bonding grade that adheres to various plastic substrates (e. g. PA, PBT) and metals, but not in the mold. The bonding is improved by an ageing-process (e. g. one hour at 100 °C) or by a longer storing at room temperature. Because of the individual surface properties each substrate must be tested before mass production. The vulcanizates are opaque and noted for average mechanical and electrical properties. For further information on tested material combinations please refer to the corresponding adhesion tables which are available upon request from the responsible sales manager.

Application

ELASTOSIL® LR 3074/60 A/B is particularly suitable for the economical production of large series of overmolded parts (thermoplastic/elastomer), which are used for radiator in the automotive industry.

Parts made from ELASTOSIL® LR 3074/60 A/B can generally be used for technical applications without post-curing, but do not comply with regulations concerning use in the pharmaceutical and food industry.

Processing

The A and B components are delivered ready to use in 20 and 200 litre drums. With adequate metering equipment, they can be pumped directly from the original containers into the injection molding machine and mixed by a static mixer. The mixing ratio is 1 : 1. At room temperature, mixtures of A and B components have a pot life of at least three days.

Note:

Start-up of new molds should be supported by use of ELASTOSIL® AUX Mold Release Agent 32.

For detailed information refer to our brochure "SOLID AND LIQUID SILICONE RUBBER - MATERIAL AND PROCESSING GUIDELINES".

Storage

The 'Best use before end' date of each batch is shown on the product label.

Storage beyond the date specified on the label does not necessarily mean that the product is no longer usable. In this case however, the properties required for the intended use must be checked for quality assurance reasons.

Safety notes

Comprehensive instructions are given in the corresponding Material Safety Data Sheets. They are available on request from WACKER subsidiaries or may be printed via WACKER web site <http://www.wacker.com>.


Product data

Typical general characteristics	Inspection Method	Value
Product data (non-postcured)		
Hardness Shore A	DIN 53505	58
Appearance		opaque
Density	ISO 1183-1 A	1,14 g/cm ³
Viscosity (shear rate 0,9 s ⁻¹)	DIN 53019	1200000 mPa s
Viscosity (shear rate 10 s ⁻¹)	DIN 53019	270000 mPa s
Tensile strength	DIN 53504 S 1	6,8 N/mm ²
Elongation at break	DIN 53504 S 1	360 %
Tear strength	ASTM D 624 B	16 N/mm
Rebound resilience	DIN 53512	65 %
Compression set	DIN ISO 815-B (22 h / 125 °C)	15 %
Compression set	DIN ISO 815-B (22 h / 150 °C)	21 %

Cure conditions: 5 min / 165 °C in press

These figures are only intended as a guide and should not be used in preparing specifications.

The data presented in this medium are in accordance with the present state of our knowledge but do not absolve the user from carefully checking all supplies immediately on receipt. We reserve the right to alter product constants within the scope of technical progress or new developments. The recommendations made in this medium should be checked by preliminary trials because of conditions during processing over which we have no control, especially where other companies' raw materials are also being used. The information provided by us does not absolve the user from the obligation of investigating the possibility of infringement of third parties' rights and, if necessary, clarifying the position. Recommendations for use do not constitute a warranty, either express or implied, of the fitness or suitability of the product for a particular purpose.

The management system has been certified according to DIN EN ISO 9001 and DIN EN ISO 14001

WACKER® is a trademark of Wacker Chemie AG. ELASTOSIL® is a trademark of Wacker Chemie AG.

For technical, quality, or product safety questions, please contact:

Wacker Chemie AG
Hanns-Seidel-Platz 4
81737 München, Germany
info.silicones@wacker.com

www.wacker.com

Anhang C: Versuchspläne und Ergebnisse

In Anhang C werden die für die in der Arbeit aufgestellten Versuchspläne und deren Ergebnisse vorgestellt:

- Konturierung und Aufweitung des Aluminiumrohres
 - Laserstrukturen: Punkte und Linien
 - Prozessparameteranalyse 1-Rohr-Verbund: Screening und quadratischer Versuchsplan
 - Längen und Dickenreduktion der Aluminium-Kunststoff-Anbindung
 - Prozessparameteranalyse 5-Rohr-Verbund: Screening und quadratischer Versuchsplan
-

