

Sven Friedrich

**Lineares Vibrationsschweißen von Kunststoffen
im industriellen Umfeld**

Sven Friedrich

**Lineares Vibrationsschweißen von Kunststoffen
im industriellen Umfeld**

- Einflüsse und Restriktionen -



TECHNISCHE UNIVERSITÄT
CHEMNITZ

Universitätsverlag Chemnitz
2014

Impressum

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Angaben sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Diss., 2014

Technische Universität Chemnitz/Universitätsbibliothek

Universitätsverlag Chemnitz

09107 Chemnitz

<http://www.tu-chemnitz.de/ub/univerlag/>

Herstellung und Auslieferung

Verlagshaus Monsenstein und Vannerdat OHG

Am Hawerkamp 31

48155 Münster

<http://www.mv-verlag.de>

ISBN 978-3-944640-22-8

<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa-148986>



**Lineares Vibrationsschweißen von Kunststoffen
im industriellen Umfeld**

- Einflüsse und Restriktionen -

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Sven Friedrich

geboren am 04.06.1981 in Karl-Marx-Stadt (jetzt: Chemnitz)

Tag der Einreichung: 23.04.2014

Tag der Verteidigung: 26.06.2014

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer

Prüfungsvorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Thomas Lampke

Bibliografische Beschreibung

Sven Friedrich

Lineares Vibrationsschweißen von Kunststoffen im industriellen Umfeld - Einflüsse und Restriktionen

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Fördertechnik und Kunststoffe, Professur Kunststoffe, Chemnitz, 2014

112 Seiten

91 Abbildungen

7 Tabellen

49 Literaturstellen

Referat

Aufgrund der stetig wachsenden Anforderungen hinsichtlich Gewichtsreduzierung und Funktionsintegration, besonders im Bereich des Automobilbaus, werden traditionell aus metallischen Werkstoffen gefertigte Komponenten immer häufiger durch Kunststoffbauteile substituiert. Dem entgegen steht derzeit die Tatsache, dass, trotz hohen Prozessverständnisses und des Wissens um die Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen beim Vibrationsschweißen, die theoretisch erzielbaren Schweißnahtfestigkeiten, von 90 % bis 100 % des unverstärkten Grundmaterials, in der industriellen Serienfertigung bei weitem nicht erreicht werden. Die Komplexität eines industriell gefertigten Bauteils wird an Plattenprüfkörpern simuliert. Die Ergebnisse der Schweißversuche zeigen, dass unterschiedliche Wandstärken im Schweißnahtbereich, Bauteilverzug und unterschiedliche Schwingrichtungen innerhalb einer Schweißnaht zu ungleichmäßigen lokalen Prozessbedingungen während des linearen Vibrationsschweißprozesses führen. Diese hinterlassen lokale Schwachstellen, welche das Gesamtbauteilversagen bestimmen. Durch alternative Prozessführungsstrategien, wie das Hochdruckanfahren und die IR-Vorwärmung, können diese Schwachstellen reduziert und die Gesamtbauteilfestigkeit angehoben werden. Dies wird am Beispiel des Bauteilverzugs veranschaulicht.

Schlagworte

lineares Vibrationsschweißen, Bauteilverzug, Schwingrichtung, Hochdruckanfahren, IR-Vorwärmung

Abstract

Due to the increasing demands for weight reduction and integration of function, especially in the field of automotive, components made of metallic materials are increasingly being substituted by components made of thermoplastic materials. In contrast to this there is currently the fact that, despite the high process understanding of the vibration welding and the knowledge of the process-structure-property relationships, the theoretically achievable weld strengths of 90 % to 100 % of the unreinforced base material strength are far to be achieved in industrial series production. The complexity of an industrially manufactured component is simulated by using plate test specimens. The results of the welding experiments show that different wall thicknesses in the weld area, component warpage and different friction angle within the weld leads to nonuniform local process conditions during linear vibration welding process. This results in local weak spots, which reduce the total component strength. These local weak spots can be reduced by using alternative process strategies, such as in-process pressure variation and IR preheating. So not only the local strengths but also the total component strength will be increased. This is shown on the example of component warpage.

Keywords

linear vibration welding, component warpage, friction angle, in-process pressure variation, IR preheating

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Jahren 2007 bis 2014 an der Professur Kunststoffe der Technischen Universität Chemnitz.

Angeregt wurde diese Arbeit durch Prof. Dr.-Ing. Michael Gehde, Inhaber der Professur Kunststoffe, dem ich für die Betreuung, seine stete Unterstützung und die aus zahlreichen Diskussionen resultierenden Hinweise besonders danke.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer, Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, danke ich sehr für die wertvollen Hinweise und für die Übernahme des Korreferates.

Mein herzlicher Dank gilt allen Mitarbeitern der Professur Kunststoffe, welche durch ihre stete Unterstützung und die wertvollen Beiträge diese Arbeit erst möglich gemacht haben. Besonderer Dank gilt hier den Herren Frank Werner, Rocco Sickel und Sven Mauersberger.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Studenten, welche durch ihre Arbeit wesentlich zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben. Besonders hervorheben möchte ich hier Manuela Schmidt, Franz Schuiszils, Norbert Friedmann, Oliver Lämmerzahl, Christian Müller und Marc Weiser.

Die Untersuchungen wurden wesentlich durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) und die Forschungsvereinigung des Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS) unterstützt.

Besonderer Dank gilt den Firmen BASF SE, Ludwigshafen und Lanxess Deutschland GmbH, Leverkusen für die kostenlose Bereitstellung der Versuchswerkstoffe.

Für die stete und geduldige Unterstützung während meiner gesamten Promotionszeit danke ich meiner lieben Familie.

Inhaltsverzeichnis

Bibliografische Beschreibung	vii
Vorwort	ix
1 Einleitung	17
2 Grundlagen	19
2.1 Technologie des Vibrationsschweißens	20
2.1.1 Prozessbeschreibung des linearen Vibrationsschweißens	20
2.1.2 Festigkeitsmechanismen	24
2.1.3 Mechanische Eigenschaften von Vibrationsschweißnähten	27
2.2 Prozessmodifikationen	31
2.2.1 Hochdruckanfahren	32
2.2.2 Vibrationsschweißen mit IR-Vorwärmung	33
3 Problemstellung und Lösungsansatz	37
4 Experimentelles	41
4.1 Untersuchte Werkstoffe	41
4.2 Prüfkörper	43
4.3 Schweißanlage	45
4.3.1 Maschine	45
4.3.2 Aufnahmewerkzeuge	46
4.3.3 IR-Vorwärmung	47
4.3.4 Infrarot-Kamera	49
4.3.5 Hochgeschwindigkeitskamera	50
4.4 Mechanische Prüfung	51
4.5 Polarisationsoptische Analysen	52
4.5.1 Durchlichtmikroskopie	52
4.5.2 Spannungsoptik	53
4.6 Thermoanalytische Untersuchungen	54
5 Ergebnisse	55
5.1 Schweißnahtgeometrie	55

5.2	Drucksensibilität der untersuchten Werkstoffe	61
5.2.1	Einfluss des Fügedrucks	61
5.2.2	Einfluss der Viskosität	64
5.3	Bauteilverzug	69
5.3.1	lokale Festigkeitsverteilung	69
5.3.2	Gesamtbauteilfestigkeit	75
5.3.3	Eigenspannungszustand	80
5.4	Bauteilausrichtung	83
5.5	Einfluss der Schwingrichtung	85
5.6	Verbesserungsansätze und -potential	93
6	Diskussion der Versuchsergebnisse	99
6.1	Schweißnahtgeometrie	99
6.2	lokale Prozessbedingungen	100
6.3	Übertragbarkeit der Ergebnisse auf industrielle Bauteile	102
6.4	alternative Prozessführungsmethoden	105
7	Zusammenfassung	107
	Literaturverzeichnis	109

Abkürzungen und Formelzeichen

Lateinische Formelzeichen

Δh	spezifische Enthalpiedifferenz	[J/kg]
Δh_F	spezifische Enthalpiedifferenz des Feststoffes	[J/kg]
A	Fügefläche	[mm ²]
a	Amplitude	[mm]
a_{eff}	effektive Amplitude	[mm]
a_F	Temperaturleitfähigkeit des Feststoffes	[m ² /s]
a_S	Temperaturleitfähigkeit der Schmelze	[m ² /s]
b	Wandstärke des Fügeteils	[mm]
F	Kraft	[N]
f	Frequenz	[Hz]
F_F	Fügekraft	[N]
F_R	Reibkraft	[N]
f_Z	Schweißnahtfaktor	[-]
h	freie Einspannlänge	[mm]
I	Flächenträgheitsmoment	[m ⁴]
K	Koeffizient des Potenzfließgesetzes	[Ns ⁿ /m ²]
L	Schmelzeschichtdicke	[mm]
l	Länge	[mm]
L_0	Schmelzeschichtdicke in Phase 3	[mm]
L_R	Restschmelzeschichtdicke nach dem Abkühlen	[mm]

n	Exponent des Potenzfließgesetzes	[-]
p	Druck	[N/mm ²]
p_F	Fügedruck	[N/mm ²]
p_H	Haltedruck	[N/mm ²]
R_Z	gemittelte Rauhtiefe	[μm]
s_F	Fügeweg	[mm]
s_S	Schweißweg	[mm]
t	Zeit	[s]
T_0	Ausgangstemperatur	[K]
t_{aus}	Ausschwingzeit	[s]
T_k	Kristallitschmelztemperatur	[K]
t_P	Prozesszeit	[s]
t_S	Schweißzeit	[s]
u	Durchbiegung	[mm]
v_{eff}	Reibrelativgeschwindigkeit	[m/s]
v_F	Fügeschwindigkeit	[m/s]

Griechische Formelzeichen

α	Winkel zwischen x und y	[°]
λ_F	Wärmeleitfähigkeit des Feststoffes	[W/(m · K)]
μ	Reibzahl	[-]
ρ_F	Dichte des Feststoffes	[g/cm ³]
σ_R	Reißfestigkeit	[N/mm ²]

Abkürzungen

ca.	zirka
DIN	Deutsches Institut für Normung

DSC	Dynamische Differenzkalorimetrie
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
E-Modul	Elastizitätsmodul
et al.	und andere
exo	exotherm
fps	frames per second (Bilder pro Sekunde)
Gl.	Gleichung
IR	Infrarot
IRo	einseitige Infrarot-Vorwärmung
IR ²	beidseitige Infrarot-Vorwärmung
MFI	Melt Flow Index (Schmelzeflussindex)
PA	Polyamid
PA-GF	Polyamid mit Glasfaserverstärkung
PA6	Polyamid 6
PA6-HV	Polyamid 6 mit hoher Viskosität
PA6-MV	Polyamid 6 mit mittlerer Viskosität
PA6-NV	Polyamid 6 mit niedriger Viskosität
PA66	Polyamid 66
PA66-GF30	Polyamid 66 mit 30 Gewichtsprozent Glasfaseranteil
PBT	Polybutylenterephthalat
PC	Polycarbonat
PP	Polypropylen
S.	Seite
VIB	Vibrationsschweißen

1 Einleitung

Das Schweißen ist, neben dem Kleben und der mechanischen Verbindungstechnik, eine der meist eingesetzten Fügetechniken zum Verbinden thermoplastischer Formteile. Besonders im Bereich der Großserienfertigung hat sich dabei das Vibrationsschweißen etabliert. Gründe hierfür sind die vergleichsweise kurze Zykluszeit, die hohe Flexibilität sowie die einfache In-Line-Prozessüberwachung anhand der Fügeweg-Zeit-Verlaufskurve.

In den letzten 20 Jahren wurde das Verfahren stetig weiterentwickelt, um den wachsenden Anforderungen der Industrie hinsichtlich Prozesssicherheit und vor allem Sauberkeit gerecht zu werden. So bieten inzwischen alle relevanten Maschinenhersteller Anlagen mit kombinierter IR-Vorwärmung an, um die prozessbedingte Partikelbildung aufgrund der Feststoffreibung zu reduzieren [N.N14a, N.N14b, N.N14c]. Des Weiteren haben sich Antriebskonzepte durchgesetzt, welche ein möglichst schnelles Abbremsen beim Abschalten der Schwingung ermöglichen. Zusammen mit der Umstellung von hydraulischen auf servomotorische Hubtischantriebe konnte so die für die Großserienfertigung wirtschaftlich entscheidende Prozesszeit deutlich optimiert werden.

Aufgrund der stetig wachsenden Anforderungen hinsichtlich Gewichtsreduzierung und Funktionsintegration, besonders im Bereich des Automobilbaus, werden traditionell aus metallischen Werkstoffen gefertigte Komponenten immer häufiger durch Kunststoffbauteile substituiert. Dem entgegen steht derzeit die Tatsache, dass, trotz hohen Prozessverständnisses und des Wissens um die Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen beim Vibrationsschweißen, die theoretisch erzielbaren Schweißnahtfestigkeiten, von 90 % bis 100 % des unverstärkten Grundmaterials, in der industriellen Serienfertigung bei weitem nicht erreicht werden. Dies hat eine deutliche Überdimensionierung des Bauteiles im Schweißnahtbereich zur Folge, um die geforderten mechanischen Eigenschaften garantieren zu können. Derzeit gibt es keine hinreichenden Erkenntnisse über die genauen Ursachen dieser Festigkeitsminderung.

Ziel dieser Arbeit ist deshalb die systematische Analyse von möglichen Störfaktoren, welche den Vibrationsschweißprozess im industriellen Umfeld negativ beeinflussen. Dabei stehen vor allem mögliche Ursachen im Fokus, die aus den komplexen Bauteilgeometrien resultieren. Mit dem Wissen um die Einflüsse einzelner Störfaktoren auf den Prozessablauf können gezielt Gegenmaßnahmen entwickelt werden, welche auch im industriellen Umfeld zu einer höheren Schweißnahtqualität führen und somit das hohe Potential zur Einsparung von Material und Gewicht bei vibrationsgeschweißten Kunststoffbauteilen ermöglichen.

2 Grundlagen

Schweißen ist nach DIN 8580 [DIN03] das Vereinigen von Werkstücken in der Schweißzone unter Anwendung von Wärme und/oder Kraft, mit oder ohne Zusatzwerkstoff. Dabei wird der Kunststoff durch Einbringung von Energie im Bereich der Fügefläche aufgeschmolzen und unter Druck zum Fließen gebracht. Aufgrund dieses Fließens können Diffusionsvorgänge zwischen den beiden Kunststoffschmelzen beschleunigt werden. Anschließend kühlt die Schweißnaht ab.

Die zum Aufschmelzen benötigte Energie kann direkt von einer externen Wärmequelle in die Kunststoffbauteile eingebracht werden (Fremderwärmung). Hierfür stehen drei physikalische Transportwege zur Verfügung: Wärmeleitung, -konvektion und -strahlung. Alternativ kann die Wärme direkt in der Fügezone durch innere Werkstoffreibung oder äußere Grenzflächenreibung erzeugt werden (Eigenerwärmung). Neben der Einteilung der Schweißverfahren nach der Art der Wärmeerbringung, können diese auch in ein- und zweistufige Prozesse unterteilt werden. Während bei den zweistufigen Prozessen die Schmelzeerzeugung und das Fügen zeitlich getrennt ablaufen, finden diese beiden Prozessschritte bei den einstufigen Verfahren gleichzeitig statt. Bild 2.1 listet die am Markt etablierten Serienschweißverfahren auf und unterteilt diese hinsichtlich ihrer Art der Wärmeerbringung sowie in ein- und zweistufige Prozesse.

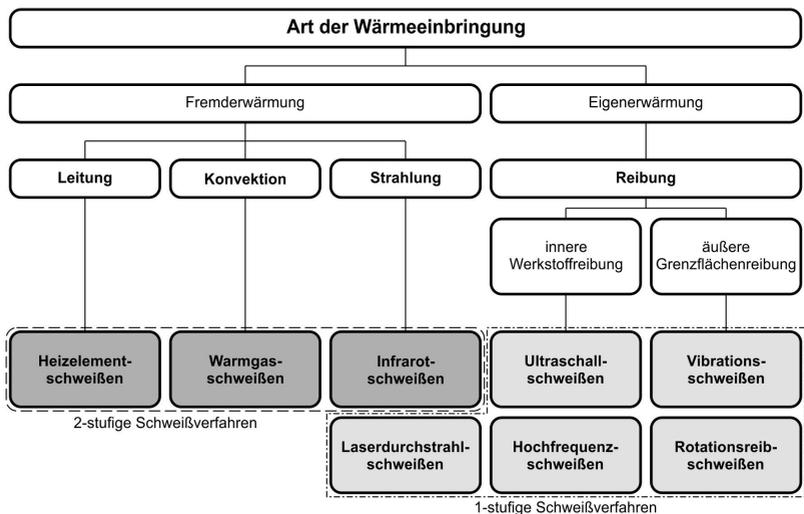


Bild 2.1: Einteilung der Serienschweißverfahren nach der Art der Wärmeerbringung;

2.1 Technologie des Vibrationsschweißens

Beim Vibrationsschweißen werden die beiden Fügepartner unter definiertem Fügedruck durch eine oszillierende Reibrelativbewegung erwärmt, bis diese aufschmelzen und ein ausreichender Schmelzefluss stattgefunden hat. Dabei können die in Bild 2.2 gezeigten Verfahrensvarianten hinsichtlich der Reibbewegung unterschieden werden.

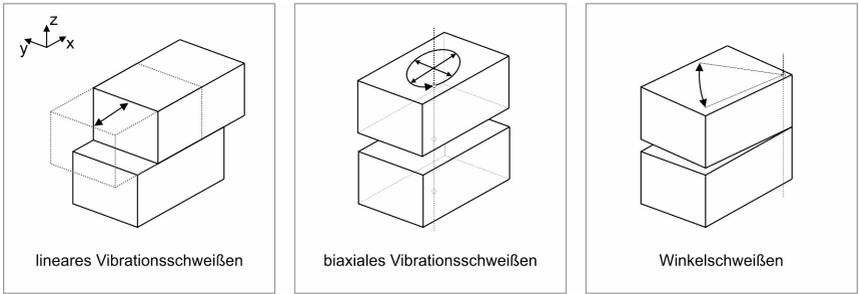
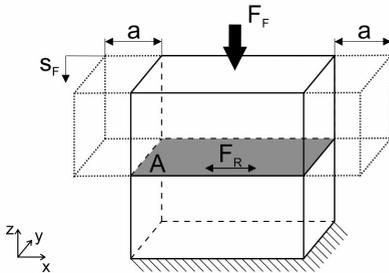


Bild 2.2: Verfahrensvarianten des Vibrationsschweißens;

Sowohl die Verfahrensvariante des orbitalen Vibrationsschweißens als auch das Winkelschweißen setzen zwei Freiheitsgrade (x- und y-Richtung) hinsichtlich der Auslenkbarkeit der beiden Fügepartner gegeneinander voraus. Dies führt zu starken Einschränkungen hinsichtlich des möglichen Bauteildesigns. Das lineare Vibrationsschweißen benötigt hingegen den Freiheitsgrad nur in einer Achse (x-Achse) in der Größenordnung der Schwingweite. Dies ist einer der Gründe, warum sich das lineare Vibrationsschweißen gegenüber den beiden anderen Verfahren am Markt etabliert hat.

2.1.1 Prozessbeschreibung des linearen Vibrationsschweißens

Beim linearen Vibrationsschweißen werden die beiden Fügepartner unter einem definierten Fügedruck p_F in nur einer Richtung um die Amplitude a gegeneinander ausgelenkt (Bild 2.3).



Reibrelativbewegung:

$$x(t) = a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t)$$

Reibkraft:

$$F_R = p_F \cdot A \cdot \mu$$

Fügedruck:

$$p_F = F_F / A$$

Bild 2.3: Prinzip des linearen Vibrationsschweißens; Reibrelativbewegung parallel zur x-Achse;

Die oszillierende Reibrelativbewegung kann als Sinusschwingung definiert werden:

$$x(t) = a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \quad (2.1)$$

Aufgrund der Reibrelativbewegung und der wirkenden Reibkraft kommt es zu einer Schmelzebildung und -verdrängung in der Kontaktzone. Nach Beendigung des Vibrationsvorganges wird die Schmelze unter einem definierten Haltedruck p_H abgekühlt und stoffschlüssig verbunden. Die folgenden Parameter beschreiben den Prozess:

- Frequenz f : Frequenz der Schwingung
- Amplitude a : einfache Auslenkung der Schwingung (halbe Schwingweite)
- Fügedruck p_F : Fügkraft bezogen auf die Fügefläche während des Schweißprozesses
- Haltedruck p_H : Fügkraft bezogen auf die Fügefläche während der Abkühlphase
- Schweißzeit t_S : Zeit bei eingeschalteter Vibration
- Prozesszeit t_P : komplette Zykluszeit ab Einlegen bis Entnahme der Fügeteile
- Schweißweg s_S : zurückgelegter Weg während eingeschalteter Vibration
- Fügeweg s_F : zurückgelegter Weg während des kompletten Prozesses

Die Parameter Frequenz und Amplitude beschreiben die Reibrelativgeschwindigkeit zwischen den beiden Fügepartnern:

$$v_{eff} = (2\pi/\sqrt{2}) \cdot a \cdot f \quad (2.2)$$

Je nach Anlagenkonzept werden Frequenzen von 100 Hz bis 300 Hz und Amplituden zwischen 0,25 mm und 2,5 mm verwendet. Dabei gilt, je kleiner die Frequenz, desto größer die Amplitude und umgekehrt. Nach [Gie95] liegen übliche Reibrelativgeschwindigkeiten zwischen 500 mm/s und 1300 mm/s.

Bei dem am Markt etablierten elektromagnetischen Anlagenkonzept ist die Frequenz von der Masse des Schwingsystems abhängig (Resonanzfrequenz) und somit von der Anlage vorgegeben. Die Reibrelativgeschwindigkeit kann bei diesen Systemen über die Amplitude eingestellt werden. Um die Prozesszeit zu minimieren, wird die Amplitude so groß wie möglich gewählt. Limitiert wird diese bei komplexen Bauteilen durch mögliche geometrische Kollisionen im Bauteil. Außerdem muss die Amplitude kleiner der Bauteilwandstärke gewählt werden, um ein Abrutschen der zu fügenden Bauteile zu vermeiden (im Bereich der Querschwingung). Die erzeugte Reibleistung wird zusätzlich durch den herrschenden Fügedruck und die werkstoffabhängige Reibzahl μ zwischen den Oberflächen der beiden Fügepartner bestimmt.

Der Schweißweg bzw. die Schweißzeit sind die Steuergrößen zum Abschalten der Vibration. Man unterscheidet hierbei zwischen weg- oder zeitgesteuerter Prozessführung. Da die Fügeweg-Zeit-Verlaufskurve (vgl. Bild 2.4) zur Charakterisierung bzw. qualitativen Bewertung

des Vibrationsschweißprozesses dient, hat sich die weggesteuerte Prozessführung in der Praxis etabliert. Nach [PMR87, Sto88a, Sch89] lässt sich der Prozess in vier aufeinanderfolgende Phasen einteilen:

- Phase 1: Feststoffreibung
- Phase 2: instationäre Schmelzebildung
- Phase 3: quasistationäre Schmelzebildung
- Phase 4: Ausschwingen und Abkühlen unter Druck

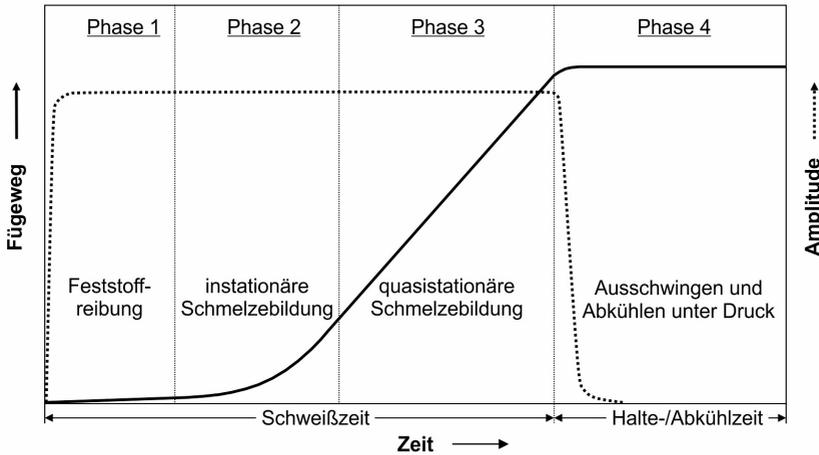


Bild 2.4: prinzipieller Prozessverlauf beim linearen Vibrationsschweißen mit Phaseneinteilung;

Phase 1 - Feststoffreibung

Die erste Phase nach Einschalten der Vibrationsbewegung wird von Feststoffreibung dominiert, welche nach Coulomb wie folgt definiert ist:

$$F_R = p \cdot A \cdot \mu \tag{2.3}$$

Nach [Erh80] kann die Werkstoffbelastung bei trockener Reibung auf Adhäsions- und Deformationsmechanismen zurückgeführt werden. Bei glatten Oberflächen ($R_z \leq 0,3 \mu\text{m}$) und geringer Flächenpressung ($p \leq 1 \text{ N/mm}^2$) dominieren die Adhäsionsmechanismen, welche der Relativbewegung zwischen den beiden Werkstoffen einen Widerstand entgegensetzen. Diese beruhen auf zwischenmolekularen Bindungskräften (Dispersionskräfte, Dipolkräfte, Wasserstoffbrückenbindungen, Ionenkräfte). Bei höheren Flächenpressungen ($p > 1 \text{ N/mm}^2$) und/oder rauhen Oberflächen ($0,3 \mu\text{m} < R_z < 2,8 \mu\text{m}$) dominieren die Deformationsmechanismen, welche auf mechanische Verharkungen zurückzuführen sind. Durch die Relativbewegungen und die daraus resultierenden Scherkräfte kann es zu lokalen Überschreitungen der kritischen Schubspannung im Werkstoff kommen.