Höhe [mm]	Breite [mm]	plastische Dehnung	von-Mises-Spannung [MPa]
5,7322	1,58579	0,00742	52,60000
9,2678	1,58579	0,00741	52,70000
5,7322	4,41421	0,00093	38,90000
9,2678	4,41421	0,00743	52,70000
5,0000	3,00000	0,00732	52,60000
10,0000	3,00000	0,00757	52,60000
7,5000	1,00000	0,00742	52,60000
7,5000	5,00000	0,00743	52,60000
7,5000	3,00000	0,00744	52,60000
7,5000	3,00000	0,00744	52,60000
7,5000	3,00000	0,00744	52,60000
7,5000	3,00000	0,00744	52,60000
7,5000	3,00000	0,00744	52,60000
7,5000	3,00000	0,00744	52,60000

Konturierung des Aluminiumrohres

Achse A [mm]	Achse B [mm]	Umformlänge [mm]	plastische Dehnung	von-Mises-Spannung [MPa]
10,2957	4,62713	5,4729	0,00528	41,20
14,4043	4,62713	5,4729	0,00508	39,10
10,2957	7,57287	5,4729	0,00541	41,40
14,4043	7,57287	5,4729	0,00515	41,20
10,2957	4,62713	22,5271	0,00509	40,10
14,4043	4,62713	22,5271	0,00511	40,40
10,2957	7,57287	22,5271	0,00529	40,90
14,4043	7,57287	22,5271	0,00511	40,60
9,7000	6,10000	14,0000	0,00498	33,70
15,0000	6,10000	14,0000	0,00527	41,30
12,3500	4,20000	14,0000	0,00528	41,30
12,3500	8,00000	14,0000	0,00523	39,10
12,3500	6,10000	3,0000	0,00523	41,30
12,3500	6,10000	25,0000	0,00523	39,50
12,3500	6,10000	14,0000	0,00519	39,30
12,3500	6,10000	14,0000	0,00519	39,30
12,3500	6,10000	14,0000	0,00519	39,30
12,3500	6,10000	14,0000	0,00519	39,30
12,3500	6,10000	14,0000	0,00519	39,30
12,3500	6,10000	14,0000	0,00519	39,30
12,3500	6,10000	14,0000	0,00519	39,30

Aufweitung des Aluminiumrohres

Verhältnis Durchmes- ser/Tiefe	Verhältnis x/Durchmesser	Verhältnis y/Durchmesser	Tiefe	Druckabfall [Pa]
2,0	1,50	3,00	100,0	29
1,0	2,25	2,25	52,5	23
1,0	3,00	1,50	100,0	23
1,5	2,25	2,25	52,5	35
1,5	1,50	2,25	52,5	*
1,5	3,00	2,25	52,5	*
1,0	1,50	1,50	100,0	28
1,0	1,50	3,00	100,0	28
2,0	2,25	2,25	52,5	33
1,5	2,25	2,25	52,5	34
2,0	3,00	3,00	5,0	> 1400
1,5	2,25	2,25	52,5	31
2,0	3,00	1,50	5,0	39
1,5	2,25	2,25	52,5	*
2,0	1,50	1,50	5,0	*
1,0	3,00	1,50	5,0	*
1,5	2,25	2,25	5,0	*
1,5	2,25	3,00	52,5	*
1,5	2,25	2,25	52,5	*
1,0	1,50	3,00	5,0	35
2,0	1,50	3,00	5,0	155
1,0	3,00	3,00	5,0	259
2,0	3,00	1,50	100,0	> 1400
1,5	2,25	2,25	52,5	43
1,5	2,25	2,25	100,0	23
1,0	3,00	3,00	100,0	38
1,5	2,25	1,50	52,5	*
1,0	1,50	1,50	5,0	24
2,0	1,50	1,50	100,0	23
1,5	2,25	2,25	52,5	34
2,0	3,00	3,00	100,0	23

Laserstrukturen: Punkte

Verhältnis Durch- messer/Tiefe	Verhältnis Ab- stand/Durchmesser	Tiefe	Druckabfall [Pa]
2,0	1,50	5,0	36,0
2,0	2,25	52,5	27,0
1,5	2,25	100,0	44,5
1,5	3,00	52,5	28,0
1,5	2,25	52,5	32,0
1,5	1,50	52,5	180,0
1,0	1,50	100,0	31,5
1,0	2,25	52,5	33,0
1,5	2,25	52,5	44,0
1,5	2,25	52,5	553,0
2,0	3,00	100,0	206,0
1,0	3,00	5,0	109,5
2,0	3,00	5,0	41,0
1,5	2,25	52,5	28,0
1,0	3,00	100,0	65,5
1,0	1,50	5,0	30,0
2,0	1,50	100,0	97,0
1,5	2,25	52,5	31,0
1,5	2,25	52,5	33,0
1,5	2,25	5,0	39,0