Durch die Reibenergie werden die Fügeflächen bis zur Schmelztemperatur erwärmt. Nach [Kai92] entstehen zunächst partiell dünne Schmelzefilme, welche aufgrund der Reibrelativbewegung zu sogenannten „Fusseln“ aufgerollt werden. Mit Erreichen eines vollständigen Schmelzefilms zwischen den beiden Fügepartnern beginnt die Phase der instationären Schmelzebildung.

Für ideale Oberflächen kann nach *Potente u.a.* [PMR87] und *Stokes* [Sto88b] die Zeit bis zum ersten Aufschmelzen wie folgt berechnet werden:

$$t = \frac{\pi}{a_F} \cdot \left[\frac{\lambda_F(T_k - T_0)}{2\mu \cdot p \cdot v_{eff}} \right]^2 \quad (2.4)$$

Beim Abgleich der errechneten Werte mit den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen stellte *Stokes* jedoch fest, dass die gemessenen Zeiten bis zur ersten Schmelzebildung deutlich über den berechneten Werten lagen. Dies wird vor allem auf die Temperaturabhängigkeit der benötigten Stoffwerte zurückgeführt. *Potente* empfiehlt deshalb, die Berechnung als Summenformel anzustellen und die Temperaturdifferenz zwischen Umgebungs- und Schmelztemperatur in möglichst viele Intervalle zu unterteilen (Gl. 2.5). So können für jeden Temperaturbereich die entsprechenden Stoffwerte zur Berechnung verwendet werden.

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{\pi}{a_F} \cdot \left[\frac{\lambda_F(T_i - T_{i-1})}{2\mu \cdot p \cdot v_{eff}} \right]^2 \quad (2.5)$$

Phase 2 - instationäre Schmelzebildung

Sobald sich ein dünner Schmelzefilm zwischen den beiden Fügepartnern ausgebildet hat, sinkt der Anteil der Energieumsetzung durch Oberflächenreibung. Ein Teil der kinetischen Energie der Reibrelativbewegung wird in der Schmelze dissipiert. Ein weiterer Teil wird in der Schmelze elastisch gespeichert. Diese beiden Anteile wachsen mit zunehmender Schmelzeschichtdicke. Gleichzeitig wird Wärmeenergie durch den lateralen Schmelzefluss infolge des herrschenden Fügedruckes in die Schweißwulst abgeführt. Solange die zugeführte Energie größer ist als die abgeführte, nimmt die Dicke des Schmelzepolsters zu. In der Fügeweg-Zeit-Verlaufskurve (Bild 2.4) ist dies durch eine progressive Zunahme des Fügeweges gekennzeichnet. Die Abschmelzgeschwindigkeit nimmt über die komplette 2. Phase zu, bis ein Gleichgewicht zwischen zugeführter und abgeführter Energie entsteht.

Nach [PMR87] kann die Schmelzeschichtdicke in Abhängigkeit von der Zeit wie folgt berechnet werden:

$$L(t) = \left[\frac{2K \cdot v_{eff}^{n+1} \cdot a_S \cdot (n+3)}{\rho_F \cdot \Delta h_F} \right]^{\frac{1}{n+3}} \cdot t^{\frac{2}{n+3}} \quad (2.6)$$

Phase 3 - quasistationäre Schmelzebildung

Mit zunehmender Schmelzeschichtdicke nimmt die infolge der Schmelzescherung dissipierte Energie ab. Des Weiteren nimmt die Abschmelzgeschwindigkeit und damit die Energieab-

führung in die Schweißwulst zu. In der Phase der quasistationären Schmelzebildung stellt sich nun ein Energiegleichgewicht ein. Es wird genau so viel Schmelze am Übergang zum Feststoff erzeugt, wie in die Schweißwulst abgeführt wird. Dies ist durch eine konstante Fügegengeschwindigkeit und damit einen linearen Anstieg der Fügeweg-Zeit-Verlaufskurve (vgl. Bild 2.4) gekennzeichnet. Nach *Potente u.a.* [PMR87] können die konstante Schmelzeschichtdicke und die Fügegengeschwindigkeit in der Phase der quasistationären Schmelzebildung wie folgt berechnet werden:

$$L_0 = \left[\frac{K \cdot v_{eff}^{n+1} \cdot d}{2\rho_S \cdot \Delta h} \cdot \frac{2n+1}{n} \cdot \left(\frac{K \cdot b}{\Delta p} \right)^{1/n} \right]^{\frac{1}{2+n+1/n}} \quad (2.7)$$

$$v_F = \frac{\rho_S}{\rho_F} \cdot \left(\frac{\Delta p}{K \cdot b} \right)^{1/n} \cdot \frac{n \cdot L_0^{2+1/n}}{b \cdot (2n+1)} \quad (2.8)$$

Phase 4 - Ausschwingen und Abkühlen unter Druck

Mit dem Abschalten der Vibrationsbewegung beginnt die Abkühlphase. Dabei wird die Amplitude der Schwingung stetig kleiner und somit nimmt auch der Energieeintrag in die Fügezone ab. Durch den wirkenden Fügedruck wird weiterhin Schmelze aus dem sich nun verringernenden Spalt in die Schweißwulst verdrängt. Durch Wärmeleitung in das Grundmaterial wird die Schmelze gleichzeitig abgekühlt und somit die Viskosität erhöht. Erreicht die Viskosität der Schmelze einen ausreichenden Widerstand gegen den wirkenden Fügedruck, ist der Fließvorgang beendet. Mit dem Unterschreiten der Kristallisationstemperatur (bei teilkristallinen Thermoplasten) beginnen die Rekristallisationsvorgänge in der Fügezone. Die dabei entstehende Struktur bestimmt maßgeblich die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht.

Die endgültige Schmelzeschichtdicke kann analog zu den Ansätzen beim Heizelementstumpfschweißen nach [PMR87] wie folgt berechnet werden:

$$L(t) = L_0 \left[1 + \frac{2^{1+1/n} \cdot (2+n)^{1/n} \cdot (1+n)}{1+2n} \cdot \left(\frac{p \cdot L_0^{1+n}}{K \cdot d^{1+n}} \right)^{1/n} \cdot t \right]^{-\frac{n}{1+n}} \quad (2.9)$$

2.1.2 Festigkeitsmechanismen

In der Literatur finden sich zahlreiche Theorien, welche sich mit der Verbundfestigkeit von zwei thermoplastischen Fügepartnern befassen. *Bonten* [Bon98] und *Tüchert* [Tüc05] haben die für das Kunststoffschweißen relevanten Theorien zusammengetragen und hinsichtlich der erreichbaren Schweißnahtqualität diskutiert.

Die Adhäsionstheorie [Kae71] besagt, dass die entstehende spontane Haftung zwischen zwei Fügepartnern umso besser ist, je ähnlicher der polare Anteil der Oberflächenenergien der beiden Fügepartner ist. Dass diese Theorie den Verbindungsmechanismus zwischen zwei Kunststoffschmelzen nicht hinreichend beschreiben kann, zeigten Untersuchungen [Gab81], bei denen

nach Adhäsionstheorie kompatible Werkstoffe keine hinreichende Verbundfestigkeit aufwiesen. Gabler [Gab81] stellte daraufhin zwei weitere Kriterien auf, welche erfüllt sein müssen, damit zwei Werkstoffe miteinander schweißbar sind. Neben einer ähnlichen Oberflächenenergie müssen die beiden Polymere einen ähnlichen Löslichkeitsparameter besitzen, um eine möglichst hohe Durchdringung zu ermöglichen. Des Weiteren müssen die Werkstoffe einen ähnlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen, um mögliche Eigenspannungen durch unterschiedliche Wärmekontraktionen während der Abkühlphase zu vermeiden. Diese drei Kriterien können besonders bei der Betrachtung von Mischmaterialschweißungen unterstützen, beschreiben jedoch keinesfalls den Verbindungsmechanismus zwischen zwei Fügepartnern hinreichend. Auch die Diffusionstheorie [Voy63], wonach die Adhäsion zwischen zwei Fügepartnern auf der Interdiffusion von Makromolekülen im Bereich der Grenzschicht beruht, liefert alleine betrachtet keinen hinreichenden Ansatz, da diese viel zu langsam abläuft und die schon nach kurzer Zeit erreichbaren, hohen Festigkeiten [Pot77] nicht erklärt. Deshalb müssen zusätzlich die rheologischen Vorgänge während der Fügephase betrachtet werden.

Ausgehend von einem Zwei-Platten-Modell mit einem Fließkanal mit konstantem Querschnitt, durchläuft der Werkstoff drei ortsabhängige Stadien. Diese sind nach [Pie75, Sch89, Ehr04, Pot04] in Bild 2.5 dargestellt.

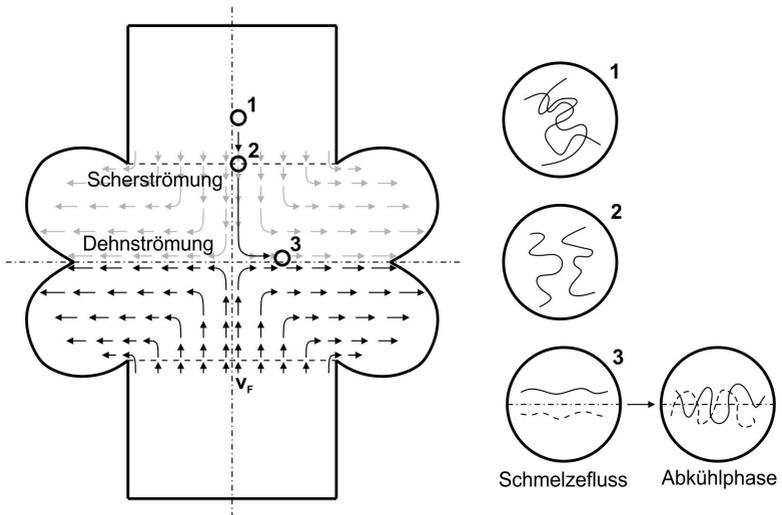


Bild 2.5: schematische Darstellung der Schmelzeströmung im Fließkanal nach [Pie75, Sch89, Ehr04, Pot04];

Die Betrachtung bezieht sich auf die Phase der quasistationären Schmelzebildung (Phase 3) beim linearen Vibrationsschweißen, bei der eine konstante Schmelzeschichtdicke den Fließkanal bildet. Aufgrund des stetigen Abschmelzvorganges wird der sich im Feststoffzustand

befindliche Werkstoff mit der Fügegeschwindigkeit v_F an die Fügezone herangeführt und dabei durch Wärmeleitvorgänge stetig erwärmt (Bild 2.5 - Nr. 1). Am Übergang zum Fließkanal wird der Werkstoff aufgeschmolzen und infolge des Quetschfließens und der prozessbedingten Reibrelativbewegung stark geschert. Dies kann zum Lösen von Verschlaufungen zwischen den Molekülketten führen (Bild 2.5 - Nr. 2). Aufgrund des konstanten Fließkanalquerschnitts nimmt die Fließgeschwindigkeit in Richtung der Schweißwulst stetig zu. Die daraus resultierende Dehnströmung verstreckt die Molekülketten und richtet diese parallel zur Fügeebene aus (Bild 2.5 - Nr. 3). Nach Beendigung der Fließvorgänge in der Abkühlphase können die verstreckten Molekülketten relaxieren. Im Bereich der Fügeebene kommt es zu Platzwechsellvorgängen über die Fügeebene hinweg [Pot04, Ehr04, KGE05, Geh06a, Mic06, Geh07, Geh06b]. Die von *Voyutskii* [Voy63] beschriebene Interdiffusion der Makromoleküle im Bereich der Grenzfläche wird somit durch die Dehnströmung beschleunigt.

Zur Bestätigung dieser Modellvorstellung kann das Versagensverhalten einer Schweißnaht im Mikrozugversuch herangezogen werden. Bild 2.6 zeigt die Serienaufnahme einer Vibrationschweißnaht aus PBT unter Zugbelastung. Das Versagen beginnt genau im Scheitelpunkt der Schweißnaht, wo die Fließgeschwindigkeit und damit auch die Dehnströmung am geringsten sind (Bild 2.6 b). Ausgehend von diesem Punkt öffnet sich die Schweißnaht wie ein Reißverschluss entlang der Grenzfläche (Bild 2.6 c-d). Im verstreckten Material der Schweißnaht sind orientierte Überstrukturen zu erkennen, welche das oben beschriebene Fließmodell bestätigen (Bild 2.6 f).

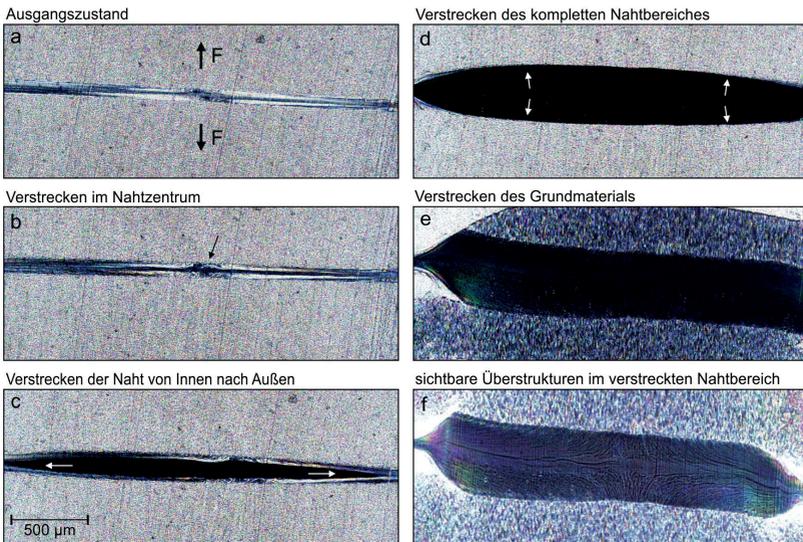


Bild 2.6: Serienaufnahme eines Mikrozugversuches einer Vibrationschweißnaht aus PBT; polarisierte Durchlichtmikroskopie;

2.1.3 Mechanische Eigenschaften von Vibrationsschweißnähten

Die mechanischen Eigenschaften einer Schweißnaht werden nicht nur durch die Verbindungsmechanismen im Bereich der Fügeebene bestimmt. Wesentlich ist auch die sich beim Abkühlen ausbildende Gefügestruktur im Fließkanal bei teilkristallinen Werkstoffen. Mit Beendigung der Vibrationsbewegung stoppt der Energieeintrag und die Temperatur im Fugebereich sinkt. Mit Erreichen der Rekristallisationstemperatur beginnt, ausgehend von den Kristallisationskeimen, die Bildung von Überstrukturen. Diese wird im Wesentlichen von der Anzahl der Keime, der Abkühlgeschwindigkeit und den Fließbedingungen beeinflusst.

In zahlreichen Untersuchungen wurde der Einfluss der einzelnen Prozessparameter auf die mechanischen Eigenschaften analysiert [Sto88c, Sto88d, EG89, Sch89, SE89, Sto90, Sto91, Gie92, Kai92, PU93b, PNPU93, Gie95, PU97, KKE05, EK06].

Stokes zeigte in seinen Untersuchungen [Sto89a, Sto89b], dass ein Mindestschweißweg erreicht werden muss, um hohe mechanische Eigenschaften zu erreichen. *Schlarb* [Sch89] systematisierte erstmalig diesen Zusammenhang zwischen Schweißweg und mechanischen Kennwerten. Er zeigte, dass die mechanischen Schweißnahteigenschaften vom Erreichen der Phase der quasistationären Schmelzebildung (Phase 3, vgl. Bild 2.4, S. 22) abhängig sind. Mit Erreichen der Phase 3 kann durch Erhöhung der Prozessparameter Schweißweg bzw. Schweißzeit keine weitere signifikante Festigkeitssteigerung erzielt werden.

Wird die Prozessphase 3 erreicht, so sind die Schweißnahteigenschaften nahezu unabhängig von der gewählten Frequenz und der eingestellten Amplitude. Allein der herrschende Fügedruck bestimmt die erreichbaren Schweißnahtfestigkeiten. Dabei gilt, je niedriger der Fügedruck, umso besser die mechanischen Kennwerte. Jedoch steigt gleichzeitig die benötigte Schweißzeit bis zum Erreichen der Phase 3. *Schlarb* begründet diese Fügedruckabhängigkeit mit der im Fließkanal herrschenden, maximalen Dehngeschwindigkeit. Diese ist direkt vom eingestellten Fügedruck abhängig. Bild 2.7 zeigt den Zusammenhang für Vibrationsschweißnähte aus PP. Mit Erreichen einer kritischen Dehngeschwindigkeit von 3 s^{-1} fallen die Festigkeitswerte ab, bis sie ab einer Dehngeschwindigkeit oberhalb von $4,5 \text{ s}^{-1}$ ein konstantes Niveau von 80 % (Reißfestigkeit) bzw. 50 % (Reißdehnung) der Ausgangswerte erreichen. Auch *Kaiser* [Kai92] zeigte einen ähnlichen Zusammenhang zwischen der im Fließkanal herrschenden Schergeschwindigkeit und den mechanischen Kennwerten auf. Jedoch zeigen seine Ergebnisse einen stetigen Festigkeitsabfall mit steigender Schergeschwindigkeit für das untersuchte PP.

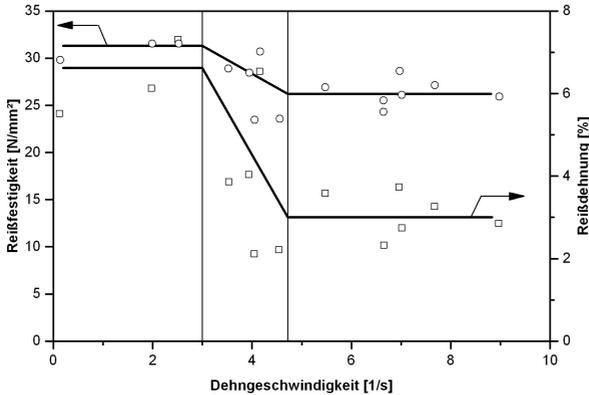


Bild 2.7: Einfluss der maximalen Dehngeschwindigkeit im Fließkanal auf die Reißfestigkeit und Reißdehnung von Vibrationsschweißnähten aus PP nach [Sch89];

Betrachtet man die Gefügestruktur, welche der Schweißprozess hinterlässt, so lassen sich nach [Sch89] und [Gie95] zwei Schweißnahtqualitäten definieren. Bild 2.8 zeigt den typischen Nahtaufbau, welcher bei Verwendung geringer Fügedrücke entsteht. Es ist eine 5-Schicht-Struktur zu erkennen. Im Zentrum befindet sich die Fügeebene mit der Grenzfläche der beiden Schmelzefronten. Es schließt sich eine innere Zone ohne sichtbare Überstrukturen an, gefolgt von einer rekristallisierten Schicht mit, im Vergleich zum Grundmaterial, sehr feinen Sphärolithen. Am Übergang zum Grundmaterial ist eine Zone mit in Fließrichtung deformierten Sphärolithen zu erkennen. Diese Gefügestruktur korreliert mit hohen mechanischen Eigenschaften. Giese setzt dafür Fügedrücke unterhalb 1 N/mm² voraus.

Fügedruck < 1 N/mm²

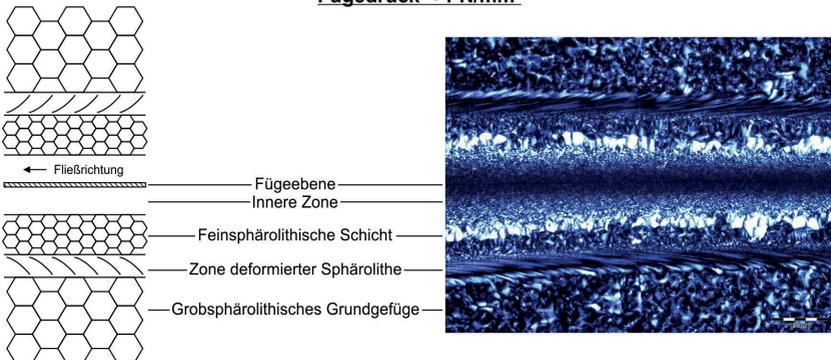


Bild 2.8: Gefügestruktur einer teilkristallinen Vibrationsschweißnaht bei Verwendung geringer Fügedrücke nach [Ege86, Sch89, Gie95]; links: schematisch; rechts: polarisationsoptische Durchlichtmikroskopie (Material: PP);

Bild 2.9 zeigt den typischen Nahtaufbau, welcher bei der Verwendung hoher Fügedrücke entsteht. Mit steigendem Fügedruck nimmt die Schmelzeschichtdicke, welche sich im Gleichgewichtszustand der Phase 3 einstellt, ab. Das geringere Schmelzevolumen führt zu einer höheren Abkühlgeschwindigkeit nach Abschalten der Vibrationsbewegung. Es steht weniger Zeit für Relaxations- und Rekristallisationsvorgänge zur Verfügung. Im Vergleich zur Gefügestruktur bei geringen Fügedrücken ist keine feinsphärolithische Schicht zwischen der inneren Zone und der Zone der deformierten Sphärolithe mehr erkennbar. Die Orientierung der Sphärolithe am Rand der Schweißnaht ist aufgrund der höheren Scherströmung deutlich stärker ausgeprägt. Die sich bei Beginn der Abkühlphase im Bereich der Schmelztemperatur befindlichen Sphärolithe können nicht hinreichend relaxieren und bilden strukturelle Kerben im Material. Die Zone der deformierten Sphärolithe bildet somit die Schwachstelle der Schweißnaht und kann unter mechanischer Belastung zum Bauteilversagen führen [Geh93, Bon98, Tüç05].

$1 \text{ N/mm}^2 \leq \text{Fügedruck} < 8 \text{ N/mm}^2$

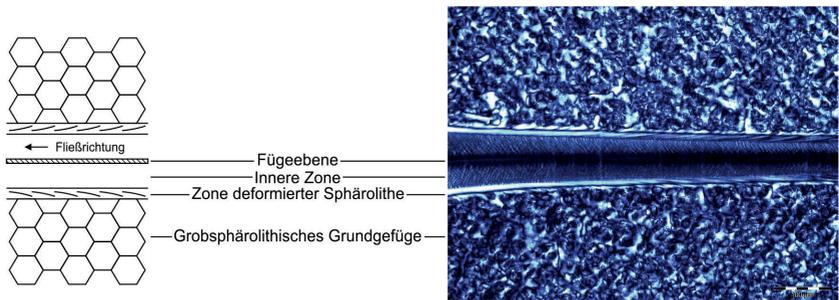


Bild 2.9: Gefügestruktur einer teilkristallinen Vibrationsschweißnaht bei Verwendung hoher Fügedrücke nach [Ege86, Sch89, Gie95]; links: schematisch; rechts: polarisationsoptische Durchlichtmikroskopie (Material: PP);

Diese Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen wurden von *Kuriykov et al.* [KKE05, EK06] eindrucksvoll am Einfluss der Ausschwingdauer beim Abschalten der Vibrationsbewegung zu Beginn der Abkühlphase nachgewiesen. Bis dahin war die Ausschwingdauer werkstoff- (Dämpfung), bauteil- (Fügefläche, Steifigkeit), parameter- (Fügedruck, Amplitude) und maschinenabhängig (schwingende Masse des Werkzeuges und des Schwingkopfes) [KKE05]. Durch die elektromagnetische Antriebstechnik wurde es erstmals möglich, die Schwingung durch gegenphasige Magnetwirkung gezielt abzubremesen. Dadurch konnte die Ausschwingdauer zwischen 30 ms und 740 ms variiert werden (Bild 2.10).

Bild 2.11 zeigt den Einfluss der Ausschwingdauer auf die mechanischen Schweißnahteigenschaften anhand der Spannungs-Dehnungs-Kurve im Zugversuch. Bei sonst gleichen Prozessparametern führt die Verringerung der Ausschwingdauer zu einem leichten Anstieg der Bruchspannung und zu einer deutlich verbesserten Bruchdehnung.

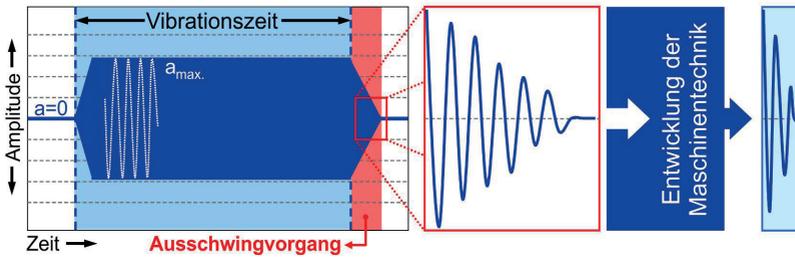


Bild 2.10: Amplitudenverlauf beim Vibrationssschweißen mit unterschiedlicher Ausschwingdauer nach [KKE05];

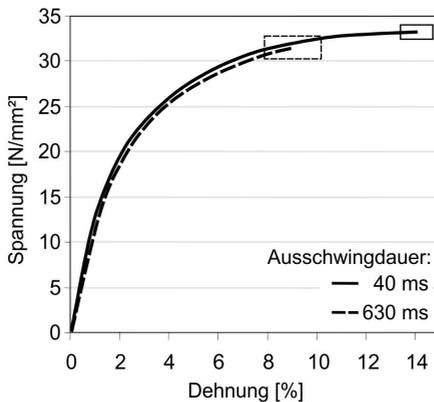


Bild 2.11: Einfluss der Ausschwingdauer auf die resultierenden Spannungs-Dehnungs-Diagramme nach [EK06];
 Zugversuche an Schweißnähten aus PP (Plattenprüfkörper); Fügedruck: 1,0 N/mm²; Amplitude: 0,6 mm; Schwingrichtung: linear längs;

Die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften sind mit den unterschiedlichen Abkühlbedingungen bei kurzer und langer Ausschwingdauer zu begründen. Während bei der gebremsten Schwingung die Vibrationsbewegung nach wenigen Hundertstelsekunden stoppt, wird bei ungebremster Schwingung trotz beginnender Abkühlung die Schmelze noch mehrere Zehntelsekunden durch die Vibrationsbewegung geschert. Bei kurzer Ausschwingdauer können die scherinduzierten Orientierungen in der Schmelze relaxieren und es findet nach dem Ausschwingen eine relativ ungestörte Rekristallisation statt. Bei langer Ausschwingzeit dauern die Schervorgänge in der Schmelze an und Überlagern sich mit der beginnenden Rekristallisation. Eine Struktur mit stark ausgeprägten deformierten Sphärolithen ist die Folge. Dementsprechend unterscheidet sich auch das Versagensverhalten der Schweißnähte mit kurzer und langer Ausschwingdauer. Während bei kurzer Ausschwingdauer der Riss bei Zugbeanspruchung weitgehend im Grundwerkstoff erfolgt (Bild 2.12 links), ist er bei langer Ausschwingdauer in der

Nähe des Randes der Schweißnaht zu erkennen (Bild 2.12 rechts) [EK06], welcher durch starke Orientierungen in Form der deformierten Sphärolithe gekennzeichnet ist.

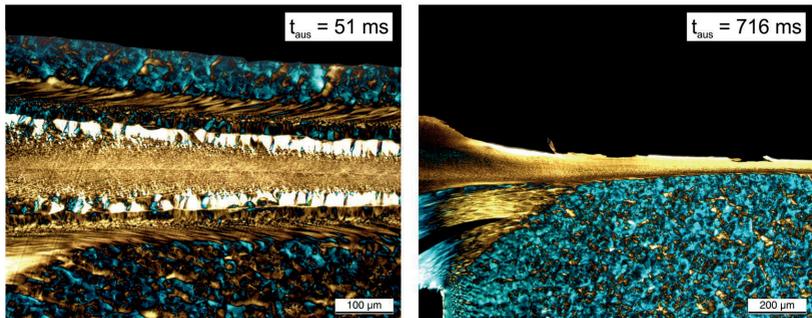


Bild 2.12: lichtmikroskopische Aufnahmen an beim Zugversuch geprüften Schweißnähten vibrationsgeschweißter Platten aus PP mit unterschiedlicher Ausschwingdauer nach [EK06]; Dünnschnitte; Fügedruck: 1,0 N/mm²; Amplitude: 0,6 mm; Schwingrichtung: linear längs;

Die Ergebnisse zum Einfluss der Ausschwingdauer zeigen, dass die in der Schweißnaht herrschenden Bedingungen zum Ende der Prozessphase 3 (Dicke des Schmelzepolsters) und über die komplette Phase 4 (Orientierungen, Schmelzescherung) bis zum vollständigen Erstarren der Schmelze für die Schweißnahteigenschaften entscheidend sind. Ebenfalls bestätigt wird dies durch die Untersuchungen von *Schlarb* [Sch89] zum Einfluss des Haltedrucks in der Abkühlphase. Wird, ausgehend von einem hohen Fügedruck, der Haltedruck in der Abkühlphase gesenkt, so erhöht sich zwar die Nahtdicke, der strukturelle Aufbau bleibt jedoch bestehen. Eine Verbesserung der Schweißnahteigenschaften kann nicht erzielt werden. Es besteht sogar die Gefahr, dass das Schmelzepolster zerreißt oder sich Vakuolen bilden. Wird der Haltedruck, ausgehend von einem niedrigen Fügedruck, erhöht, so wird die Schweißnahtdicke verringert und die 5-Schicht-Struktur, welche mit hohen mechanischen Eigenschaften korreliert, zerstört.

Alle aufgeführten Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass bei der richtigen Wahl der Prozessparameter, Schweißnahtfaktoren von 0,9 bis 1,0 bei unverstärkten Werkstoffen erreicht werden. Bei faserverstärkten Werkstoffen ist maximal die Grundmaterialfestigkeit des Matrixwerkstoffes erreichbar.

2.2 Prozessmodifikationen

Mit dem wachsenden Prozessverständnis haben sich über die Zeit alternative Prozessführungsstrategien entwickelt, welche auf die Anforderungen der Industrie eingehen.

2.2.1 Hochdruckanfahren

Da es sich beim Vibrationsschweißen um einen einstufigen Prozess handelt, bei dem die Schmelzeerzeugung und der Fügevorgang gleichzeitig stattfinden, sind die Erwärmzeit und damit auch die Zykluszeit immer an die erreichbaren mechanischen Eigenschaften gekoppelt. Je höher der verwendete Fügedruck ist, desto höher ist die erzeugte Reibleistung und desto kürzer ist auch die Zykluszeit. Hohe mechanische Eigenschaften können jedoch nur bei Verwendung geringer Fügedrücke erzielt werden. Die von *Schlarb* entwickelte und 1989 erstmals veröffentlichte Strategie des Hochdruckanfahrens [Sch89] zielt auf eine Verkürzung der Zykluszeit bei gleichbleibenden, hohen mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht ab.

Ausgehend von der Überlegung, dass die Phase der Feststoffreibung (Phase 1) und die Phase der instationären Schmelzebildung (Phase 2) keinen signifikanten Einfluss auf den strukturellen Nahtaufbau haben, wurde eine Prozessmodifikation entwickelt, welche mit einem hohen Fügedruck während dieser beiden ersten Prozessphasen arbeitet (Bild 2.13), um die Zeit bis zur Schmelzebildung zu minimieren. Mit Erreichen der Phase der quasistationären Schmelzebildung (Phase 3) wird der Fügedruck auf ein Niveau abgesenkt, bei welchem hohe mechanische Schweißnahtigenschaften erwartet werden. Anschließend durchläuft der Prozess ein zweites Mal die Phase 2, bis die konstante Schmelzeschichtdicke in Phase 3 für den geringeren Fügedruck erreicht ist.

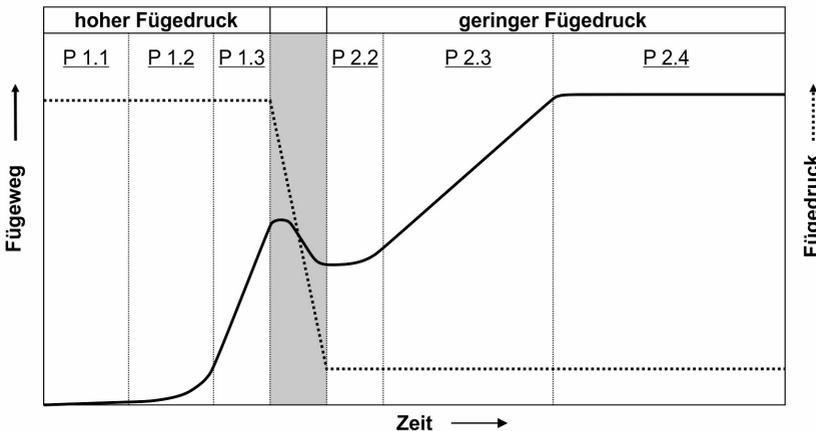


Bild 2.13: prinzipieller Prozessverlauf beim Hochdruckanfahren nach [Sch89, Gie95]; schematische Darstellung der Fügeweg- und Fügedruckverlaufskurve;

Bild 2.14 zeigt den Einfluss des Fügedrucks auf die benötigte Schweißzeit zum Erreichen der Phase 3 und die resultierenden mechanischen Eigenschaften in Form der Reißdehnung am Beispiel von Plattenprüfkörpern aus PP. Die höchste Reißdehnung von ca. 7 % wird bei

einem Fügedruck von $0,5 \text{ N/mm}^2$ erzielt. Jedoch wird eine Schweißzeit von 11 s benötigt, um die Phase der quasistationären Schmelzebildung zu erreichen. Mit der Erhöhung des Fügedruckes auf 8 N/mm^2 kann der Schweißprozess schon nach ca. 1 Sekunde beendet werden. Die erzielte Reißdehnung fällt dabei um knapp 65 % auf 2,5 % ab. Kombiniert man beide Fügedrücke in Form des Hochdruckanfahrens, so lässt sich die hohe Reißdehnung des geringen Fügedrucks bei deutlich geringerer Schweißzeit erreichen. Für das untersuchte PP gelang eine Schweißzeitreduzierung um ca. 3 Sekunden. Das entspricht gut 25 % der Gesamtschweißzeit.

Kaiser konnte das Potential dieser Prozessführung in späteren Untersuchungen [Kai92] für die Werkstoffe PP und PE bestätigen.

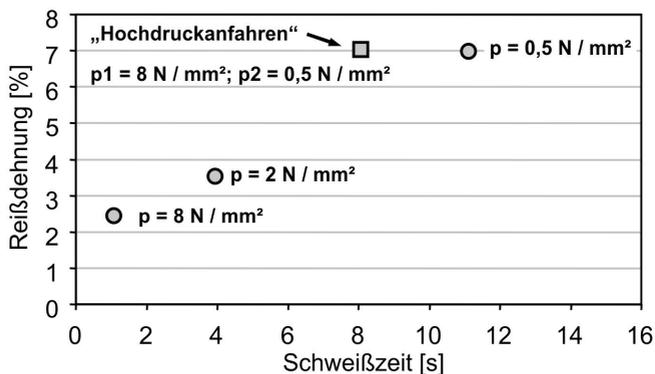


Bild 2.14: erreichbare Reißdehnungen und resultierende Schweißzeiten in Abhängigkeit des Fügedrucks nach [Sch89];
Material: PP; Amplitude: 0,7 mm; Schwingrichtung: linear längs;
Kreise: klassische Prozessführung; Quadrat: Hochdruckanfahren;

2.2.2 Vibrationsschweißen mit IR-Vorwärmung

Aufgrund der vergleichsweise kurzen Zykluszeit und der hohen Reproduzierbarkeit des Schweißergebnisses sowie der Prozessüberwachungsmöglichkeit anhand der Fügeweg-Zeit-Verlaufskurve hat sich das Vibrationsschweißen besonders im Automotive-Sektor etabliert. Mit den gestiegenen Anforderungen hinsichtlich der Sauberkeit in der Fertigung (Restschmutzverordnung der Automobilhersteller) stellten jedoch die Partikel- und Fusselbildung, welche in der Phase der Feststoffreibung (Phase 1) zwangsläufig verursacht werden, ein Problem dar. Bild 2.15 zeigt diesen Feststoffabrieb, welcher sich zum Teil während des Prozesses ablöst und als Partikel in der Schweißmaschine und im Bauteil niederlegt und zum Teil als Fussel an der Schweißwulst haftet.

Ausgehend von der Überlegung, dass dieser Feststoffabrieb nur in der ersten Prozessphase entsteht, wurde vom Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Universität Erlangen-Nürnberg im

Rahmen eines Forschungsprojektes [EKG05] das Vibrationsschweißen mit IR-Vorwärmung entwickelt, welches zum Ziel hat, die Phase 1 des Vibrationsschweißprozesses zu überspringen. Bild 2.16 zeigt den Prozessverlauf für diese Verfahrenskombination. Zunächst wird ein IR-Strahler zwischen die zu schweißenden Bauteile gefahren. Mit einem definierten Anwärmabstand werden nun die Fügeflächen der beiden Bauteile bis auf Schmelztemperatur erwärmt. In der anschließenden Umstellphase, welche sehr kurz sein muss, damit die Fügeflächen nicht zu stark abkühlen, wird der IR-Strahler aus dem Fügebereich herausgefahren. Während die Bauteile aufeinander zufahren, wird die Vibrationsbewegung gestartet, sodass sich die Bauteile bei bereits voll aufgebauter Amplitude berühren. Idealerweise ist durch die IR-Vorwärmung ein Schmelzefilm zwischen den beiden Bauteilen vorhanden, sodass der Vibrationsschweißprozess bereits in der Phase der instationären Schmelzebildung (Phase 2) beginnt.

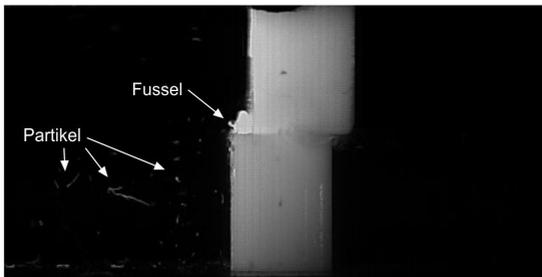


Bild 2.15: Partikel- und Fusselbildung beim Vibrationsschweißen;
 Aufnahme mit Hochgeschwindigkeitskamera bei 2000 fps;
 Material: PBT; Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schwingrichtung: linear quer;

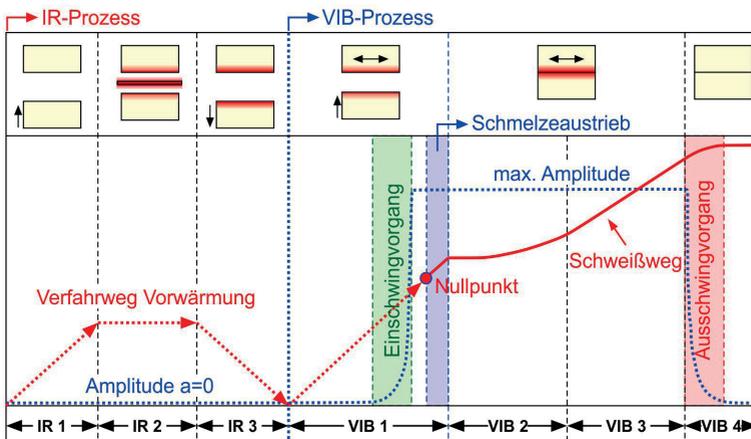


Bild 2.16: prinzipieller Prozessverlauf beim Vibrationsschweißen mit IR-Vorwärmung nach [KEK04];
 schematische Darstellung der Füge- und Amplitudenverlaufskurven;

Bild 2.17 zeigt den Effekt der IR-Vorwärmung auf die Partikel- und Fusselbildung an einem Volumenprüfkörper, welcher nach dem Schweißprozess mit Wasser gespült und die darin befindlichen Kunststoffpartikel gewogen wurden. Durch die IR-Vorwärmung konnte die Partikelmasse auf das Niveau einer reinen IR-Schweißung reduziert werden. Jedoch liegt hier die minimale Vorwärmzeit bei 10 Sekunden. Die Gesamtzykluszeit steigt nach [KEK04] von 9,4 Sekunden beim klassischen Vibrationsschweißprozess auf 17,2 Sekunden beim Vibrationsschweißen mit 10-sekündiger IR-Vorwärmung. Als positiver Nebeneffekt wird beim Vibrationsschweißen mit IR-Vorwärmung eine Steigerung der Berstdruckfestigkeit von ca. 25 % gegenüber dem reinen Vibrationsschweißen festgestellt. Ein Erklärungsansatz für diese enorme Festigkeitssteigerung wird in diesem Zusammenhang jedoch nicht gegeben.

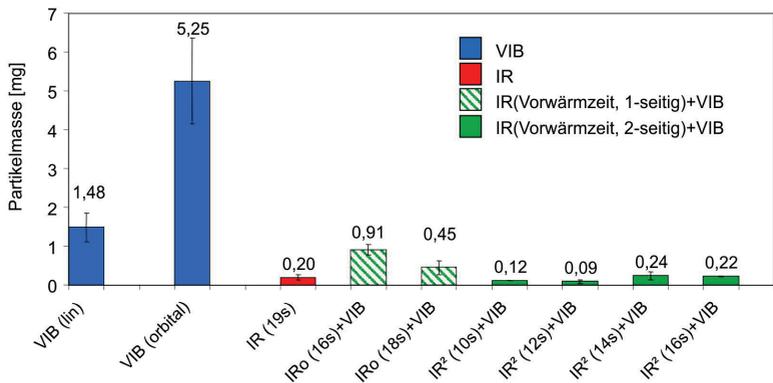


Bild 2.17: Partikelabrieb beim Schweißen von PA66-GF25 nach [KEK04];

3 Problemstellung und Lösungsansatz

Die zahlreichen systematischen Untersuchungen zum Vibrationsschweißen von thermoplastischen Kunststoffen haben zu einem hohen Prozessverständnis geführt. Mit der Einteilung des Prozesses in vier Phasen anhand der Fügeweg-Zeit-Verlaufskurve und dem Wissen um die Prozess-Struktur-Eigenschafts-Beziehungen ist es gelungen, die erzielbare Schweißnahtqualität auf zwei Einflussparameter zu reduzieren. Zum einen muss die Phase der quasistationären Schmelzebildung (Phase 3) erreicht werden, zum anderen sollte der eingestellte Fügedruck so gering sein, dass sich das Gefüge in der Fügezone zu einer 5-Schicht-Struktur ausbilden kann. Sind diese beiden Bedingungen erfüllt, so können Schweißnahtfestigkeiten von 90 % bis 100 % des unverstärkten Grundmaterials erreicht werden. Der Fügedruck in der Abkühlphase sollte gegenüber dem Fügedruck in der Phase 3 nicht verändert werden. Die Parameter Frequenz und Amplitude haben zwar einen signifikanten Einfluss auf die Schweißzeit, nicht jedoch auf die mechanischen Kennwerte. Mit der Weiterentwicklung der Maschinenteknik, hin zu deutlich kürzeren Ausschwingzeiten, ist es gelungen, hohe mechanische Eigenschaften auch bei mittleren Fügedrücken zu realisieren. Dies ermöglicht gute Schweißnahteigenschaften bei möglichst kurzen Zykluszeiten. Eine weitere Möglichkeit zur Prozesszeitverkürzung ohne Festigkeitsverlust bietet die Prozessmodifikation des Hochdruckanfahrens. Wird eine saubere und optisch hochqualitative Schweißnaht benötigt, so bietet das kombinierte IR-VIB-Schweißen eine adäquate Alternative.

Aufgrund dieses Wissens hat sich in der Industrie eine Prozessüberwachungsstrategie etabliert, welche sich auf die Auswertung der Fügeweg-Zeit-Verlaufskurve hinsichtlich der Phase 3 in Kombination mit dem eingestellten, globalen Fügedruck konzentriert. Zusätzlich wird der absolute Fügeweg überwacht, da dieser die resultierende Bauteilhöhe bestimmt.

Im Gegensatz zu den im Labor, an idealen Prüfkörpern, durchgeführten Schweißversuchen, werden in der Praxis, an realen Bauteilen, bei Weitem nicht diese hohen Schweißnahtfestigkeiten erreicht. Nach Aussagen führender Anwender dieser Schweißtechnik werden bei der Auslegung von Vibrationsschweißnähten erzielbare Festigkeiten im Bereich von maximal 30 % bis 50 % des unverstärkten Grundmaterials angenommen [Nat11, Vet11]. Es sind zwar festigkeitsreduzierende Einflüsse bekannt, welche besonders bei industriellen Fertigungsprozessen nur mit hohem Aufwand ausgeschlossen werden können (z.B. Einfluss des Feuchtegehaltes bei hydrophilen Kunststoffen), dennoch können diese nicht hinreichend die hohe qualitative Diskrepanz zwischen den unter Laborbedingungen und den industriell gefertigten Vibrationsschweißnähten erklären.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Systematisierung von relevanten, den Prozess beeinflussenden Störfaktoren, welche beim Vibrationsschweißen komplexer Bauteile unter industriellen Bedingungen auftreten können. Diese sollen anhand eines Plattenprüfkörpers nachgestellt und somit vereinzelt werden. Die Untersuchungen konzentrieren sich dabei auf vier wesentliche Bereiche:

1. Schweißnahtgeometrie

Alle bisher veröffentlichten Untersuchungen wurden an Stumpfnähten (Steg auf Steg) mit gleichen Wandstärken durchgeführt. Bei industriellen Bauteilen werden hingegen häufig zwei Stege unterschiedlicher Wandstärke aufeinandergeschweißt, um die Positionierung der Fügepartner zueinander zu vereinfachen und evtl. Geometrieabweichungen auszugleichen. Im ersten Teil der Untersuchungen wird der Einfluss unterschiedlicher Wandstärken auf den Vibrationsschweißprozess und die erreichbare Schweißnahtqualität untersucht werden.

2. Werkstoffabhängige Schmelzeviskosität

Die Fügedruckabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften beim Vibrationsschweißprozess wird auf die sich in der Phase 3 einstellende Schmelzeschichtdicke und die damit verbundene Abkühlgeschwindigkeit nach Abschalten der Vibrationsbewegung zurückgeführt. Diese wird neben dem Fügedruck durch die Schmelzeviskosität des Werkstoffes bestimmt. Da niedrigviskose gegenüber hochviskosen Kunststoffen ein dünneres Schmelzepolster bei sonst gleichen Prozessbedingungen ausbilden, gelten diese im Allgemeinen als weniger gut schweißbar. Dieser Aussage liegen derzeit jedoch keine systematischen Untersuchungen zugrunde. Deshalb wird im zweiten Teil dieser Untersuchungen die Drucksensibilität eines Werkstoffes in Abhängigkeit seiner Viskosität untersucht werden.

3. Bauteilverzug

Der wesentliche Unterschied zwischen Schweißversuchen unter Laborbedingungen und den Schweißprozessen im industriellen Umfeld ist die Bauteilgeometrie. Während bei wissenschaftlichen Untersuchungen auf möglichst einfache Prüfkörper zurückgegriffen wird, um möglichst viele Fremdeinflüsse ausschließen zu können, wächst die Komplexität industrieller Bauteile mit den zunehmenden Ansprüchen an Funktionalität und Design stetig. Ein großes Problem stellt dabei die verzugarme Herstellung der Bauteile im Spritzgießprozess dar. Aufgrund lokal unterschiedlicher Abkühlbedingungen und anisotropen Werkstoffverhaltens ist ein komplexes Bauteil verzugfrei nicht wirtschaftlich herstellbar. Wird zusätzlich das Bauteil aufgrund hoher Stückzahlen mit mehreren Spritzgießwerkzeugen / Kavitäten gefertigt, so sind nicht nur Abweichungen von der Soll-Geometrie, sondern auch Abweichungen der Bauteile untereinander die Folge. Der anschließende Schweißprozess muss diese Toleranzen abfangen bzw. ausgleichen. Ein besonders großer Fokus liegt somit auf dem Einfluss des Bauteilverzugs auf den Prozessverlauf und die resultierenden mechanischen Eigenschaften.

4. Schwingrichtung

Im vierten Teil der Untersuchungen wird der Einfluss der Schwingrichtung im Fokus stehen. Ein Großteil der bisher veröffentlichten Untersuchungen wurde an Plattenprüfkörpern durchgeführt, welche parallel zur Schwingrichtung ausgerichtet waren. Lediglich in [PU93a, Gie95] wurde der Einfluss der Schwingrichtung auf den Prozessverlauf und die mechanischen Eigenschaften untersucht. Dabei wurde festgestellt, dass die Schwingrichtung einen wesentlichen Einfluss auf die Prozesszeit hat. Wie sich Nahtbereiche, welche eine unterschiedliche Ausrichtung zur Schwingrichtung besitzen, was bei komplexen Bauteilen mit umlaufender Schweißnaht zwangsläufig gegeben ist, gegenseitig beeinflussen, wurde dabei jedoch nicht untersucht, da die Plattenprüfkörper innerhalb eines Prozessdurchlaufs nur eine Ausrichtung zuließen. Durch die Verwendung von mehreren Plattenpaarungen, welche unterschiedlich ausgerichtet werden können, wird im vierten Teil dieser Untersuchungen die umlaufende Schweißnaht eines komplexen Bauteiles vereinfacht simuliert und so der Einfluss der Schwingrichtung auf den Vibrationsschweißprozess sowie die resultierenden mechanischen Eigenschaften analysiert werden.