Laserstrukturen: Linien

WWT [°C]	NDH [bar]	NDD [s]	ESD [bar]	ESVS [cm ³ /s]	KZ [s]	SD [bar]	EZT [°C]	DA [Pa]	FK [N]
50	1000	5	500	5	50	100	300	46	669,87
70	1000	5	500	5	5	-10	280	> 1400	584,96
50	2000	25	500	5	50	100	280	38	664,40
70	2000	25	500	5	5	-10	300	39	745,31
50	2000	5	2000	5	50	-10	300	41	688,96
70	2000	5	2000	5	5	100	280	43	677,37
50	1000	25	2000	5	50	-10	280	35	795,85
70	1000	25	2000	5	5	100	300	42	686,78
50	2000	5	500	40	5	100	300	41	695,22
70	2000	5	500	40	50	-10	280	35	680,28
50	1000	25	500	40	5	100	280	33	677,74
70	1000	25	500	40	50	-10	300	36	670,95
50	1000	5	2000	40	5	-10	300	32	671,69
70	1000	5	2000	40	50	100	280	37	675,91
50	2000	25	2000	40	5	-10	280	35	666,60
70	2000	25	2000	40	50	100	300	36	*

Prozessparameteranalyse 1-Rohr-Verbund: Screening

WWT	Werkzeugwandtemperatur
NDH	Nachdruckhöhe
NDD	Nachdruckdauer
ESD	Einspritzdruck
ESVS	Einspritzvolumenstrom
KZ	Kühlzeit
SD	Staudruck
EZT	Einzugstemperatur
DA	Druckabfall
FK	Festigkeit

NDD [s]	ESVS [cm ³ /s]	KZ [s]	EZT [°C]	FK [N]	DA [Pa]
5,0	5,000	5,000	280,0	945,829	46
25,0	5,000	5,000	280,0	943,437	38
5,0	40,000	5,000	280,0	924,225	42
25,0	40,000	5,000	280,0	923,825	61
5,0	5,000	50,000	280,0	927,608	38
25,0	5,000	50,000	280,0	950,284	38
5,0	40,000	50,000	280,0	925,251	32
25,0	40,000	50,000	280,0	933,865	38
5,0	5,000	5,000	300,0	931,430	31
25,0	5,000	5,000	300,0	928,902	33
5,0	40,000	5,000	300,0	915,760	31
25,0	40,000	5,000	300,0	911,644	34
5,0	5,000	50,000	300,0	913,620	35
25,0	5,000	50,000	300,0	905,887	33
5,0	40,000	50,000	300,0	912,102	36
25,0	40,000	50,000	300,0	914,428	38
0,0	22,500	27,500	290,0	940,581	280
31,1	22,500	27,500	290,0	944,373	32
15,0	3,000	27,500	290,0	953,189	33
15,0	50,675	27,500	290,0	944,064	35
15,0	22,500	0,000	290,0	949,253	169
15,0	22,500	63,725	290,0	927,994	33
15,0	22,500	27,500	273,9	950,580	34
15,0	22,500	27,500	306,1	950,169	32
15,0	22,500	27,500	290,0	936,296	34
15,0	22,500	27,500	290,0	946,958	42
15,0	22,500	27,500	290,0	939,140	36
15,0	22,500	27,500	290,0	951,381	38
15,0	22,500	27,500	290,0	955,120	43
15,0	22,500	27,500	290,0	920,125	35
15,0	22,500	27,500	290,0	880,294	38
15,0	22,500	27,500	290,0	944,027	38
15,0	22,500	27,500	290,0	959,650	34
15,0	22,500	27,500	290,0	929,005	36

Prozessparameteranalyse 1-Rohr-Verbund: quadratischer Versuchsplan

Dicke [mm]	Länge [mm]	Festigkeit [N]	Druckabfall [Pa]
2,3	8,9	920,479	39
3,7	8,9	935,894	44
2,3	18,1	943,213	53
3,7	18,1	935,946	57
2,0	13,5	935,000	55
4,0	13,5	931,839	61
3,0	7,0	930,000	40
3,0	20,0	919,194	67
3,0	13,5	947,754	69
3,0	13,5	904,871	61
4,0	20,0	955,000	41
4,0	20,0	955,000	41
4,0	20,0	955,000	41