4 Experimentelles

4.1 Untersuchte Werkstoffe

Für die Untersuchungen wurden in erster Linie Werkstoffe berücksichtigt, welche aufgrund ihres Eigenschaftsprofils häufig für Anwendungen im Automotive-Bereich verwendet werden und somit für das Vibrationsschweißen relevant sind. Im Motorraum werden dabei am häufigsten glasfaserverstärkte Polyamide (PA-GF) eingesetzt. Im Bereich der Sensoren und Elektronikkomponenten spielen Polybutylenterephthalate (PBT) eine wesentliche Rolle. Im Interieur werden überwiegend Polypropylene (PP) verwendet. Als Vertreter der amorphen Kunststoffe wurde Polycarbonat (PC) aufgrund seiner Bedeutung für den Bereich Beleuchtung ausgewählt.

Die genauen Bezeichnungen, Handelsnamen und Hersteller der untersuchten Werkstoffe sind in Tabelle 4.1 aufgelistet.

Tabelle 4.1: Versuchswerkstoffe mit Kurzzeichen, Handelsname und Hersteller;

Kurzzeichen	Werkstoff	Handelsname	Hersteller
PBT	Polybutylenterephthalat	Ultradur B4520	BASF
PA66	Polyamid 66	Ultramid A3K	BASF
PA66-GF30	Polyamid 66 mit 30 % Glasfasern	Ultramid A3WG6	BASF
PC	Polycarbonat	Makrolon 2805	Bayer
PP	Polypropylen	PP 56M10	Sabic
PA6-NV	Polyamid 6 mit niedriger Viskosität	-	Lanxess
PA6-MV	Polyamid 6 mit mittlerer Viskosität	-	Lanxess
PA6-HV	Polyamid 6 mit hoher Viskosität	-	Lanxess

Dabei wurden die grundlegenden Untersuchungen an PP und PBT durchgeführt, da diese beiden Werkstoffe kaum zur Wasseraufnahme neigen und somit eine gute Reproduzierbarkeit hinsichtlich des Prozessverlaufs und der resultierenden mechanischen Eigenschaften ermöglichen. Auf in der Praxis häufig eingesetzte Füllstoffe, wie z.B. Glasfasern oder Ruß, wurde dabei zugunsten der Strukturanalyse mittels polarisationsoptischer Durchlichtmikroskopie zunächst verzichtet.

Die an PP und PBT gewonnenen Erkenntnisse wurden anschließend hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf die anderen Versuchswerkstoffe mittels Stichversuchen überprüft.

Tabelle 4.2 enthält ausgewählte allgemeine Werkstoffkenndaten aus den Hersteller-Datenblättern.

Tabelle 4.2: ausgewählte Werkstoffkenndaten der verwendeten Versuchswerkstoffe;

Kennwert	Einheit	Werkstoff				
		PBT	PA66	PA66-GF30	PC	PP
Dichte	g/cm ³	1,3	1,13	1,36	1,2	0,905
Feuchtigkeitsaufnahme	%	0,25	2,5 - 3,1	1,5 - 1,9	0,12	-
Zug-E-Modul	MPa	2.500	3.000	10.000	2.400	1.550
Streckspannung	N/mm ²	60	85	190	66	32
Streckdehnung	%	3,7	5	-	6,2	-
Bruchdehnung	%	>50	-	3	>50	600
Schmelztemperatur DSC	°C	220 - 225	260	260	-	-

Neben den am Markt erhältlichen Werkstoffen wurden drei Polyamid 6 mit unterschiedlichen Viskositäten in die Untersuchungen einbezogen. Diese wurden von der Fa. Lanxess aus dem gleichen Basisharz hergestellt. Dabei wurden lediglich die Kettenlängen variiert, um gezielt eine niedrigviskose, eine mittelviskose und eine hochviskose Type zu erhalten.

Bild 4.1 zeigt das Fließverhalten der drei PA6-Typen anhand der komplexen Viskosität. Die gemessenen MFI-Kennwerte sind in Tabelle 4.3 dargestellt.

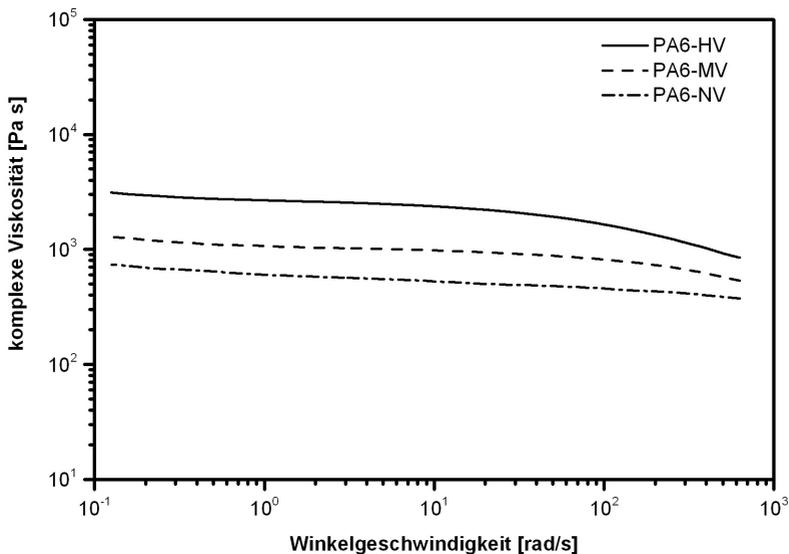


Bild 4.1: Fließverhalten der drei PA6-Typen;
 Platte-Platte-Rheometer; Temperatur: 250 °C; Dehnung: 1 %;

Tabelle 4.3: gemessene MFI-Kennwerte der PA6-Werkstoffe;

Kennwert	Einheit	Werkstoff		
		PA6-NV	PA6-MV	PA6-HV
Schmelztemperatur DSC	°C	220 - 225		
MFI 260/1,2	g/10min	75	29	9

4.2 Prüfkörper

Alle Untersuchungen wurden an spritzgegossenen Plattenprüfkörpern mit einer Länge von 150 mm, einer Höhe von 75 mm und einer Wandstärke von 4 mm bzw. 2 mm durchgeführt. Diese wurden über einen 2 mm bzw. 1 mm starken Filmanguss angespritzt, um eine möglichst homogene Werkstoffstruktur über die komplette Plattenlänge zu realisieren. Die Fügefläche liegt gegenüber dem Filmanguss (Bild 4.2 oben).

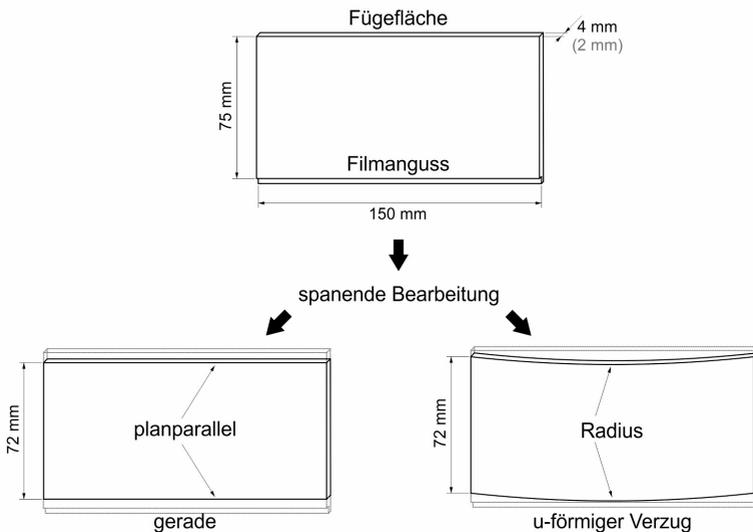


Bild 4.2: oben: spritzgegener Plattenprüfkörper;
 unten links: Plattenprüfkörper, gerade, nach spanender Bearbeitung;
 unten rechts: Plattenprüfkörper mit u-förmigem Verzug nach spanender Bearbeitung;

Da für alle untersuchten Werkstoffe das gleiche Spritzgießwerkzeug verwendet wurde, konnte eine zur Angussseite planparallele Fügefläche nicht gewährleistet werden. Dies ist auf den unterschiedlichen Kühleinschrumpfung der Materialien zurückzuführen. Deshalb wurden die Platten nach dem Spritzgießprozess an den langen Stirnseiten spanend bearbeitet, mit dem Ziel, die

Planparallelität der Fügefläche zur Auflagefläche im Aufnahmewerkzeug der Vibrationsschweißanlage zu erreichen (Bild 4.2 unten links).

In Abweichung zu industriellen Bauteilen, welche im Bereich der Fügefläche nicht nachbearbeitet werden, wurde dadurch die sogenannte Spritzhaut vollständig abgetragen. Durch diese Bearbeitung werden die Materialeigenschaften im Bereich der Fügefläche, ganz besonders hinsichtlich Schmelzenthalpie und Oberflächenrauigkeit, verändert. Dies führte für die untersuchten Werkstoffe zu einer Verlängerung der Schweißzeit um bis zu 0,3 Sekunden. Diese Abweichung wurde jedoch für eine definierte Prüfkörpergeometrie in Kauf genommen, da ohne diese spanende Bearbeitung ein materialabhängiger, undefinierter u-förmiger Verzug (Einfallstelle) im Bereich der Fügefläche entsteht.

Um einen definierten u-förmigen Verzug an den Plattenprüfkörpern zu simulieren, wurden die beiden langen Stirnflächen nicht plan gefräst, sondern mit einem Radius versehen (Bild 4.2 unten rechts). Durch Variation des Radius kann die Größe des Verzuges verändert werden. Als Größe des Verzuges wird der Höhenunterschied zwischen dem tiefsten Punkt im Zentrum der Fügefläche und dem höchsten Punkt an den äußeren Rändern der Fügefläche definiert.

Neben der Prüfkörpergeometrie wurde auch die Ausrichtung der Plattenprüfkörper in der Vibrationsschweißanlage variiert. Hierbei wurden zwei Extrema unterschieden. Werden die Plattenprüfkörper parallel zur langen Kante der Fügefläche gegeneinander ausgelenkt, wird die Schwingrichtung als „linear längs“ definiert. Als „linear quer“ wird die Schwingrichtung bezeichnet, wenn die Auslenkung quer zur langen Kante der Fügefläche geschieht. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden diese beiden Varianten auch als „Längs- und als Querschweißung“ bezeichnet.

Tabelle 4.4 zeigt die untersuchten Prüfkörperkombinationen mit und ohne Bauteilverzug sowie eingestellter Schwingrichtung. Für die Untersuchungen zum Einfluss von Bauteilverzug wurde stets ein Plattenprüfkörper mit eingebrachtem Radius und ein planparalleler Plattenprüfkörper miteinander gefügt.

Tabelle 4.4: Variation des spanend eingebrachten Bauteilverzuges;

Symbol	Schwingrichtung	Größe des Verzuges	eingebrachter Radius
	linear längs	ohne	∞
	linear quer	ohne	∞
	linear längs und quer gleichzeitig	ohne	∞
	linear längs	0,1 mm	28 m
	linear längs	0,2 mm	14 m
	linear längs	0,5 mm	5,6 m
	linear längs	1,0 mm	2,8 m

4.3 Schweißanlage

4.3.1 Maschine

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Schweißversuche wurden an einer linearen Vibrationsschweißanlage (Modell M-624HRSi der Firma Branson Ultraschall, Dietzenbach) durchgeführt. Diese ist mit einem elektromagnetischen Schwingkopf ausgestattet, welcher im Frequenzbereich um die 240 Hz arbeitet. Es können Schwingweiten zwischen 0,9 mm und 1,8 mm realisiert werden. Die mittels Beschleunigungssensoren gemessenen Ein- und Ausschwingzeiten bei maximaler Amplitude betragen ca. 60 ms für das Einschwingen und ca. 100 ms für das Ausschwingen. Der über einen Riemenantrieb elektromotorisch betriebene Hubtisch kann Fügekräfte zwischen 2.000 N und 25.000 N reproduzierbar aufbringen. Da der verwendete Plattenprüfkörper mit 600 mm² eine vergleichsweise kleine Fügefläche hat, wurde die Anlage zusätzlich mit einem pneumatischen Hubtisch ausgestattet, um Fügekräfte zwischen 300 N und 3000 N zu realisieren. Somit können Fügedrücke zwischen 0,5 N/mm² und 5 N/mm² eingestellt werden. Der Fügeweg wird über einen induktiven Wegaufnehmer

direkt am unteren Aufnahmewerkzeug gemessen. Bild 4.3 zeigt den schematischen Aufbau der Vibrationsschweißanlage.

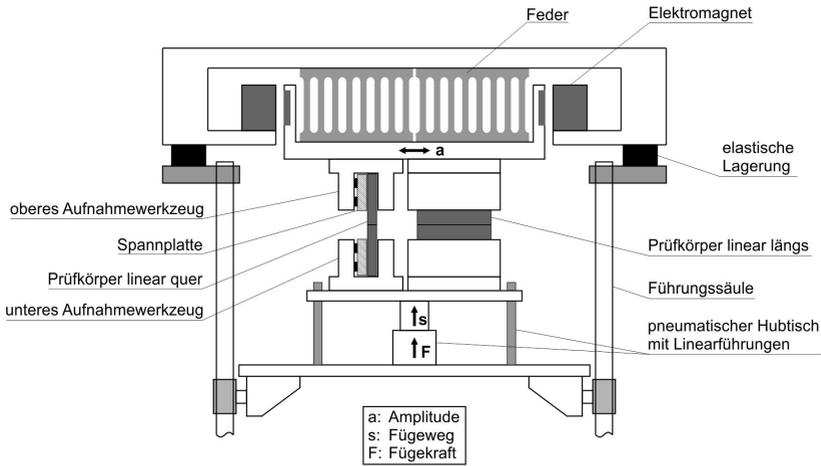


Bild 4.3: schematische Darstellung der Vibrationsschweißanlage mit den Aufnahmewerkzeugen für die Plattenprüfkörper;

4.3.2 Aufnahmewerkzeuge

Die im 90°-Winkel zueinander ausgerichteten, baugleichen Aufnahmewerkzeuge ermöglichen das Schweißen der Plattenprüfkörper längs und quer zur Schwingrichtung. Wird dabei nur eine Werkzeugpaarung bestückt, werden Schweißungen nur unter Längs- oder Querschwingung durchgeführt. Werden beide Werkzeugpaarungen bestückt, können Schweißungen unter Längs- und Querschwingung gleichzeitig durchgeführt werden (Bild 4.4). Dabei ist darauf zu achten, dass die verwendeten Plattenprüfkörper für Längs- und Querschwingung exakt die gleiche Höhe haben, damit die komplette Fügefläche bei Prozessbeginn im Eingriff ist.

Die freie Einspannlänge (Überstand der Plattenprüfkörper aus den Aufnahmewerkzeugen) beträgt standardmäßig 5 mm. Diese wurde nur für die Untersuchungen zum Einfluss der freien Einspannlänge unter Querschwingung variiert. Dazu wurden die Plattenprüfkörper bei der spanenden Bearbeitung hinsichtlich ihrer Höhe variiert. Somit konnten freie Einspannlängen zwischen 2 mm und 5 mm untersucht werden.

Die Plattenprüfkörper werden in den Aufnahmewerkzeugen durch pneumatische Spannplatten fixiert. Dies ermöglicht das maschinengesteuerte Ausspannen der Schweißproben nach dem Vibrationsvorgang und damit das unterbrechungsfreie Positionieren des Hubtisches in die Grundstellung. Die Spannplatten bringen eine Schließkraft von ca. 4.200 N auf. Die Reibkraft

zwischen den zu fügenden Plattenprüfkörpern darf diesen Wert nicht überschreiten, da sich sonst die Spannplatten öffnen und somit die Reibrelativbewegung zwischen den beiden Bauteilen verringert wird. Dies ist ausschließlich für das Werkzeug unter Querschwingung kritisch. Ausgehend von einem maximalen Fügedruck von 5 N/mm^2 und einer Fügefläche von 600 mm^2 darf nach Gleichung 2.3 der Reibungskoeffizient der zu fügenden Materialpaarung den Wert 1,4 nicht überschreiten. Nach *Saechtling* [BBOS07] liegen die Gleitreibungskoeffizienten für die untersuchten Werkstoffpaarungen stets deutlich unterhalb 1,4. Um ein Öffnen der Spannplatten definitiv ausschließen zu können, wurde für alle Werkstoffpaarungen bei maximalem Fügedruck eine Kontrolle mit der Hochgeschwindigkeits-Kamera durchgeführt (vgl. Kapitel 4.3.5).

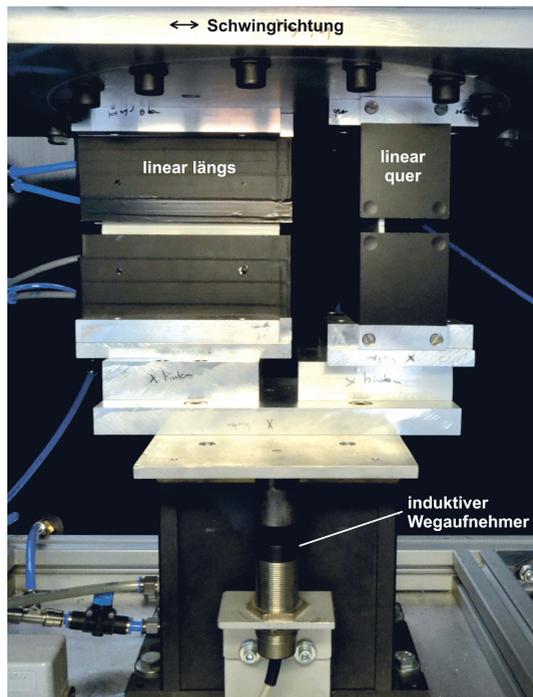


Bild 4.4: Aufnahmewerkzeuge zum Fixieren der Plattenprüfkörper längs und quer zur Schwingrichtung; Ansicht der Rückseite;

4.3.3 IR-Vorwärmung

Die Vibrationsschweißanlage wurde mit einem zusätzlichen Modul zur IR-Vorwärmung ausgestattet. Das Modul besteht aus zwei mittelwelligen Metallfolienstrahlern mit liegender Emitterfolie (Bild 4.5) und einer pneumatisch betriebenen Positioniereinheit, welche das horizontale Verfahren der IR-Strahler ermöglicht (Bild 4.6).

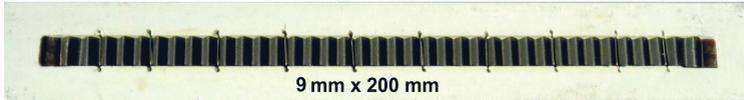


Bild 4.5: mittelwelliger Metallfolienstrahler mit liegender Emittierfolie;

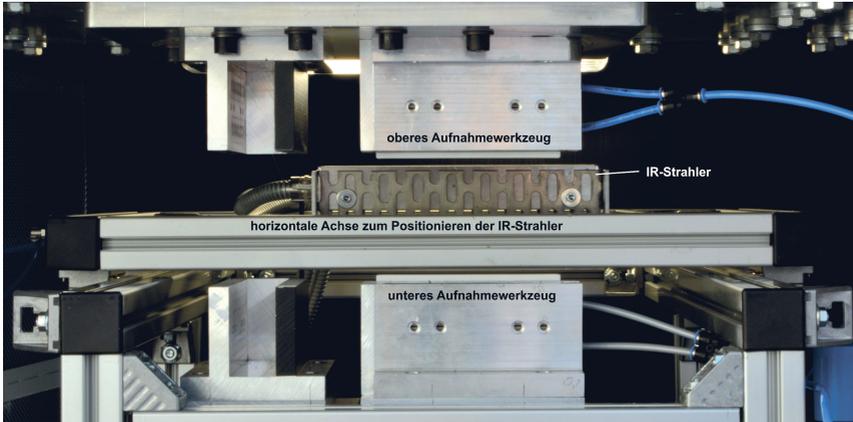


Bild 4.6: Modul zur IR-Vorwärmung der Plattenprüfkörper unter Längsschwingung;

Für die Vibrationsschweißversuche mit IR-Vorwärmung wurden die Strahler in einem Abstand von 2 mm zu den Fügeflächen der Plattenprüfkörper positioniert. Die Vorwärmzeit wurde zwischen 5 s und 15 s variiert. Dabei wurde stets ein dünner Schmelzefilm an der Bauteiloberfläche erzeugt (Bild 4.7). Die Umstellzeit für das Herausfahren der Strahler und das Zusammenfahren der Plattenprüfkörper für den Vibrationsschweißprozess betrug ca. 4 Sekunden.



Bild 4.7: sichtbare Schmelzbildung während der IR-Vorwärmung der Plattenprüfkörper;
Material: PBT; Strahlerabstand: 2 mm; Vorwärmzeit: 10 s;

4.3.4 Infrarot-Kamera

Zur Überwachung der Schweißversuche wurde eine Infrarot-Kamera (Modell PtSi 256 SM) der Firma Thermosensorik verwendet. In Kombination mit dem verwendeten Objektiv kann diese einen Spektralbereich von $2,5\ \mu\text{m}$ bis $5,4\ \mu\text{m}$ detektieren. Die Auflösung der Kamera beträgt 256×256 Pixel. Es wurde eine Integrationszeit von $0,625\ \text{ms}$ verwendet. Die Bildfrequenz betrug $50\ \text{Hz}$.

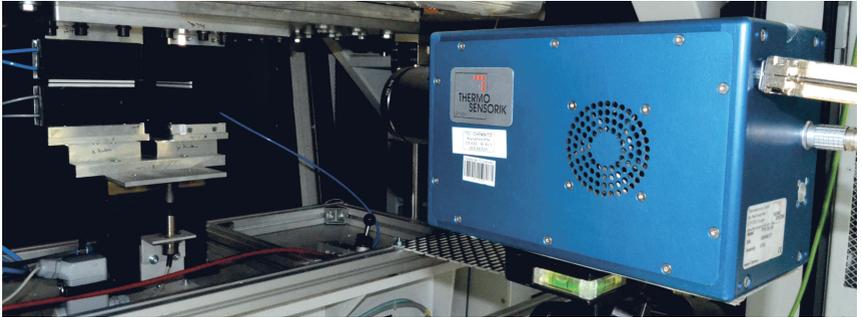


Bild 4.8: Versuchsaufbau zur Analyse der lokalen Wärmeentwicklung mittels Infrarot-Kamera;

Um das Einlegen und die Entnahme der Plattenprüfkörper zu gewährleisten, wurde die Kamera an der Rückseite der Schweißanlage montiert. Im Falle einer Längsschweißung wurde die Kamera senkrecht zum Plattenprüfkörper ausgerichtet (Bild 4.9 links). Im Falle einer Querschweißung bzw. einer kombinierten Längs- und Querschweißung wurde die Kamera um 45° geschwenkt (Bild 4.9 rechts), um den Verlauf der Wärmeentwicklung in der Fügeebene zu beobachten.

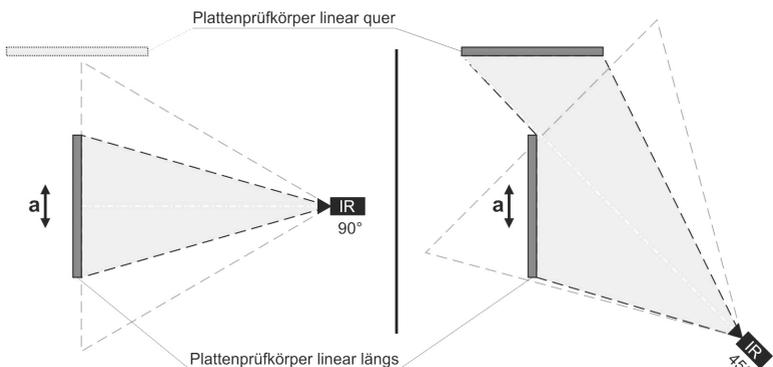


Bild 4.9: schematische Darstellung der Positionierung und Blickrichtung der Infrarot-Kamera;
links: Plattenprüfkörper nur längs zur Schwingrichtung;
rechts: Plattenprüfkörper nur quer bzw. längs und quer gleichzeitig zur Schwingrichtung;

Die Aufnahmen wurden hinsichtlich der örtlichen Wärmeentwicklung über die Zeit ausgewertet. Es wurden somit keine absoluten Temperaturen im Schweißnahtbereich ermittelt, sondern vergleichend die Wärmeentwicklung über die Schweißnahtlänge bewertet.

4.3.5 Hochgeschwindigkeitskamera

Für die Analyse des Schwingverhaltens der Plattenprüfkörper während des Vibrationsweißprozesses wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera der Fa. Olympus (Modell i-Speed 3) verwendet (Bild 4.10). Ausgewählte Versuche wurden mit 2000 fps (Bilder pro Sekunde) aufgenommen. Durch die Aufnahmen konnte ein Mitschwingen des Unterwerkzeuges ausgeschlossen werden. Des Weiteren wurde abgesichert, dass sich die Spannplatten, welche die Plattenprüfkörper im Werkzeug fixieren, während des Vibrationsprozesses nicht öffnen.

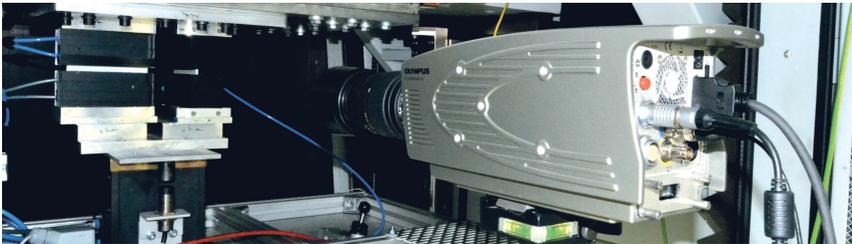


Bild 4.10: Versuchsaufbau zur Analyse des Schwingverhaltens mittels Hochgeschwindigkeitskamera;

Neben der funktionellen Absicherung des konstruktiven Werkzeugaufbaus wurde die Kamera zum Nachweis des Durchbiegens der Plattenprüfkörper unter Querschwingung eingesetzt. Dazu wurde die Kamera genau senkrecht zur Schwingrichtung positioniert und der Bildbereich auf die freie Einspannlänge der beiden Plattenprüfkörper eingestellt. Mittels Grauwertanalyse konnte anschließend die Durchbiegung des unteren, feststehenden Plattenprüfkörpers bei maximaler Auslenkung des oberen, schwingenden Plattenprüfkörpers ermittelt werden (Bild 4.11).

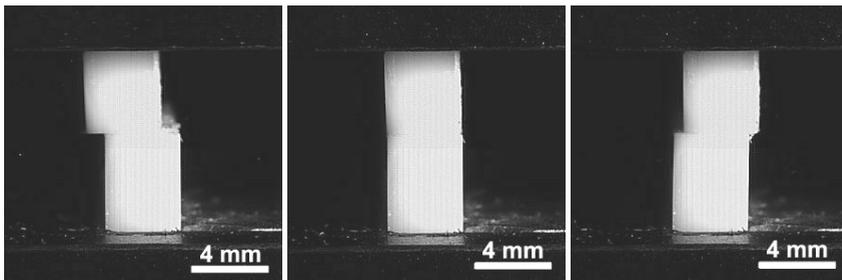


Bild 4.11: stirnflächige Aufnahme der Plattenprüfkörper unter Querschwingung;
links und rechts: bei maximaler Auslenkung des oberen Plattenprüfkörpers;
Mitte: Ausgangssituation in Nulllage;

4.4 Mechanische Prüfung

Die mechanischen Schweißnahteigenschaften wurden mittels Kurzzeit-Zugversuch in Anlehnung an die Richtlinie 2203-2 des DVS [DVS85] ermittelt. Zunächst wurden 5 mm breite Streifen von den Rändern der geschweißten Plattenprüfkörper entfernt, um Randeinflüsse ausschließen zu können. Anschließend wurden die Zugproben mittels Bandsäge aus den Plattenprüfkörpern entnommen. Die Schnittkanten wurden entgratet. Die Zugproben wurden entsprechend ihrer Entnahmestelle nummeriert (Bild 4.12).

Je Parametervariation wurden 3 Schweißproben für die mechanische Prüfung hergestellt. Standardmäßig wurden jeweils 6 Zugproben mit einer Breite von 15 mm entnommen (Bild 4.12 rechts). Somit konnte der Mittelwert über 18 Messwerte gebildet werden.

Bei den Schweißversuchen mit Bauteilverzug wurden je Parametersatz 5 Schweißproben für die mechanische Prüfung hergestellt. Aus jeder Schweißprobe wurden der Reihe nach von links nach rechts 12 Zugstäbe mit einer Breite von 10 mm entnommen (Bild 4.12 links). Somit konnte je Zugstabposition (Position 1 bis 12) der Mittelwert über 5 Messwerte gebildet werden. Zur Bestimmung der Gesamtbauteilfestigkeit wurde mit Hilfe einer speziellen Einspannvorrichtung die komplette Schweißprobe gezogen (Bild 4.13).

Die Zugversuche der Streifenproben wurden auf einer Inspect 10 der Firma Hegewald & Pesche mit einer 10 kN Kraftmessdose und Parallelspannbacken durchgeführt. Für die Zugversuche mit ganzen Plattenprüfkörpern wurde eine Zwick/Roell Z 250 mit einer 50 kN Kraftmessdose verwendet. Die Abzugsgeschwindigkeit betrug 20 mm/min für das PP und 10 mm/min für die technischen Kunststoffe.

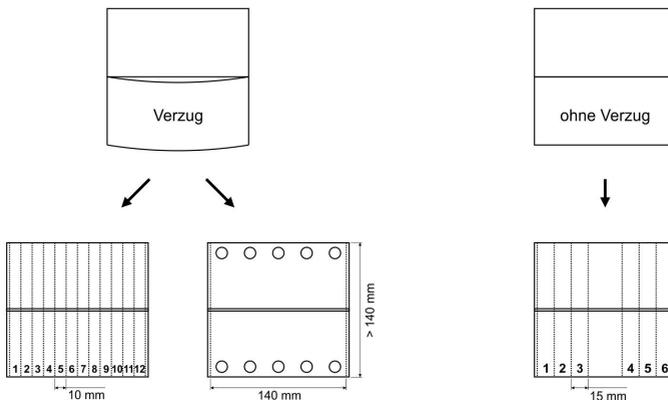


Bild 4.12: Geometrie und Entnahmeposition der Zugprüfkörper;

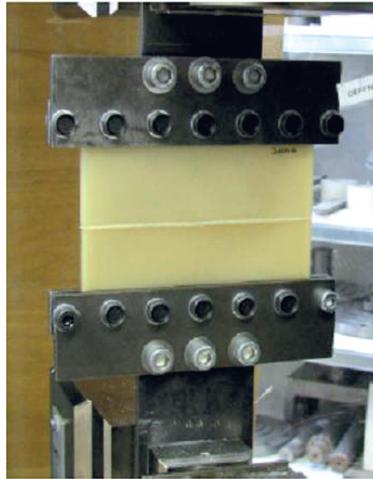


Bild 4.13: Kurzzeit-Zugversuch am kompletten Plattenprüfkörper mit spezieller Einspannvorrichtung;

Des Weiteren wurde die Grundmaterialfestigkeit an gefrästen Zugstäben aus den Plattenprüfkörpern ermittelt. Dabei wurde die Entnahmerichtung senkrecht zur Fügefläche gewählt, um die gleiche Zugrichtung wie bei den Schweißproben zu prüfen. Aus dem Quotienten von Schweißnahtfestigkeit zu Grundmaterialfestigkeit wurde der Schweißnahtfaktor f_z gebildet:

$$f_z = \frac{\sigma_{R(SN)}}{\sigma_{R(GM)}} \quad (4.1)$$

4.5 Polarisationsoptische Analysen

4.5.1 Durchlichtmikroskopie

Die mikroskopischen Analysen wurden an einem Olympus BX51 durchgeführt. Dieses ist mit einer 12-Megapixel-Kamera ausgestattet, um die Bilder zu digitalisieren. Die Aufnahmen wurden mit polarisiertem Licht und Blaufilter erzeugt. Es wurden 10 μm dicke Proben vom Querschnitt der Schweißnaht mittels Rotationsmikrotom (Leica RM 2155) präpariert. Die Entnahmestellen bei den Schweißproben mit Bauteilverzug entspricht den Schnittkanten der Zugstäbe (vgl. Bild 4.12 links). Bei den Schweißproben ohne Bauteilverzug wurden die Mikroskopieproben aus der Mitte des Plattenprüfkörpers gewonnen (vgl. Bild 4.12 rechts).

Die Schweißnähte wurden hinsichtlich ihrer Restschmelzeschichtdicke analysiert. Diese wurde im Zentrum der Schweißnaht zwischen den Übergängen von Grundwerkstoff zur Zone der deformierten Sphärolithe gemessen (Bild 4.14).

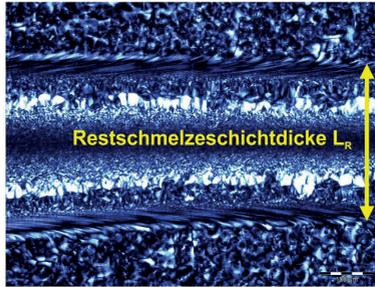


Bild 4.14: Analyse der Restschmelzeschichtdicke mittels polarisationsoptischer Durchlichtmikroskopie;

4.5.2 Spannungsoptik

Für die Analyse des Eigenspannungszustandes wurde ein Polariskop der Firma Zeiss (Bild 4.15) verwendet. Dieses verfügt über eine mono- und eine polychromatische Lichtquelle (5). Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden vergleichende, qualitative Analysen der Eigenspannungszustände der geschweißten Plattenprüfkörper aus Polycarbonat im Dunkelfeld durchgeführt. Dafür wurde der Polarisator (4) um 90° zum Analysator (2) verdreht angeordnet. Die zu analysierende Probe (3) wurde zwischen den beiden Filterpaketen platziert. Mittels einer Kamera (1) konnte das resultierende Bild digitalisiert und hinsichtlich spannungsoptischer Effekte ausgewertet werden. Da diese spannungsoptischen Effekte sowohl durch Eigenspannungen, als auch durch Orientierungen hervorgerufen werden können, ist lediglich eine vergleichende Auswertung zwischen den unterschiedlichen Schweißproben möglich. Eine quantitative Aussage zum Eigenspannungszustand kann nicht getroffen werden.

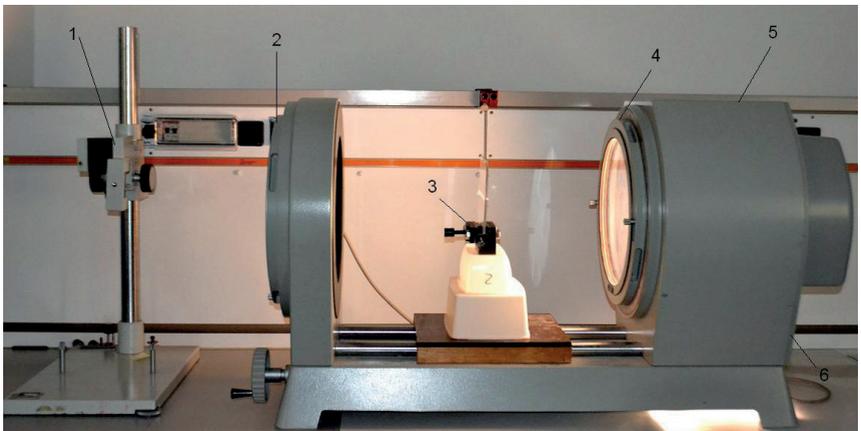


Bild 4.15: verwendetes Polariskop der Firma Zeiss zur qualitativen Analyse des Eigenspannungszustandes der geschweißten Plattenprüfkörper;

4.6 Thermoanalytische Untersuchungen

Zur Bestimmung des Rekristallisationsverhaltens der untersuchten PA6-Typen wurden DSC-Messungen nach DIN EN ISO 11357-1 durchgeführt. Diese erfolgten am Dynamischen Wärmestrom-Differenzkalorimeter Q2000 der Firma TA Instruments. Es wurden Einwegaluminiumtiegel mit gelochtem Deckel verwendet. Die Einwaagemasse betrug ca. 7 mg. Die Probenpräparation wurde mit einem Skalpell durchgeführt. Die Heiz- und die Kühlrate betrug 10 K/min. Als Spülgas wurde Stickstoff verwendet.

In Anlehnung an diese Gestaltungsempfehlung wurden Schweißversuche mit Plattenprüfkörpern durchgeführt, bei denen 4 mm starke Stege auf 2 mm starke Stege geschweißt wurden. Dabei haben sich drei wesentliche Nachteile gezeigt, welche gegen die Verwendung unterschiedlicher Wandstärken beim linearen Vibrationsschweißen sprechen.

1. Einfluss der Schwingrichtung

Bild 5.2 zeigt die lichtmikroskopischen Aufnahmen einer Längs- und einer Querschweißung bei Verwendung der Plattenprüfkörper mit unterschiedlichen Wandstärken. Während sich unter Längsschwingung der dünnere Schweißsteg um ca. 0,58 mm in den dickeren Schweißsteg einarbeitet, wird unter Querschwingung der Großteil des zurückgelegten Fügeweges von 1,2 mm am dünneren Schweißsteg umgesetzt. Der dickere Schweißsteg wird lediglich bis zu einer Tiefe von ca. 0,31 mm aufgeschmolzen. Dieser Effekt wird durch eine stärkere Wärmeableitung im dickeren Schweißsteg verstärkt (siehe Punkt 2). Übertragen auf ein industrielles Bauteil mit umlaufender Schweißnahtgeometrie bedeutet dies ein ungleichmäßiges Aufschmelzen von unterem und oberem Bauteil in Abhängigkeit der Schwingrichtung.

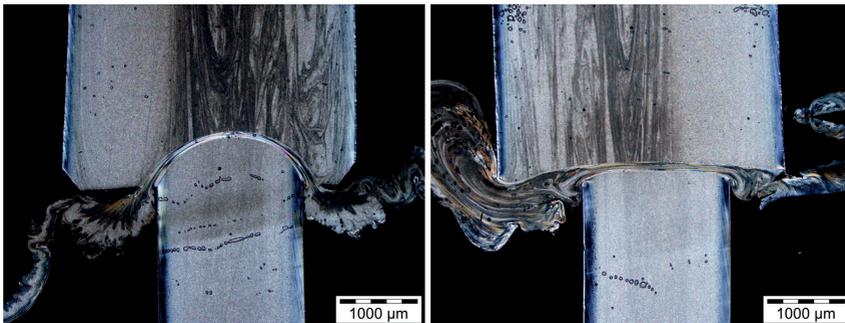


Bild 5.2: Einfluss der Schwingrichtung bei ungleichen Wandstärken; polarisationsoptische Durchlichtmikroskopie; Material: PBT; Geometrie: 4 mm auf 2 mm; $p_F = 1 \text{ N/mm}^2$; $a = 0,9 \text{ mm}$; $s_S = 1,2 \text{ mm}$; links: Längsschweißung; rechts: Querschweißung;

Während des Schweißprozesses muss sich der dünnere Steg in die dickere Bauteilwand einarbeiten. Unterscheidet man dabei Bereiche unter Längs- und unter Querschwingung, so ergeben sich wesentliche Unterschiede. Bild 5.3 zeigt die Wärmeeinflusszone in der dickeren Bauteilwand, um ein Eingraben der dünneren Bauteilwand zu ermöglichen. Um den gleichen Fügeweg zurückzulegen, muss unter Querschwingung deutlich mehr Materialvolumen in der dickeren Bauteilwand erwärmt und aufgeschmolzen werden, als unter Längsschwingung.

Am Beispiel der untersuchten Plattenprüfkörper mit 4 mm und 2 mm Wandstärke und einer Länge von 150 mm ergeben sich bei einer Amplitude von 0,9 mm und einem eingestellten Fügeweg von 1,2 mm ein aufzuschmelzendes Materialvolumen auf der 4 mm Seite (halber

Schweißweg) von ca. 180 mm³ unter Längsschwingung (150 mm x 2 mm x 0,6 mm) und ca. 342 mm³ unter Querschwingung (150 mm x 3,8 mm x 0,6 mm). Da jedoch bei beiden Schwingrichtungen theoretisch die gleiche Energiemenge zur Verfügung steht, wird sich die dünnere Bauteilwand unter Längsschwingung tiefer eingraben, als unter Querschwingung. Unter Querschwingung wird hingegen die dünnere Bauteilwand verstärkt aufgeschmolzen.

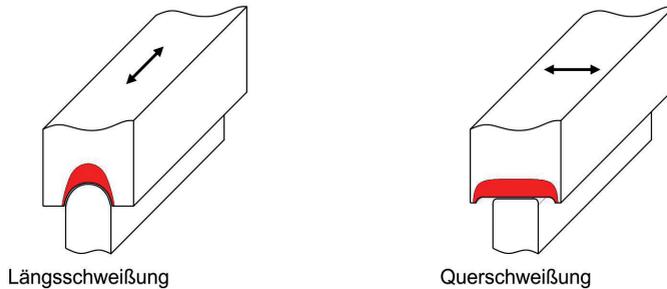


Bild 5.3: schematische Darstellung des Einflusses der Schwingrichtung bei ungleichen Wandstärken;
links: Längsschweißung;
rechts: Querschweißung;

Des Weiteren haben die Versuche gezeigt, dass die Ausrichtung der Fügezone quer zur Schwingrichtung zum einseitigen Austritt der Schmelze aus dem Fließkanal führen kann. Bild 5.4 zeigt eine entsprechende Querschnittsaufnahme mittels polarisationsoptischer Durchlichtmikroskopie. Durch den einseitigen Schmelzeaustrieb entsteht ein trichterförmiger Fließkanal. Die unsymmetrischen Fließ- und Abkühlbedingungen führen zu einem starken Abfall der Schweißnahtigenschaften. Des Weiteren entsteht eine scharfkantige Kerbe auf der Seite, wo keine oder kaum Schmelze aus dem Fließkanal austritt.

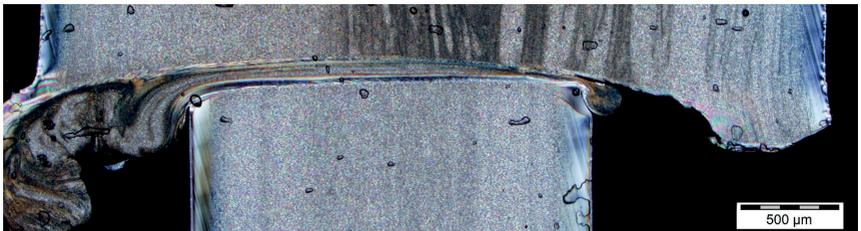


Bild 5.4: unsymmetrische Schweißnahtausbildung bei ungenauer Positionierung der Fügepartner;
polarisationsoptische Durchlichtmikroskopie; Material: PBT; Geometrie: 4 mm auf 2 mm;
 $p_F = 1 \text{ N/mm}^2$; $a = 0,9 \text{ mm}$; $s_S = 1,2 \text{ mm}$; Schwingrichtung: linear quer;

Die Ursache ist in dem zu geringem Wandstärkenunterschied von 2 mm bei einer Amplitude von 0,9 mm zu suchen. Unter Querschwingung bedeutet dies, dass beim Einarbeiten des dünneren in den dickeren Schweißsteg je eine dünne Wand von weniger als 0,1 mm Breite auf beiden

Seiten des dickeren Schweißsteiges steht bleibt (Bild 5.5 links). Eine exakte Ausrichtung der beiden Bauteile (ohne Mittenversatz) ist dafür notwendig. Weicht die Ausrichtung nur minimal von der Mittenposition ab, so bricht während des Vibrationsschweißprozesses eine der beiden Außenwände weg (Bild 5.5 rechts). Auf dieser Seite kann die Schmelze leichter aus dem Fließkanal austreten. Der ursprünglich symmetrische Schmelzefluss, vom Fließkanalzentrum in beide Richtungen zu den Fließkanalenden, verschiebt sich zu einem einseitigen Schmelzefluss, bei dem die Schmelze von einem Fließkanalende zum anderen fließt.

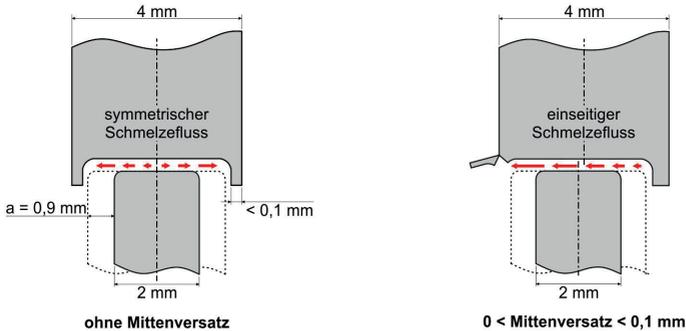


Bild 5.5: schematische Darstellung des Einflusses von Mittenversatz bei ungleichen Wandstärken;
links: exakte Positionierung ohne Mittenversatz;
rechts: ungenaue Positionierung mit Mittenversatz;

2. Einfluss der Wärmeableitung

Bild 5.6 zeigt den Einfluss der Amplitude auf das Aufschmelzverhalten der beiden Fügepartner mit unterschiedlichen Wandstärken unter Querschwingung. Es ist deutlich zu erkennen, dass mit sinkender Amplitude die Eindringtiefe der dünneren in die dickere Platte abnimmt. Dies ist auf die unterschiedliche Geschwindigkeit der Energieeinbringung infolge der veränderten Amplitude sowie die ungleichmäßige Wärmeableitung zwischen den beiden Fügepartnern zurückzuführen.



Bild 5.6: Einfluss der Amplitude bei ungleichen Wandstärken unter Querschwingung;
polarisationsoptische Durchlichtmikroskopie; Material: PBT; Geometrie: 4 mm auf 2 mm;
 $p_F = 1 \text{ N/mm}^2$; $s_S = 1,2 \text{ mm}$; Schwingrichtung: linear quer;
links: $a = 0,9 \text{ mm}$;
Mitte: $a = 0,7 \text{ mm}$;
rechts: $a = 0,5 \text{ mm}$;

Bei unterschiedlichen Bauteilwandstärken kommt es zu einer unterschiedlich starken Wärmeableitung. Je mehr Material hinter der zu erwärmenden Fügezone ist, desto mehr Energie kann durch dieses Material abtransportiert werden. Dies wird in Bild 5.7 schematisch dargestellt.

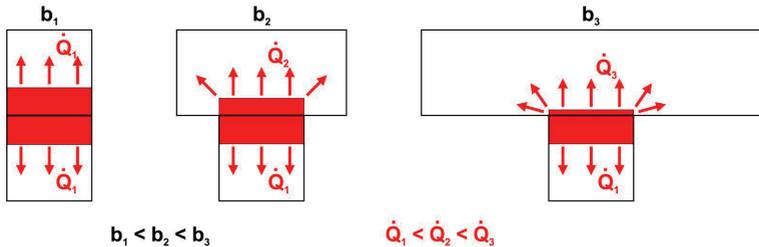


Bild 5.7: schematische Darstellung der Wärmeableitung bei unterschiedlichen Bauteilwandstärken im Schweißnahtbereich;

Ist die Wärmeableitung für beide Fügepartner unterschiedlich, so entstehen auch unterschiedlich starke Schmelzepolster. Der Effekt ist vergleichbar mit Mischmaterialschweißungen, bei denen die Materialien unterschiedliche Schmelztemperaturen haben. Das entstehende, unsymmetrische Schmelzepolster führt zu ungünstigen Fließbedingungen während des Fügeprozesses. Diese wirken sich negativ auf die erreichbaren mechanischen Eigenschaften der Schweißverbindung aus. Die höhere Wärmeableitung verstärkt den oben beschriebenen Effekt des geringeren Aufschmelzens des dickeren Fügepartners. Alle Einflüsse, welche die Geschwindigkeit der Energieeinbringung verringern, verstärken den Effekt noch zusätzlich. Im Extremfall ist die Wärmeableitung im dickeren Fügepartner annähernd so groß wie die Wärmeerzeugung durch den Vibrationsschweißprozess. Folglich findet die Schmelzebildung nur einseitig im dünneren Fügepartner statt.

3. Einfluss des Schweißweges

Aufgrund des Eingrabens des dünneren in den dickeren Schweißsteg verändert sich die resultierende Schweißnahtgeometrie mit zunehmendem Fügeweg. Dieser Effekt ist unter Längsschwingung besonders ausgeprägt. Je tiefer sich die beiden Fügepartner ineinander einarbeiten, desto stärker verändert sich die Schweißnaht von einer linearen zu einer u-förmigen Geometrie mit stetig wachsender Schweißnahtlänge. Bild 5.8 zeigt den Einfluss des Fügeweges auf die Schweißnahtgeometrie (Mikroskopiebilder) und die Reißfestigkeit bei sonst gleichen Schweißparametern. Der dünnere Fügepartner hat sich bei allen Schweißversuchen um knapp die Hälfte des Schweißweges in den dickeren Fügepartner eingegraben. Die Schweißnahtlänge (im Querschnitt) nimmt von ca. 2,2 mm, bei einem Schweißweg von 0,4 mm, auf ca. 2,6 mm, bei einem Schweißweg von 1,2 mm, zu. Das ist eine Zunahme von 18 %. Gleichzeitig steigt die Reißfestigkeit um gut 4 % an. Die deutlich geringere Zunahme der Festigkeit im Vergleich zur Zunahme der Schweißnahtlänge ist mit der veränderten Geometrie und der damit verbun-

denen Veränderung der Belastungsrichtung im Zugversuch zu begründen. Dennoch ist eine signifikante Festigkeitssteigerung mit zunehmendem Schweißweg erkennbar.