Längen und Dickenreduktion der Aluminium-Kunststoff-Anbindung

ESVS [cm ³ /s]	ESD [bar]	NDH [bar]	NDD [s]	KZ [s]	WWT [°C]	SUG [m/min]	MT [°C]	HKT [°C]	SD [bar]	DA [Pa]	GA [%]
15	1500	500	5	5	110	30	315	310	0	43	1,01
50	1500	500	5	5	70	15	300	285	0	41	1,61
15	2000	500	5	5	70	15	300	310	-50	56	0,53
50	2000	500	5	5	110	30	315	285	-50	43	3,57
15	1500	1800	5	5	70	15	315	285	-50	78	0,96
50	1500	1800	5	5	110	30	300	310	-50	39	1,08
15	2000	1800	5	5	110	30	300	285	0	30	1,65
50	2000	1800	5	5	70	15	315	310	0	45	1,85
15	1500	500	25	5	70	30	300	285	-50	84	1,74
50	1500	500	25	5	110	15	315	310	-50	28	1,37
15	2000	500	25	5	110	15	315	285	0	55	0,57
50	2000	500	25	5	70	30	300	310	0	51	1,24
15	1500	1800	25	5	110	15	300	310	0	> 1400	0,84
50	1500	1800	25	5	70	30	315	285	0	39	3,21
15	2000	1800	25	5	70	30	315	310	-50	36	0,88
50	2000	1800	25	5	110	15	300	285	-50	35	1,73
15	1500	500	5	25	110	15	300	285	-50	39	0,79
50	1500	500	5	25	70	30	315	310	-50	36	2,13
15	2000	500	5	25	70	30	315	285	0	31	1,17
50	2000	500	5	25	110	15	300	310	0	27	1,85
15	1500	1800	5	25	70	30	300	310	0	42	1,87
50	1500	1800	5	25	110	15	315	285	0	43	1,27
15	2000	1800	5	25	110	15	315	310	-50	39	0,67
50	2000	1800	5	25	70	30	300	285	-50	36	1,28
15	1500	500	25	25	70	15	315	310	0	33	0,67
50	1500	500	25	25	110	30	300	285	0	63	1,59
15	2000	500	25	25	110	30	300	310	-50	33	1,33
50	2000	500	25	25	70	15	315	285	-50	26	1,27
15	1500	1800	25	25	110	30	315	285	-50	26	1,34
50	1500	1800	25	25	70	15	300	310	-50	31	1,55
15	2000	1800	25	25	70	15	300	285	0	49	1,50
50	2000	1800	25	25	110	30	315	310	0	40	0,84

Prozessparameteranalyse 5-Rohr-Verbund: Screening

ESVS	Einspritzvolumenstrom	SUG	Schneckenumfangsgeschwindigkeit
ESD	Einspritzdruck	MT	Massetemperatur
NDH	Nachdruckhöhe	HKT	Heißkanaltemperatur
NDD	Nachdruckdauer	SD	Staudruck
KZ	Kühlzeit	DA	Druckabfall
WWT	Werkzeugwandtemperatur	GA	Geometrieabweichung

ESVS [cm ³ /s]	ESD [bar]	SUG [m/min]	WWT [°C]	DA [Pa]	GA [%]
15,0	1500	15,0	70,0	260	1,09555
50,0	1500	15,0	70,0	64	1,02191
15,0	2000	15,0	70,0	121	0,81650
50,0	2000	15,0	70,0	46	0,33602
15,0	1500	30,0	70,0	118	0,98739
50,0	1500	30,0	70,0	24	1,57660
15,0	2000	30,0	70,0	179	2,04127
50,0	2000	30,0	70,0	26	0,78207
15,0	1500	15,0	110,0	66	0,46375
50,0	1500	15,0	110,0	58	0,54605
15,0	2000	15,0	110,0	66	0,61318
50,0	2000	15,0	110,0	49	0,24014
15,0	1500	30,0	110,0	71	0,52517
50,0	1500	30,0	110,0	69	0,88951
15,0	2000	30,0	110,0	80	0,88230
50,0	2000	30,0	110,0	158	0,41702
6,6	1750	22,5	90,0	> 1400	1,24181
58,4	1750	22,5	90,0	273	0,77980
32,5	1380	22,5	90,0	35	0,49434
32,5	2000	22,5	90,0	65	1,00864
32,5	1750	11,4	90,0	45	0,30117
32,5	1750	33,6	90,0	89	0,39109
32,5	1750	22,5	60,4	54	1,42982
32,5	1750	22,5	110,0	61	0,33270
32,5	1750	22,5	90,0	65	1,07304
32,5	1750	22,5	90,0	43	0,92831
32,5	1750	22,5	90,0	53	0,86942
32,5	1750	22,5	90,0	36	0,65029
32,5	1750	22,5	90,0	68	0,52222
32,5	1750	22,5	90,0	53	0,70079
32,5	1750	22,5	90,0	46	0,62072

Prozessparameteranalyse 5-Rohr-Verbund: quadratischer Versuchsplan