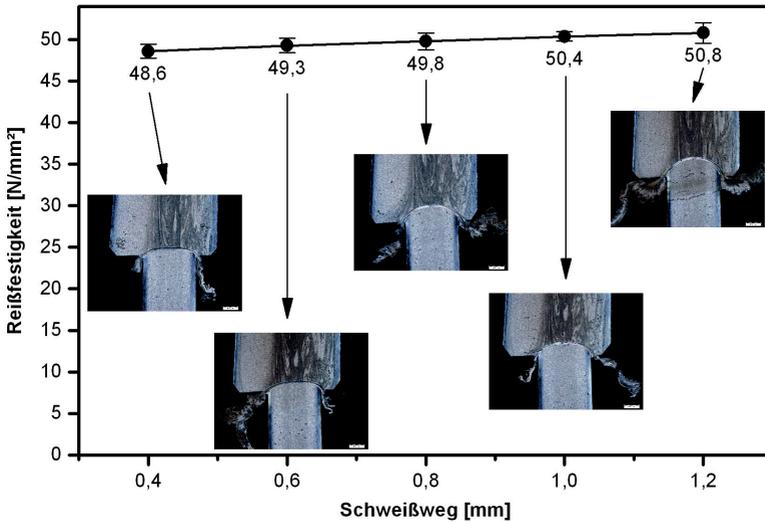


Bild 5.8: Einfluss des Schweißweges auf die Reißfestigkeit bei ungleichen Wandstärken; Material: PBT; $p_F = 1 \text{ N/mm}^2$; $a = 0,9 \text{ mm}$; Schwingrichtung: linear längs;

Dies ist für industrielle Bauteile kein nachteiliger Effekt. Im Rahmen dieser Untersuchungen soll der Schweißwegeinfluss jedoch eliminiert werden. Deshalb werden die weiteren Versuche an Prüfkörperpaarungen mit gleicher Wandstärke von 4 mm durchgeführt. Des Weiteren kann von symmetrischen Bedingungen hinsichtlich Wärmeableitung und aufzuschmelzenden Materialvolumens ausgegangen werden.

Kurzzusammenfassung - Schweißnahtgeometrie

Die etablierte Stumpfnahhtgeometrie mit unterschiedlichen Wandstärken führt aufgrund unterschiedlicher Bedingungen hinsichtlich des Energiebedarfs und der Wärmeableitung zu einer unsymmetrischen Schweißnahtausbildung. Die Stärke dieser Effekte ist sowohl abhängig vom geometrischen Verhältnis der beiden Wandstärken als auch von den Prozessparametern. Besonders kritisch ist dabei der Einfluss der Schwingrichtung, welche bei einem Bauteil mit komplexer, umlaufender Schweißnahtgeometrie zu lokal unterschiedlichen Aufschmelzgeschwindigkeiten führen muss. Festigkeitsmindernde Prozessbedingungen sind die Folge. Dem stehen lediglich die Vorteile einer vereinfachten Bauteilpositionierung und einer gezielten Lenkung der Schweißwulst in die Auffangtaschen gegenüber. Um eine möglichst hohe Verbindungsfestigkeit zu erzielen, sollte zwingend eine Stumpfnahhtgeometrie mit gleichen Wandstärken gewählt werden.

5.2 Drucksensibilität der untersuchten Werkstoffe

5.2.1 Einfluss des Fügedrucks

Die Bilder 5.9 bis 5.13 zeigen den Einfluss des Fügedrucks auf die erreichbaren mechanischen Schweißnahteigenschaften der untersuchten Werkstoffe. Dabei kann ein genereller Abfall der Reißfestigkeit und -dehnung mit steigendem Fügedruck beobachtet werden. Dieser kann mit dem geringeren Schmelzepolster begründet werden, welches sich bei höheren Fügedrücken im Gleichgewichtszustand der Phase 3 (quasistationäre Schmelzebildung) einstellt. Ein geringeres Schmelzepolster bedeutet ein geringeres Wärmevolumen, welches in der Schweißnaht gespeichert ist und somit ein schnelleres Abkühlen der Naht, wenn die Vibrationsbewegung stoppt. Somit bleibt dem Werkstoff weniger Zeit für Rekristallisationsvorgänge, welche wesentlich die Nahteigenschaften beeinflussen. Des Weiteren steigt der Anteil der Scherdeformationen im Fließkanal mit zunehmendem Fügedruck.

Trotz des charakteristischen Abwärtstrends der Festigkeitswerte mit zunehmendem Fügedruck, unterscheiden sich die Werkstoffe hinsichtlich der Höhe des Festigkeitsabfalls und des Fügedruckbereichs, in dem der Festigkeitsverlust signifikant ist.

Bild 5.9 zeigt einen stetigen Abfall der mechanischen Kennwerte über den gesamten Fügedruckbereich von 0,5 N/mm² bis 5 N/mm² für das untersuchte PP. Während die Reißfestigkeit bei einem Fügedruck von 0,5 N/mm² nahe der Grundmaterialfestigkeit liegt, fällt diese bis 5 N/mm² um knapp 20 % ab. Die Reißdehnung verringert sich um gut 50 %.

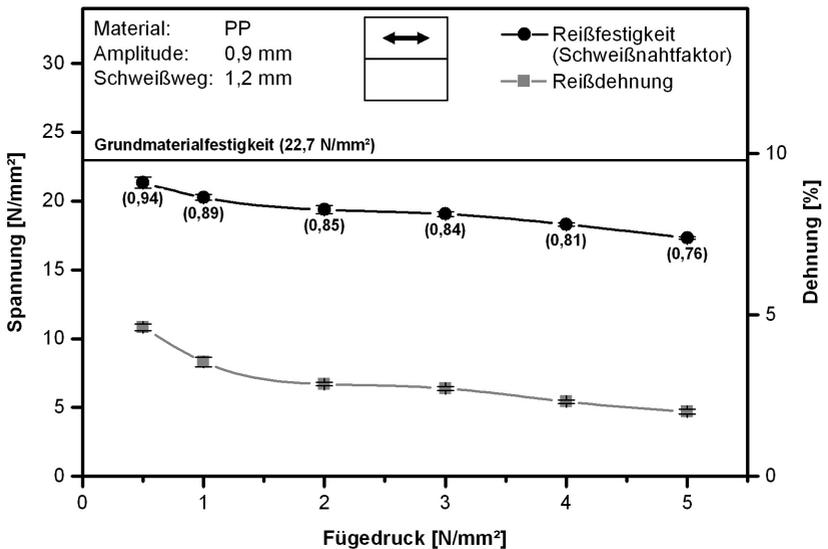


Bild 5.9: Einfluss des Fügedrucks auf Reißfestigkeit und Reißdehnung bei PP;
Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; Schwingrichtung: linear längs;

Ein ähnliches Verhalten zeigt das in Bild 5.10 dargestellte PA66. Die Festigkeit fällt ebenfalls um knapp 20 % ab. Die Reißdehnung verringert sich sogar um 75 %. Im Gegensatz zum PP stagnieren Reißfestigkeit und -dehnung jedoch ab einem Fügedruck von ca. 3 N/mm². Dieses Plateau ist beim glasfaserverstärkten Polyamid noch deutlicher ausgeprägter (Bild 5.11). Der Festigkeitsverlust von 20 % und die Verringerung der Reißdehnung um 25 % resultieren aus einer sehr geringen Fügedrucksteigerung von 0,5 N/mm² auf 1,0 N/mm². Eine weitere Verringerung der mechanischen Kennwerte mit steigendem Fügedruck ist im Kurzzeit-Zugversuch nicht festzustellen.

Das untersuchte PBT zeigt ebenfalls über den kompletten Fügedruckbereich von 0,5 N/mm² bis 5 N/mm² einen stetigen Festigkeitsabfall. Dieser fällt mit knapp 12 % jedoch deutlich geringer als bei den anderen untersuchten Werkstoffen aus. Dennoch fällt die Reißdehnung bei einem Fügedruckanstieg von 0,5 N/mm² auf 2 N/mm² um knapp 70 % ab. Danach stellt sich ein Plateau mit konstanter Reißdehnung ein.

Das untersuchte PC hingegen zeigt keine Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte vom eingestellten Fügedruck (Bild 5.13). Über den gesamten untersuchten Fügedruckbereich von 0,5 N/mm² bis 5 N/mm² liegen die Festigkeiten auf Grundmaterialniveau.

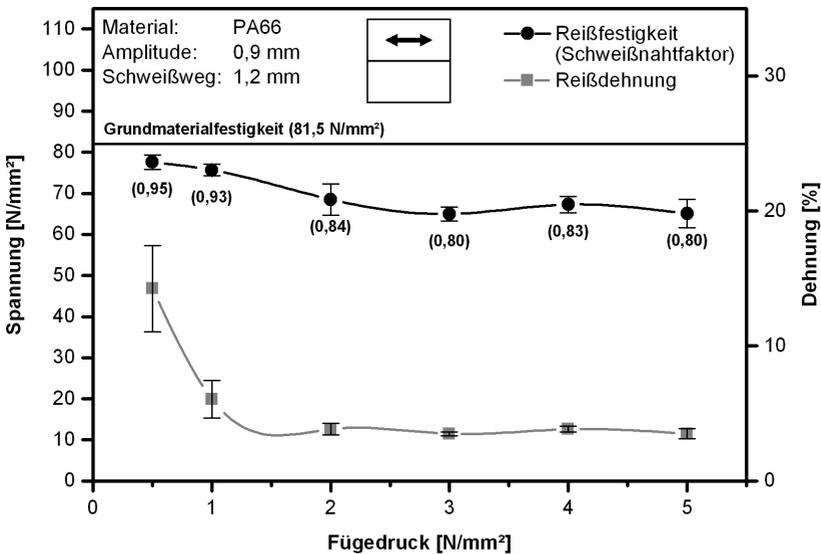


Bild 5.10: Einfluss des Fügedrucks auf Reißfestigkeit und Reißdehnung bei PA66; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; Schwingrichtung: linear längs;

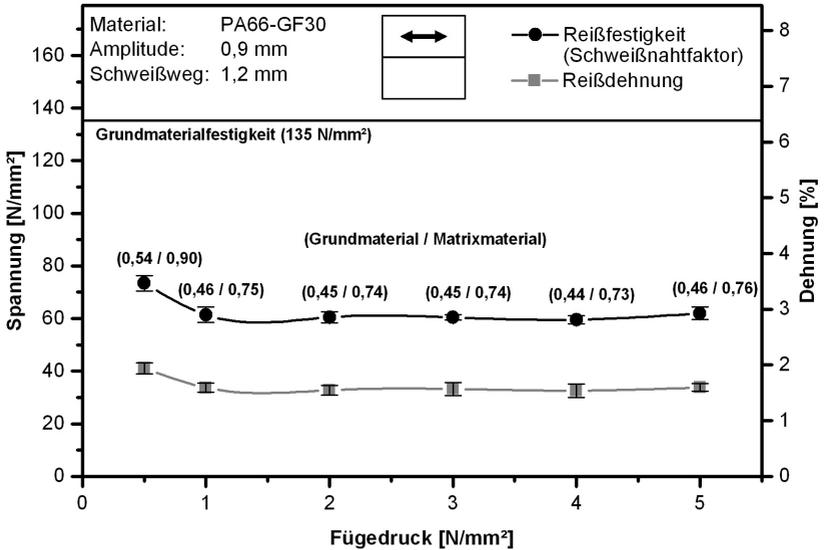


Bild 5.11: Einfluss des Fügedrucks auf Reißfestigkeit und Reißdehnung bei PA66-GF30; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; Schwingrichtung: linear längs;

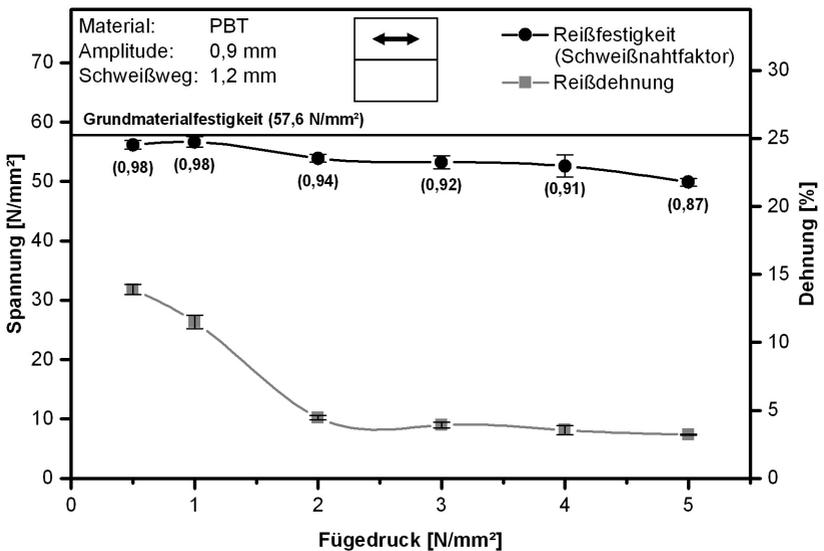


Bild 5.12: Einfluss des Fügedrucks auf Reißfestigkeit und Reißdehnung bei PBT; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; Schwingrichtung: linear längs;

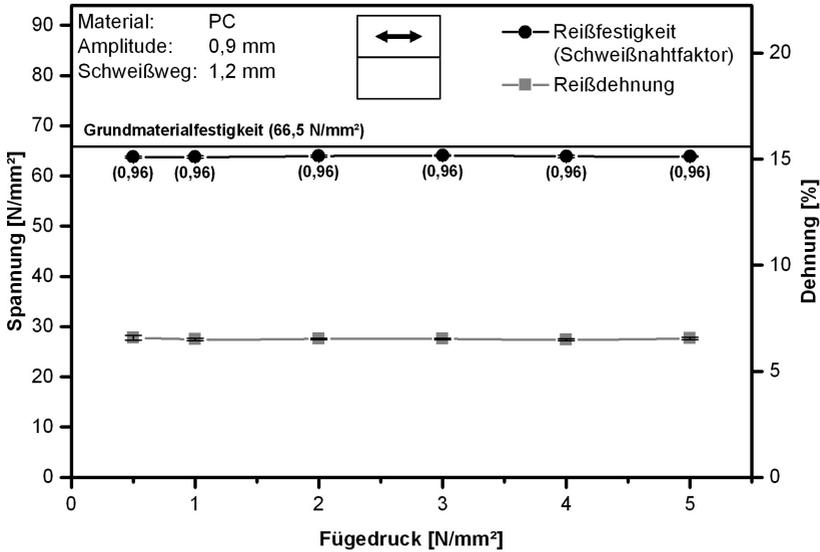


Bild 5.13: Einfluss des Fügedrucks auf Reißfestigkeit und Reißdehnung bei PC; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; Schwingrichtung: linear längs;

5.2.2 Einfluss der Viskosität

Die in Kapitel 5.2.1 beschriebene Drucksensibilität, welche bei allen Kunststoffschweißverfahren der dominierende Einflussfaktor ist, wird auf die Verringerung der Restschmelzeschichtdicke mit steigendem Fügedruck zurückgeführt. In Bild 5.14 sind polarisationsoptische Dünnschnittaufnahmen von zwei Vibrationsschweißnähten aus PP zu sehen, welche qualitativ den Einfluss des Fügedrucks widerspiegeln. Es sind sehr starke Unterschiede hinsichtlich des Nahtaufbaus zu erkennen. Bei einem vergleichsweise hohen Fügedruck bildet sich eine sehr dünne Schweißnaht aus (Bild 5.14 rechts). Die Schmelze im Fließkanal wird während des Fügeprozesses sehr stark geschert. Es sind kaum unterschiedliche Schichten des Nahtaufbaus mittels der angewandten polarisationsoptischen Durchlichtmikroskopie zu erkennen. Diese Scherbelastung fällt bei geringen Fügedrücken deutlich geringer aus (Bild 5.14 links). Es ist der klassische Schichtaufbau einer Vibrationsschweißnaht zu erkennen. Aufgrund der geringen Scherkräfte weisen die Sphärolithe am Übergang zwischen Fließkanal und Grundmaterial eine wesentlich geringere Deformation auf. Diese Unterschiede im Nahtaufbau und der Nahtgeometrie dominieren die mechanischen Eigenschaften der Schweißnaht.

Bei konstantem Fügedruck wird die sich einstellende Restschmelzeschichtdicke im Wesentlichen von der Viskosität der Schmelze bestimmt. Je geringer die Viskosität ist, um so geringer ist der Widerstand gegen das Fließen infolge der einwirkenden Fügekraft. Bei gleicher Füge-

kraft wird mehr Schmelze in die Schweißwulst verdrängt, als bei höherer Schmelzeviskosität. Dies hat ein schnelleres Abkühlen und damit weniger Zeit für Rekrystallisationsvorgänge zur Folge. Deshalb gelten niedrigviskose Materialien als schlechter schweißbar, im Vergleich zu hochviskosen Werkstoffen.

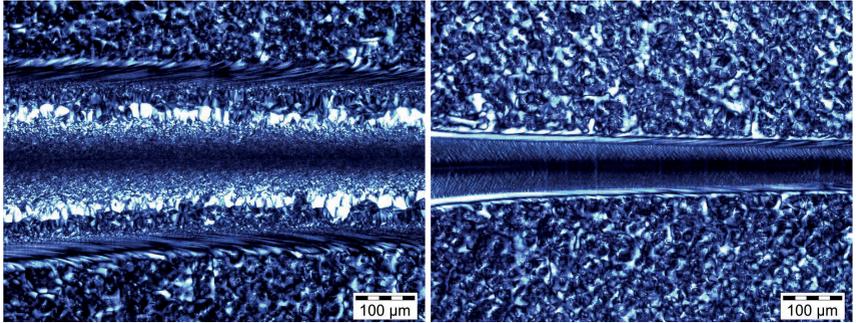


Bild 5.14: Schweißnahtgeometrie und -morphologie in Abhängigkeit des Fügedrucks; polarisationsoptische Durchlichtmikroskopie; Material: PP; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; Schwingrichtung: linear längs; links: 0,5 N/mm² Fügedruck; rechts: 2 N/mm² Fügedruck;

Um den Einfluss der Viskosität auf die Schweißbarkeit zu quantifizieren, wurden, ausgehend vom gleichen Basisharz, drei PA6-Typen mit unterschiedlichen Kettenlängen und damit unterschiedlichen Viskositäten hergestellt. Anschließend wurde der Einfluss des Fügedrucks beim linearen Vibrationsschweißen auf die erreichbare Schweißnahtfestigkeit untersucht. Bild 5.15 zeigt das Ergebnis der Untersuchungen. Entgegen den Erwartungen konnte kein signifikanter Einfluss der Viskosität auf die Fügedruckabhängigkeit des Werkstoffes ermittelt werden. Unterhalb 1 N/mm² Fügedruck liegen alle drei PA6-Typen auf dem gleichen Festigkeitsniveau. Mit steigendem Fügedruck zeigen alle drei Typen einen Festigkeitsabfall im Bereich zwischen 1 N/mm² und 2 N/mm² Fügedruck. Ab 2 N/mm² befindet sich die Festigkeit auf einem nahezu konstanten Niveau. Die hochviskose Type weist dabei sogar die geringste Festigkeit auf.

Dies ist insofern überraschend, da die Viskosität den erwarteten Effekt auf die sich einstellende Restschmelzeschichtdicke hat, wie Bild 5.16 eindeutig zeigt. Es ist zu erkennen, dass die drei Materialien bei gleichem Fügedruck unterschiedliche Restschmelzeschichtdicken ausbilden. Je niedrigviskoser das Material, desto dünner ist auch die Schweißnaht. Jedoch unterscheiden sich die Schweißnahtfestigkeiten bei gleichen Fügedrücken kaum voneinander. Die Restschmelzeschichtdicke scheint keinen Einfluss auf die Nahtfestigkeit zu haben. Schaut man jedoch innerhalb einer Materialtype, so nimmt die Festigkeit mit abnehmender Restschmelzeschichtdicke ebenfalls ab.

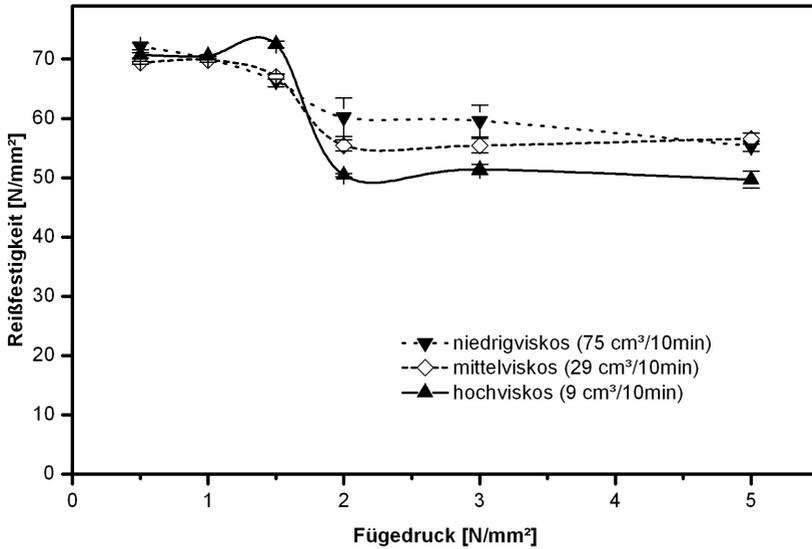


Bild 5.15: Einfluss des Fügedrucks auf die Reißfestigkeit bei PA6 mit unterschiedlichen Viskositäten; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; Schwingrichtung: linear längs;

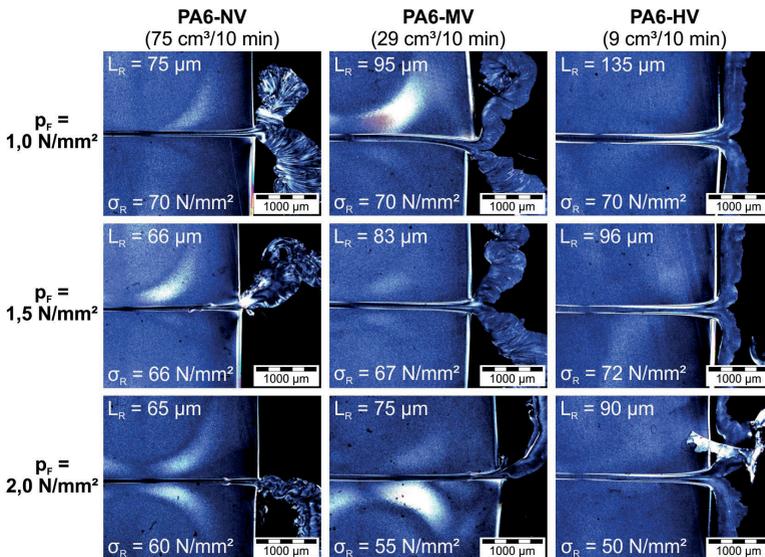


Bild 5.16: Einfluss des Fügedrucks auf die Restschmelzeschichtdicke bei PA6 mit unterschiedlichen Viskositäten; polarisationsoptische Durchlichtmikroskopie; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; Schwingrichtung: linear längs;

Dass die Viskosität scheinbar keinen Einfluss auf die Drucksensibilität des Werkstoffes hat, ist vermutlich auf das Kristallisationsverhalten zurückzuführen. Die unterschiedlichen Kettenlängen haben nicht nur Einfluss auf die Viskosität des Werkstoffes, sondern auch auf die Kristallisationsgeschwindigkeit. Kürzere Ketten bedeuten eine höhere Kettenbeweglichkeit, was sowohl eine geringere Viskosität, als auch eine höhere Kristallisationsgeschwindigkeit zur Folge hat. Während die geringere Viskosität ein dünneres Schmelzepolster im Vibrationsschweißprozess zur Folge hat und damit ein schnelleres Abkühlen der Schweißnaht verursacht, wird dies durch eine höhere Rekristallisationsgeschwindigkeit wieder ausgeglichen. Entgegen der allgemeinen Annahme, muss die Viskosität keinen Einfluss auf die Drucksensibilität eines Werkstoffes haben. Diese Aussage kann jedoch nur gelten, wenn die Viskosität über die Kettenbeweglichkeit verändert wird. Eine Aussage zu viskositätsverändernden Additiven, wie beispielsweise Öle, kann hier nicht getroffen werden.

Bild 5.17 zeigt die Rekristallisationspeaks der drei PA6-Typen während der Abkühlfahrt in der DSC. Die niedrigviskose PA6-Type hebt sich hier deutlich von den beiden anderen Materialien hinsichtlich des Rekristallisationsverhaltens ab. Sowohl die Höhe des Peaks, als auch der Anstieg und der Beginn der Rekristallisationskurve lassen auf eine schnellere Keimbildung und Rekristallisation des Werkstoffes schließen. Auch die beiden Kurven der mittel- und hochviskosen Typen unterscheiden sich in Höhe und Beginn des Rekristallisationspeaks, wenn auch nicht so deutlich, wie bei der niedrigviskosen Type. Jedoch wird die oben getroffene Annahme damit tendenziell bestätigt.

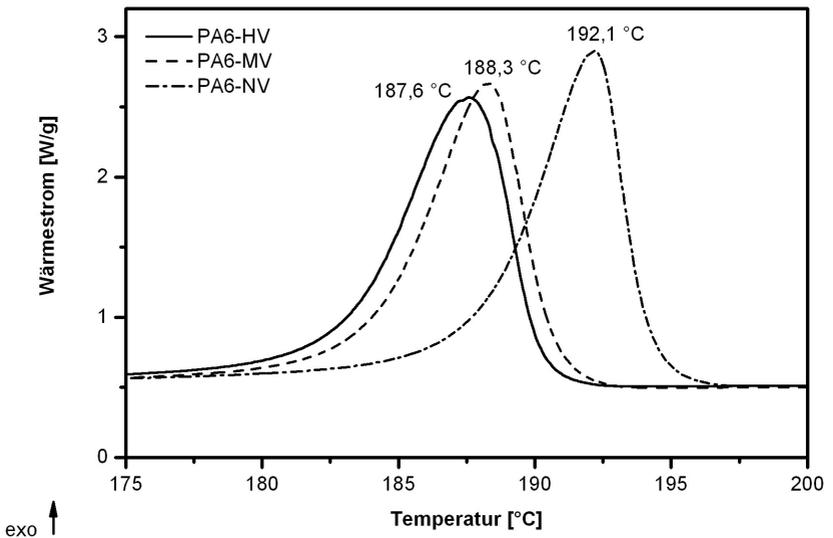


Bild 5.17: Rekristallisationspeaks bei der Abkühlfahrt in der DSC der drei PA6-Typen;

Kurzzusammenfassung - Drucksensibilität der untersuchten Werkstoffe

Mit Ausnahme des Polycarbonates zeigten alle untersuchten Werkstoffe die charakteristische Fügedruckabhängigkeit der mechanischen Schweißnahteigenschaften. Die höchsten Reißfestigkeiten und -dehnungen im Kurzzeit-Zugversuch wurden dabei bei der Verwendung des geringsten Fügedrucks von $0,5 \text{ N/mm}^2$ erreicht. Während bei PP und PBT im untersuchten Fügedruckbereich von $0,5 \text{ N/mm}^2$ bis 5 N/mm^2 ein stetiger Festigkeitsabfall zu verzeichnen war, zeigten die untersuchten PA-Typen ab einem Fügedruck von 2 N/mm^2 keinen weiteren Festigkeitsverlust.

Der vermutete Einfluss der Viskosität auf die Drucksensibilität konnte bei den untersuchten PA6-Typen nicht bestätigt werden. Trotz der deutlich unterschiedlichen Viskositäten und den daraus resultierenden unterschiedlichen Restschmelzeschichtdicken bei gleichen Fügedrücken konnten keine signifikanten Unterschiede der mechanischen Kennwerte festgestellt werden. Hier wurde die These aufgestellt, dass dies auf die unterschiedlichen Kristallisationsgeschwindigkeiten infolge der unterschiedlichen Kettenlängen zurückzuführen ist. Diese Vermutung wurde mit dem in der DSC gemessenen Rekristallisationsverhalten untermauert.

5.3 Bauteilverzug

Spritzgussbauteile, insbesondere aus kurzglasfaserverstärkten Kunststoffen, weisen prozessbedingt häufig einen mehr oder weniger ausgeprägten Verzug auf. Das sich anschließende Schweißverfahren muss diese Fertigungstoleranzen ausgleichen. Dabei können drei wesentliche Geometrieabweichungen unterschieden werden: seitlicher Versatz der Fügepartner, großflächiger Bauteilverzug und Einfallstellen. Ein seitlicher Versatz der beiden Fügepartner kann in der Regel über das Aufnahmewerkzeug eliminiert werden. Auch Unebenheiten infolge großflächigen Bauteilverzugs können zum Teil über das Aufnahmewerkzeug ausgeglichen werden. In der Regel wird jedoch mit einem erhöhten Fügedruck geschweißt, um die Bauteile zwangsweise vollflächig zu kontaktieren. Aus der kraftabhängigen Verformung der Fügepartner beim Schweißen resultiert ein lokal unterschiedlicher Fügedruck über den Umfang der Schweißnaht. Ausgehend von der in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Drucksensibilität der meisten Werkstoffe muss dies zu lokal unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften führen. Einfallstellen können hingegen nur über eine Erhöhung des Schweißweges ausgeglichen werden.

5.3.1 lokale Festigkeitsverteilung

Bild 5.18 zeigt die lokale Festigkeitsverteilung für das untersuchte PP bei einem Fügedruck von 1 N/mm^2 in Gegenwart von $0,1 \text{ mm}$ Bauteilverzug. Aufgrund des u-förmigen Bauteilverzugs herrscht zu Prozessbeginn an den beiden äußeren Enden (Position 1 und 12) ein höherer Fügedruck als im zentralen Bereich (Position 6 und 7) des Plattenprüfkörpers. Entgegen der Erwartungen weisen die Randbereiche (Position 1 bis 4 und 9 bis 12) eine vergleichsweise hohe Festigkeit auf. Der zentrale Bereich (Position 5 bis 8), welcher zu Prozessbeginn nur sehr geringe Fügekräfte erfährt, zeigt hingegen die geringsten mechanischen Eigenschaften.

Da die mechanischen Eigenschaften im Wesentlichen von der Dicke des Schmelzpolsters in Phase 3 und damit vom herrschenden Fügedruck abhängig sind, muss sich die Fügedruckverteilung über die Schweißnahtlänge während des Vibrationsschweißprozesses umkehren. Bereiche, welche zu Prozessbeginn einen hohen Fügedruck erfahren, werden während des Schweißprozesses entlastet. Die Fugekraft wird verstärkt von den zurückliegenden Bereichen aufgenommen.

Diese Annahme wird durch die gemessenen lokalen Restschmelzeschichtdicken bestätigt (Bild 5.19). Ausgehend von einer Restschmelzeschichtdicke von ca. $130 \mu\text{m}$ in den Randbereichen nimmt die Nahtdicke zum Zentrum hin stetig bis auf die Hälfte (ca. $65 \mu\text{m}$) ab.

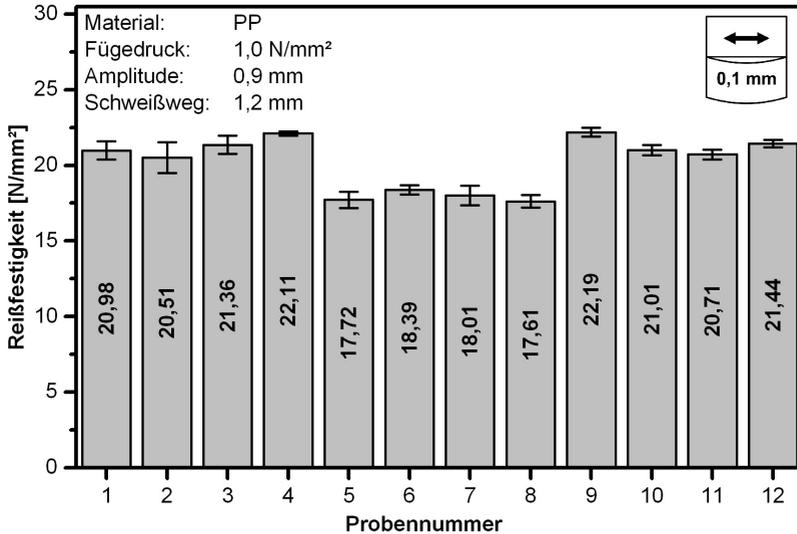


Bild 5.18: lokale Reißfestigkeiten in Gegenwart von Verzug bei geringem Fügedruck;
 Material: PP; Verzug: 0,1 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

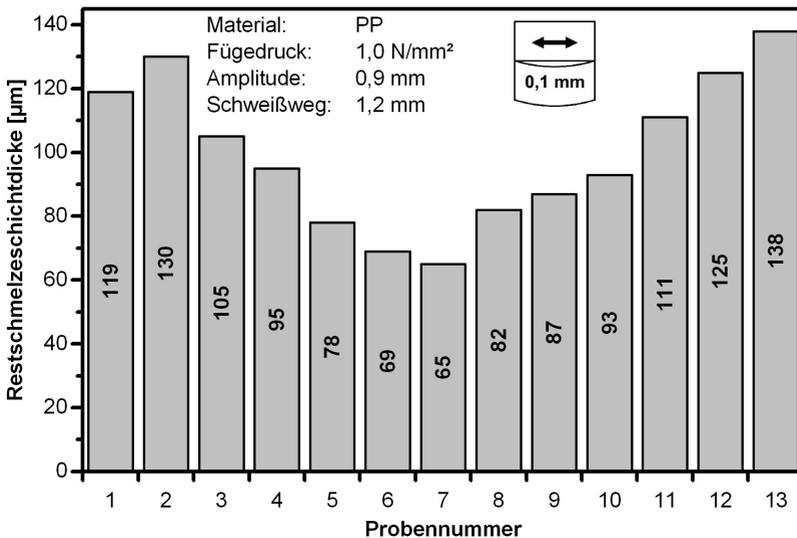


Bild 5.19: lokale Restschmelzeschichtdicken in Gegenwart von Verzug bei geringem Fügedruck;
 Material: PP; Verzug: 0,1 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Die Ursache für diese Fügedruckumverteilung ist auf einen temporär ungleichen Prozessstart über die Schweißnahtlänge zurückzuführen. In den Bildern 5.20 bis 5.24 ist dies schematisch am Beispiel des Plattenprüfkörpers dargestellt und mit Aufnahmen der IR-Kamera untermauert. Bild 5.20 zeigt die Fügedruckverteilung zu Prozessbeginn, wenn die Plattenprüfkörper mit einer definierten Fügekraft gegeneinandergedrückt werden. Die Fügekraft ist dabei so gering, dass ein vollflächiges Kontaktieren aufgrund des Verzugs nicht erreicht wird. Es bilden sich lokale Druckspitzen in den Kontaktbereichen.

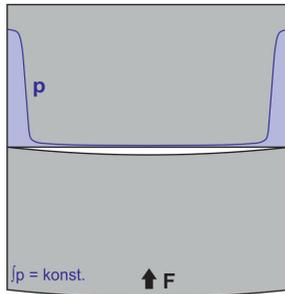


Bild 5.20: schematische Darstellung der Fügedruckverteilung in Gegenwart von Bauteilverzug vor Einsetzen der Vibration bei geringer Fügekraft;

Mit dem Einsetzen der Vibrationsbewegung beginnt die Erwärmung durch Grenzflächenreibung nur in den sich kontaktierenden Randbereichen. Die Phase 1 wird dabei vergleichsweise schnell durchlaufen, da der herrschende lokale Fügedruck deutlich über dem theoretisch eingestellten Wert liegt. Die Aufnahme der IR-Kamera zeigt diese lokale Erwärmung der Plattenprüfkörper zu Prozessbeginn (Bild 5.21 rechts).

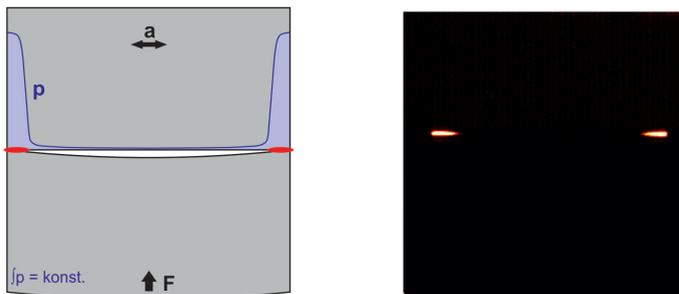


Bild 5.21: lokales Aufschmelzen der Randbereiche aufgrund der Fügedruckverteilung;
links: schematische Darstellung;
rechts: Aufnahme mit IR-Kamera;

Mit beginnender Schmelzbildung in den Randbereichen und der damit verbundenen Schmelze-
 verdrängung bewegen sich die Platten aufeinander zu (Beginn der Phase 2). Dadurch nimmt die
 Kontaktfläche zwischen den beiden Fügepartnern von außen nach innen stetig zu (Bild 5.22).
 Die Fügekraft wird somit auf eine stetig wachsende Fügefläche verteilt. Die Druckspitzen in den
 Randbereichen werden allmählich abgebaut.

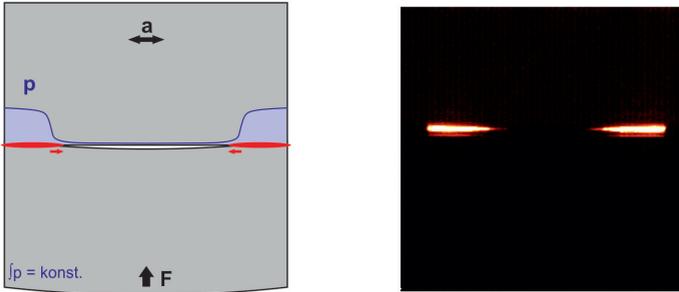


Bild 5.22: Zunahme der Fügefläche durch lokales Aufschmelzen der verzogenen Fügepartner;
 links: schematische Darstellung;
 rechts: Aufnahme mit IR-Kamera;

Durch das Aufschmelzen der Randbereiche und die stetige Zunahme der Kontaktfläche treffen
 immer wieder kalte Bereiche aufeinander (Bild 5.23). Diese bremsen den Schweißprozess
 ab, bis das Material auf Schmelztemperatur erwärmt ist. Die kalten Bereiche können dabei
 deutlich mehr Kraft übertragen als die Bereiche, in denen sich bereits Schmelze gebildet
 hat, da diese aufgrund ihrer Viskosität ausweichen kann. In einer Art Reißverschlussystem
 entstehen so erneut Druckspitzen am Übergang zwischen bereits aufgeschmolzenen und noch
 im Feststoffzustand befindlichen Materialbereichen.

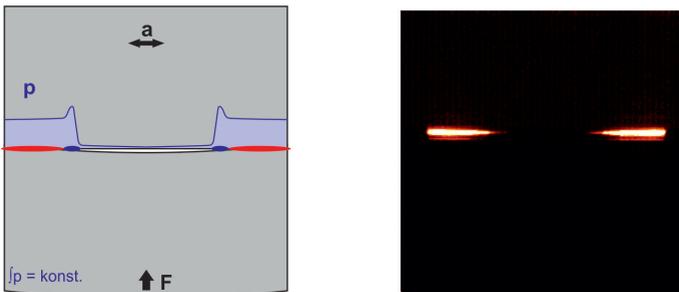


Bild 5.23: entstehende Druckspitzen in den kalten Materialbereichen;
 links: schematische Darstellung;
 rechts: Aufnahme mit IR-Kamera;

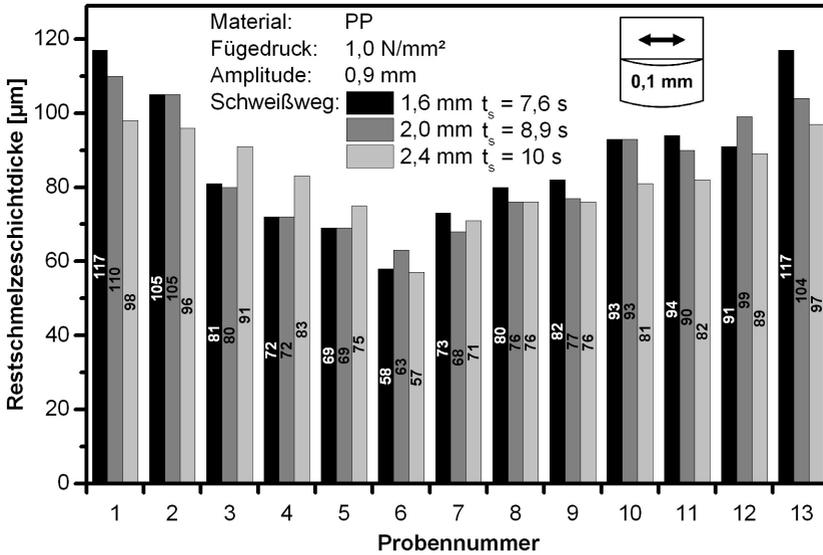


Bild 5.25: Einfluss des Fügewegs auf die lokalen Restschmelzeschichtdicken in Gegenwart von Bauteilverzug bei geringem Fügedruck;
 Material: PP; Verzug: 0,1 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm;

Erst mit einer Verdopplung des Fügedrucks von 1 N/mm² auf 2 N/mm² konnte eine gleichmäßige Wärmeentwicklung über die komplette Schweißnahtlänge von Prozessbeginn an mittels der IR-Kamera gemessen werden (Bild 5.26). Die höhere Fügekraft ist ausreichend hoch, um den Plattenprüfkörper zu deformieren, den Verzug von 0,1 mm auszugleichen und die komplette Fügefläche schon zu Prozessbeginn in Kontakt zu bringen.

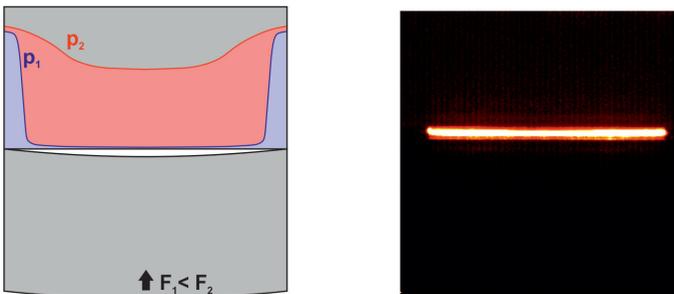


Bild 5.26: Fügedruckverteilung in Gegenwart von Bauteilverzug bei hoher Fügekraft;
 links: schematische Darstellung im Vergleich zu geringer Fügekraft;
 rechts: Aufnahme mit IR-Kamera zu Prozessbeginn;

Ein Fügedruckgradient ist zwar nach wie vor vorhanden, jedoch ist dieser so gering, dass er über die Dauer des Schweißprozesses ausgeglichen werden kann. Bild 5.27 zeigt die resultierenden lokalen Reißfestigkeiten. Diese sind über die komplette Schweißnahtlänge annähernd konstant. Lokale Schwachstellen können nicht mehr festgestellt werden. Im Vergleich zu den Ergebnissen bei geringem Fügedruck (vgl. Bild 5.18, S. 70) sinken die lokalen Reißfestigkeiten in den Randbereichen (Position 1 bis 4 und 9 bis 12) ab. Dafür wird das Festigkeitsniveau in der Mitte des Plattenprüfkörpers (Position 5 bis 8) deutlich angehoben.

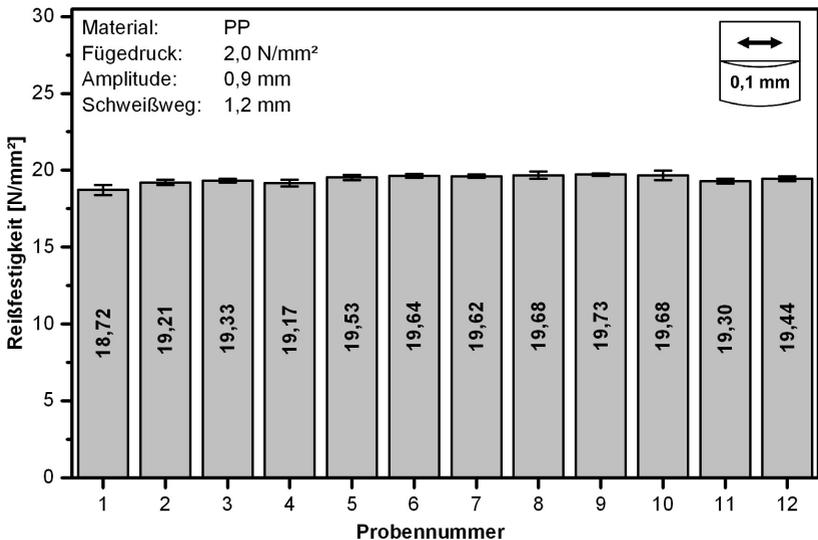


Bild 5.27: lokale Reißfestigkeiten in Gegenwart von Verzug bei hohem Fügedruck;
 Material: PP; Verzug: 0,1 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 2 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

5.3.2 Gesamtbauteilfestigkeit

Betrachtet man die Gesamtbauteilfestigkeiten der geschweißten Plattenprüfkörper, so fällt auf, dass diese sich stets auf dem Niveau der geringsten lokalen Reißfestigkeit befinden. Schon die geringste lokale Schwachstelle führt unter Belastung zum Versagen des gesamten Bauteils. Im Falle des untersuchten PP mit 0,1 mm Bauteilverzug führt dies dazu, dass die Gesamtbauteilfestigkeit bei geringem Fügedruck (Bild 5.28) mit ca. 17 N/mm² gut 10 % unterhalb der erreichten Festigkeit bei hohem Fügedruck (Bild 5.29) liegt. Dies ist auf die lokale Schwachstelle im Zentrum des Plattenprüfkörpers infolge der ungleichmäßigen Prozessbedingungen durch den Bauteilverzug zurückzuführen.

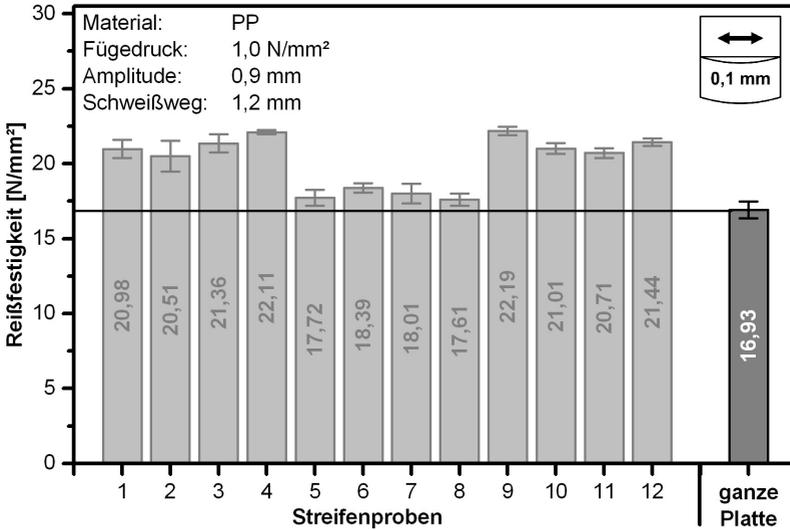


Bild 5.28: Gesamtbauteilfestigkeit in Gegenwart von Verzug bei geringem Fügedruck;
 Material: PP; Verzug: 0,1 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

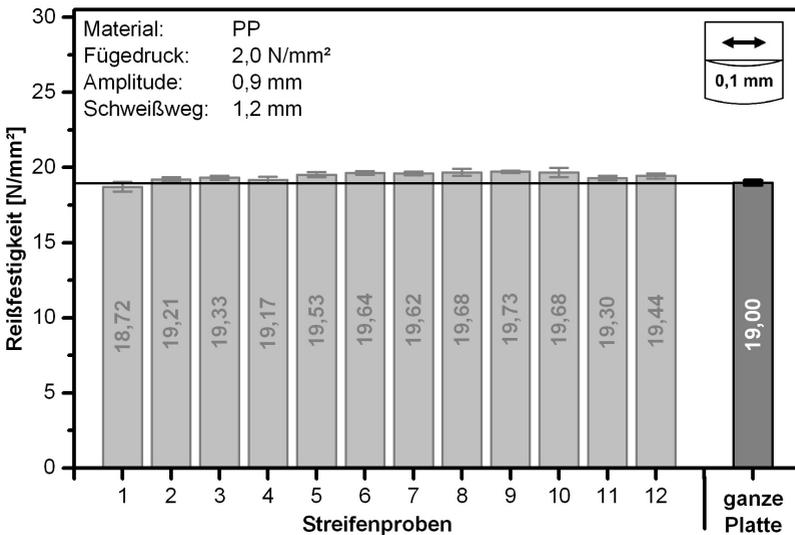


Bild 5.29: Gesamtbauteilfestigkeit in Gegenwart von Verzug bei hohem Fügedruck;
 Material: PP; Verzug: 0,1 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 2 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Bild 5.30 zeigt die erreichbaren Gesamtbauteilfestigkeiten in Abhängigkeit des verwendeten Fügedrucks für die Plattenprüfkörper aus PP mit und ohne Bauteilverzug. Während die Kurvenverläufe bei hohen Fügedrücken (ab 2 N/mm²) nahezu identisch sind, kann die charakteristische Festigkeitssteigerung mit der Verringerung des Fügedrucks nur für die Prüfkörper ohne Bauteilverzug erreicht werden. In Gegenwart von Bauteilverzug stagniert die Festigkeit auf konstant niedrigem Niveau. Dies ist auf die lokalen Schwachstellen bei niedrigen Fügedrücken zurückzuführen.

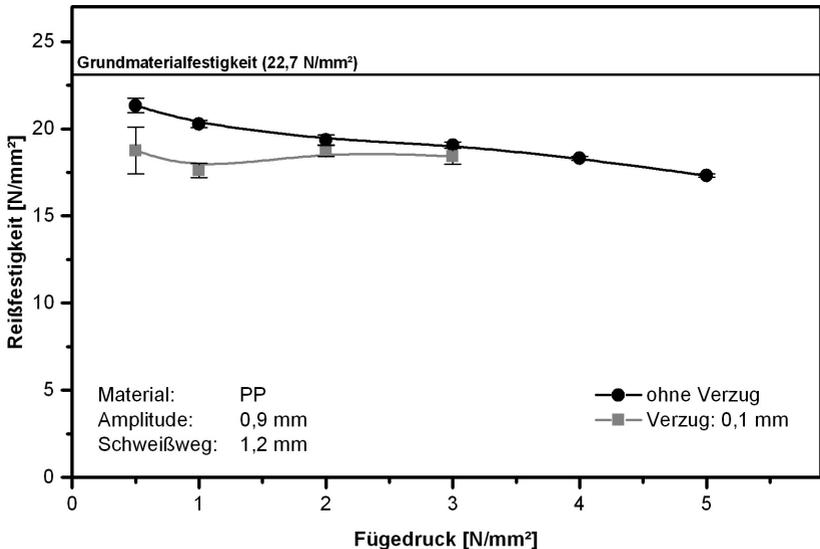


Bild 5.30: erreichbare Gesamtbauteilfestigkeit in Abhängigkeit des gewählten Fügedrucks für PP mit und ohne Verzug;
Schwingrichtung: linear längs; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Bezogen auf die Gesamtbauteilfestigkeit hat die Größe des Verzugs nur einen geringfügigen Einfluss bei den untersuchten Werkstoffen. Bilder 5.31 und 5.32 zeigen die lokale Festigkeitsverteilung für die Plattenprüfkörper aus PA66-GF30 mit Bauteilverzügen von 0,1 mm und 0,5 mm bei einem Fügedruck von 0,5 N/mm². Zwar unterscheiden sich die Festigkeitsgradienten deutlich, jedoch liegt die lokale Schwachstelle für beide Verzüge auf dem gleichen Niveau von ca. 62 N/mm². Trotz der teilweise sehr hohen lokalen Festigkeiten in den Randbereichen von bis zu 94 N/mm², liegt die Gesamtbauteilfestigkeit in Gegenwart von Bauteilverzug auf dem geringen Niveau von Vibrationsschweißnähten mit hohen Fügedrücken (Bild 5.33). Dieses Verhalten gilt auch für das unverstärkte PA66 (Bild 5.34).

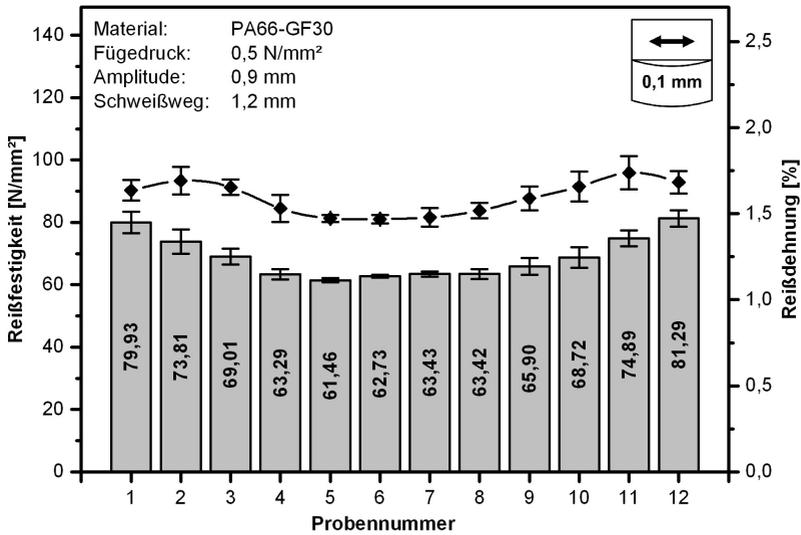


Bild 5.31: lokale Reißfestigkeiten in Gegenwart von geringem Verzug;
 Material: PA66-GF30; Verzug: 0,1 mm; Schwingrichtung: linear längs
 Fügedruck: 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

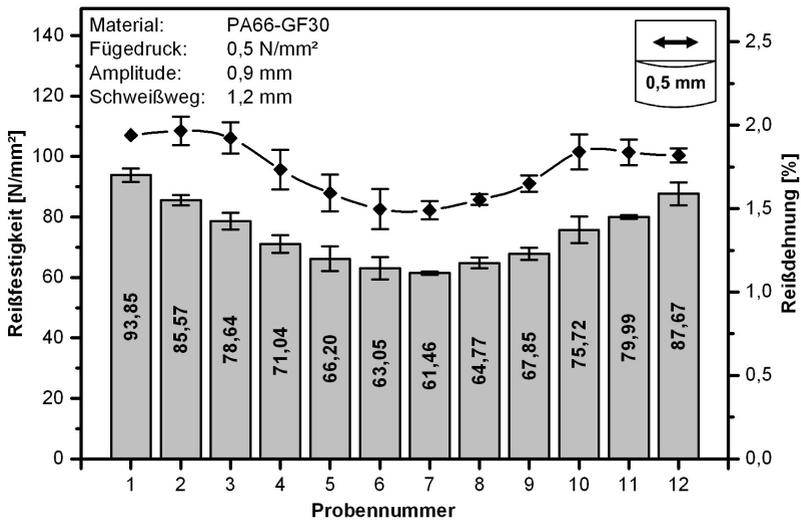


Bild 5.32: lokale Reißfestigkeiten in Gegenwart von hohem Verzug;
 Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

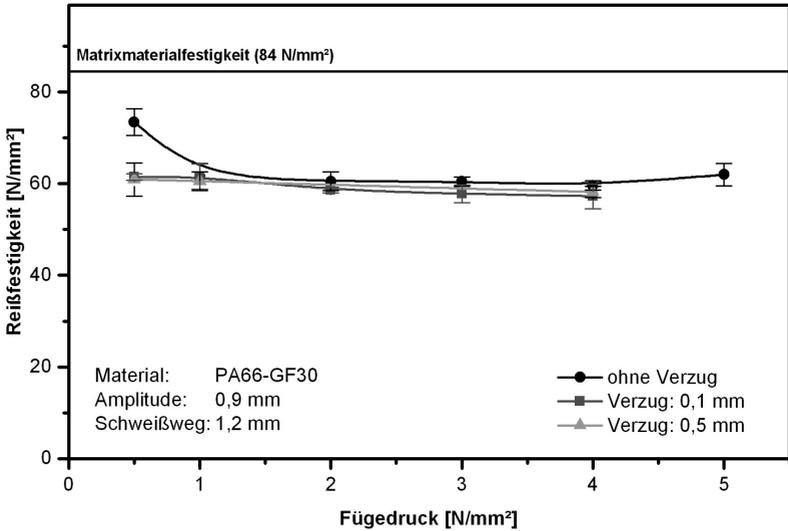


Bild 5.33: erreichbare Gesamtbauteilfestigkeit in Abhängigkeit des gewählten Fügedrucks für PA66-GF30 mit und ohne Verzug;
 Schwingrichtung: linear längs; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

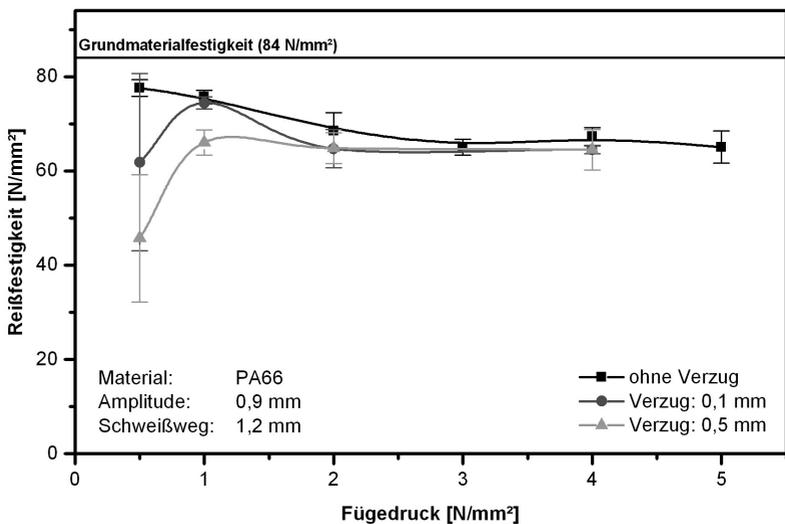


Bild 5.34: erreichbare Gesamtbauteilfestigkeit in Abhängigkeit des gewählten Fügedrucks für PA66 mit und ohne Verzug;
 Schwingrichtung: linear längs; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

5.3.3 Eigenspannungszustand

Bild 5.35 zeigt die lokale Festigkeitsverteilung für die Plattenprüfkörper aus PC mit 1 mm Bauteilverzug bei einem Fügedruck von 0,5 N/mm². Trotz des extrem hohen Verzugs wurden über die komplette Schweißnahtlänge Festigkeiten auf Grundmaterialniveau erreicht.

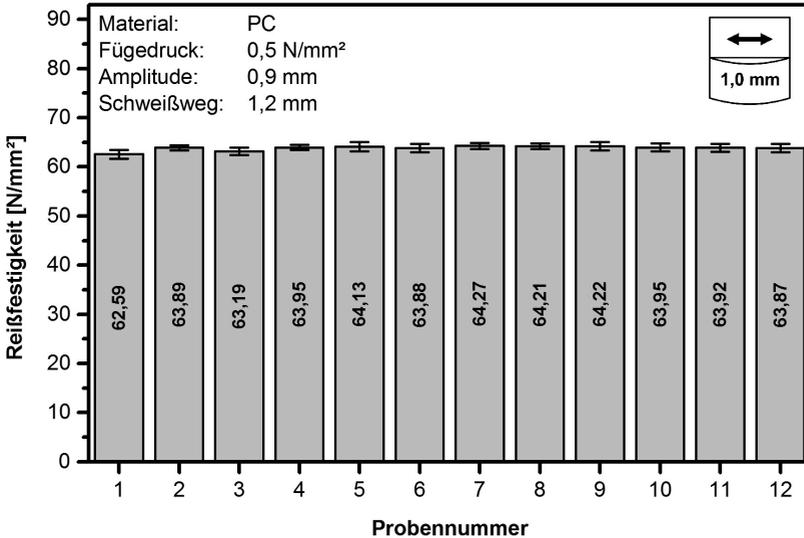
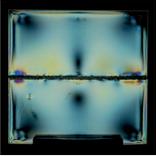
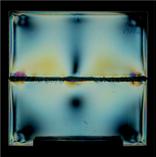
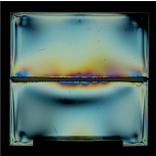
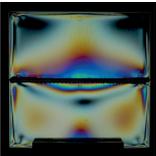
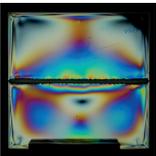
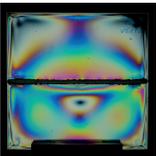
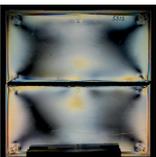


Bild 5.35: lokale Reißfestigkeiten in Gegenwart von hohem Verzug;
 Material: PC; Verzug: 1,0 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Dieses Verhalten kann damit begründet werden, dass das PC keinerlei Abhängigkeit der Schweißnahtfestigkeit vom verwendeten Fügedruck zeigt (vgl. Bild 5.13, S. 64). Tabelle 5.1 zeigt jedoch den Einfluss des Bauteilverzugs auf den Eigenspannungszustand der geschweißten Plattenprüfkörper in Abhängigkeit des verwendeten Fügedrucks. Wird der Fügedruck hinreichend klein gewählt, so kann trotz eines vergleichsweise hohen Bauteilverzuges von 1 mm kein kritischer Eigenspannungszustand festgestellt werden. Ab einem Fügedruck von 3 N/mm² ist eine deutliche Zunahme der Eigenspannungen in Gegenwart von Bauteilverzug zu erkennen. Dies ist auf die Verformung des Plattenprüfkörpers während des Schweißprozesses zurückzuführen. Beim anschließenden Abkühlen unter Fügedruck werden diese Verformungsspannungen im Bauteil eingefroren. Es konnte zwar kein Einfluss dieses Eigenspannungszustandes auf die Gesamtbauteilfestigkeit gemessen werden. Jedoch kam es bei der Benetzung mit Aceton zur sofortigen Spannungsrissebildung über das gesamte Bauteil. Bei Plattenprüfkörpern ohne Bauteilverzug konnte auch bei hohen Fügedrücken von 5 N/mm² kein kritischer Eigenspannungszustand festgestellt werden. Spannungsrisseempfindliche Werkstoffe sollten somit bei geringen Fügedrücken geschweißt werden.

Tabelle 5.1: spannungsoptische Aufnahmen der geschweißten Plattenprüfkörper aus PC;

spannungsoptische Aufnahme	Fügedruck / Verzug	Eigenstresszustand
	0,5 N/mm ² / 1 mm	ausgeglichener Eigenstresszustand ----- keine Spannungsrisse bei Benetzung mit Aceton
	1,0 N/mm ² / 1 mm	
	2,0 N/mm ² / 1 mm	
	3,0 N/mm ² / 1 mm	ungünstiger Eigenstresszustand ----- sofortige Spannungsrisse bei Benetzung mit Aceton
	4,0 N/mm ² / 1 mm	
	5,0 N/mm ² / 1 mm	
	5,0 N/mm ² / ohne	

Kurzzusammenfassung - Bauteilverzug

Bauteilverzug führt zu lokal unterschiedlichen Prozessbedingungen während des Vibrations-schweißens. Zu Prozessbeginn herrscht eine inhomogene Fügedruckverteilung über die Schweißnahtlänge. Besonders bei geringen Fügekräften führt dies zu lokal unterschiedlichen Prozessgeschwindigkeiten, da die Fügefläche stetig zunimmt, bis die Höhe des Verzugs aufgeschmolzen wurde. Dies führt zu einer Fügedruckinvertierung, welche lokale Schwachstellen in den zurückliegenden Bauteilbereichen zur Folge hat. Die lokalen Schwachstellen bestimmen die Gesamtbauteilfestigkeit. Eine homogene Festigkeitsverteilung über die Schweißnahtlänge kann durch die Verwendung hoher Fügekräfte, welche das Bauteil deformieren und somit schon zu Prozessbeginn die komplette Fügefläche in Eingriff bringen, erreicht werden. Dies kann zu höheren Gesamtbauteilfestigkeiten führen. Jedoch wird durch die Deformation des Bauteils ein ungünstiger Eigenspannungszustand eingefroren. Bei spannungsrissempfindlichen Materialien ist es deshalb empfehlenswert, auch bei Bauteilverzug mit geringen Fügedrücken zu schweißen. Bei spannungsrissempfindlichen Materialien ist es hingegen sinnvoll, die Fugekraft so hoch zu wählen, dass der Verzug durch Deformation des Bauteils ausgeglichen wird und somit ein gleichmäßiger Prozessstart über die komplette Schweißnahtlänge gelingt.

5.4 Bauteilausrichtung

Neben Bauteilverzug bzw. Abweichungen von der Soll-Geometrie der zu fügenden Bauteile führt auch eine ungenaue Ausrichtung der Aufnahmewerkzeuge und damit auch der Bauteile zu den in Kapitel 5.3.1 beschriebenen, ungleichmäßigen Prozessbedingungen bei niedrigen Fügedrücken. Um diesen Einfluss zu verdeutlichen, wurden Schweißversuche mit verzugsfreien Plattenprüfkörpern aus PP durchgeführt. Um ein Verkippen zu simulieren, wurde der untere Plattenprüfkörper einseitig mit einer Metallfolie um 0,05 mm angehoben (Bild 5.36). Bezogen auf die Plattenlänge von 150 mm ergibt dies einen Kippwinkel von knapp $0,02^\circ$.

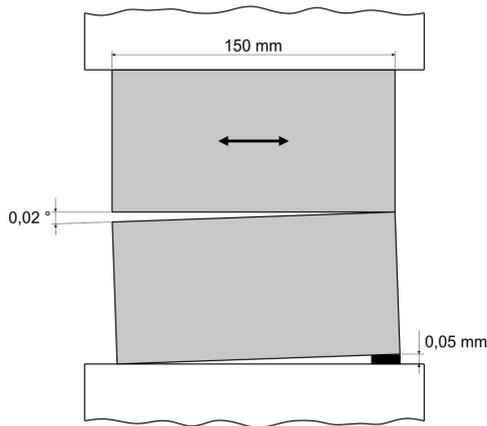


Bild 5.36: simulierte Schiefstellung des unteren Fügepartners mittels untergelegter Metallfolie;

Die anschließend durchgeführten Schweißversuche wurden mit einem Fügedruck von 1 N/mm^2 durchgeführt. Nach der in Kapitel 5.2.1 (S. 61) dargestellten Fügedruckabhängigkeit des Werkstoffes sollten sich Reißfestigkeiten im Bereich von gut 20 N/mm^2 einstellen. Die Auswertung der IR-Kamera-Aufnahmen zeigte zunächst eine punktuelle Wärmeentwicklung zu Prozessbeginn an der hervorstehenden Ecke des Plattenprüfkörpers. Mit zunehmender Prozessdauer wandert die Front der Schmelzeentstehung langsam auf die andere Seite. Bis die komplette Fügefläche in Kontakt steht, vergehen knapp 1,5 Sekunden bei einer Gesamtschweißzeit von 5 Sekunden. Bild 5.37 zeigt die resultierende lokale Festigkeitsverteilung. Trotz des sehr kleinen Kippwinkels ist ein deutlicher Festigkeitsgradient zu erkennen. Während die Reißfestigkeiten auf der erhöhten Seite mit 21 N/mm^2 den erwarteten Wert leicht übertreffen, stellt die gegenüberliegende Seite mit ca. 18 N/mm^2 die Schwachstelle der Verbindung dar.

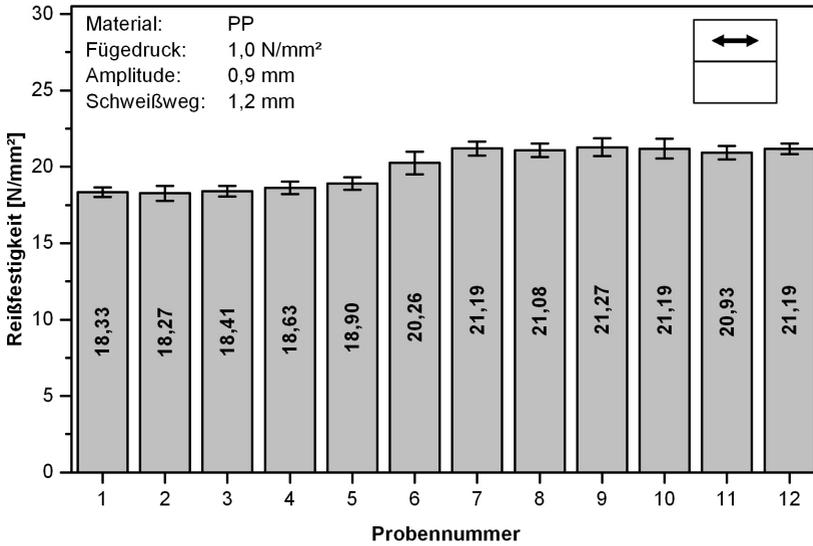


Bild 5.37: lokale Reißfestigkeiten bei unzureichender Bauteilausrichtung mit einem Höhenversatz von 0,05 mm auf einer Gesamtlänge von 150 mm;
Material: PP; Verzug: ohne; Schwingrichtung: linear längs;
Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

5.5 Einfluss der Schwingrichtung

Bereits *Giese* [Gie95] konnte in seinen Untersuchungen feststellen, dass die Schweißzeit von der Schwingrichtung abhängig ist. Bei seinen Untersuchungen an Polypropylen stellte er eine deutlich höhere Fügegeschwindigkeit fest, wenn die Plattenprüfkörper quer statt längs zur Schwingrichtung fixiert waren. Es findet sich jedoch kein Hinweis auf die freie Einspannlänge seiner Plattenprüfkörper im Aufnahmewerkzeug der Vibrationsschweißanlage.

Bild 5.38 zeigt den Einfluss der freien Einspannlänge auf den Effekt der unterschiedlichen Fügegeschwindigkeiten bei Längs- und Querschweißung am Beispiel von PBT. Gemessen wurden die Schweißzeiten bis zum Erreichen des vorgegebenen Schweißweges von 1,2 mm.

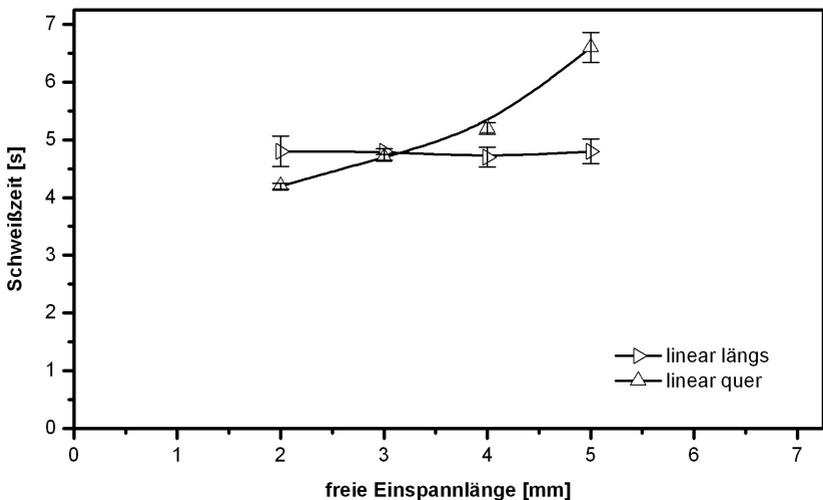


Bild 5.38: Einfluss der freien Einspannlänge auf Schweißzeit in Abhängigkeit der Schwingrichtung; Material: PBT; Fügedruck: 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Unterhalb einer freien Einspannlänge von 3 mm können die Beobachtungen von *Giese* bestätigt werden. Bei einer freien Einspannlänge von 2 mm dauert die Schweißung unter Längsschwingung ca. 15 % länger als unter Querschwingung. Die höhere Fügegeschwindigkeit unter Querschwingung wird auf den sich periodisch verändernden Fügedruck infolge der verringerten Fügefläche beim Überschwingen zurückgeführt (Bild 5.39).

Bezogen auf den verwendeten Plattenprüfkörper ergibt sich bei maximaler Auslenkung unter Querschwingung eine 30 % kleinere Fügefläche als unter Längsschwingung. Tabelle 5.2 zeigt die resultierenden Fügedrucke bei maximaler Auslenkung für den Plattenprüfkörper bei einer Amplitude von 0,9 mm.

Ausgehend von dem in Bild 5.40 dargestellten Modell des im Aufnahmewerkzeug fixierten Plattenprüfkörpers kann die Durchbiegung u wie folgt berechnet werden:

$$u = \frac{F_R \cdot h^3}{3 \cdot E \cdot I} \quad (5.1)$$

mit

$$F_R = F_F \cdot \mu \quad (5.2)$$

und

$$I = \frac{b^3 \cdot l}{12} \quad (5.3)$$

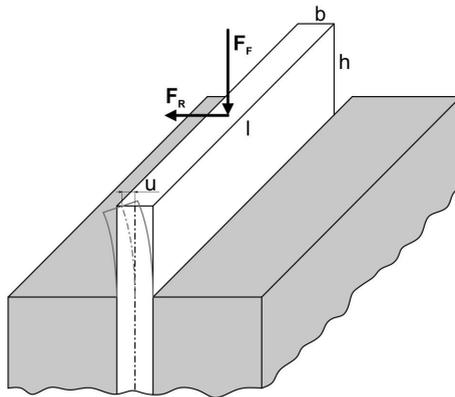


Bild 5.40: Biegung des Plattenprüfkörpers im eingespannten Zustand infolge der wirkenden Reibkraft;

Bezogen auf den verwendeten Plattenprüfkörper aus PBT mit einer Länge l von 150 mm, einer Wandstärke b von 4 mm, einer freien Einspannlänge h von 5 mm und einem E-Modul von 2400 N/mm^2 kann die Durchbiegung u in Abhängigkeit der verwendeten Fügekraft berechnet werden. Da der benötigte Reibwert μ nicht bekannt und sowohl von der Oberflächenbeschaffenheit als auch von der Temperatur abhängig ist, wird dieser zwischen 0,5 und 0,9 angenommen. Dieses Fenster spiegelt die große Bandbreite der in der Literatur zu findenden Werte wider. In Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der Biegeberechnungen dargestellt.

Die geometrische Durchbiegung nimmt proportional zur Fügekraft zu. Die berechneten Werte scheinen zwar sehr gering, jedoch muss die Durchbiegung doppelt von der eingestellten Amplitude abgezogen werden, da sich sowohl die obere als auch die untere Platte in den Aufnahmewerkzeugen durchbiegen. Die daraus resultierende effektive Amplitude ist somit wie folgt zu berechnen:

$$a_{eff} = a - 2 \cdot u \quad (5.4)$$

Tabelle 5.3: Durchbiegung des Plattenprüfkörpers (einseitig) in Abhängigkeit der Fügekraft und des Reibwerts;

F_F [N]	p_F [N/mm ²]	Durchbiegung u [mm]		
		$\mu = 0,5$	$\mu = 0,7$	$\mu = 0,9$
300	0,5	0,003	0,005	0,006
600	1	0,007	0,009	0,012
1200	2	0,013	0,018	0,023
1800	3	0,020	0,027	0,035
2400	4	0,026	0,036	0,047
3000	5	0,033	0,046	0,059

Bei einem eingestellten Fügedruck von 5 N/mm² verringert sich die Amplitude somit um knapp 0,1 mm (bei $\mu = 0,7$). Bild 5.41 zeigt den Einfluss der Amplitude auf die Schweißzeit. Da die Durchbiegung unabhängig von der eingestellten Amplitude ist, fällt dies besonders bei geringen Amplituden ins Gewicht. So steigt die Schweißzeit um ca. 1 Sekunde an, wenn sich die effektive Amplitude infolge der Durchbiegung von 0,6 mm auf 0,5 mm verringert. Aber auch bei der maximal einstellbaren Amplitude von 0,9 mm liegt die resultierende effektive Amplitude 11 % niedriger und die Schweißzeit steigt um ca. 0,3 Sekunden an.

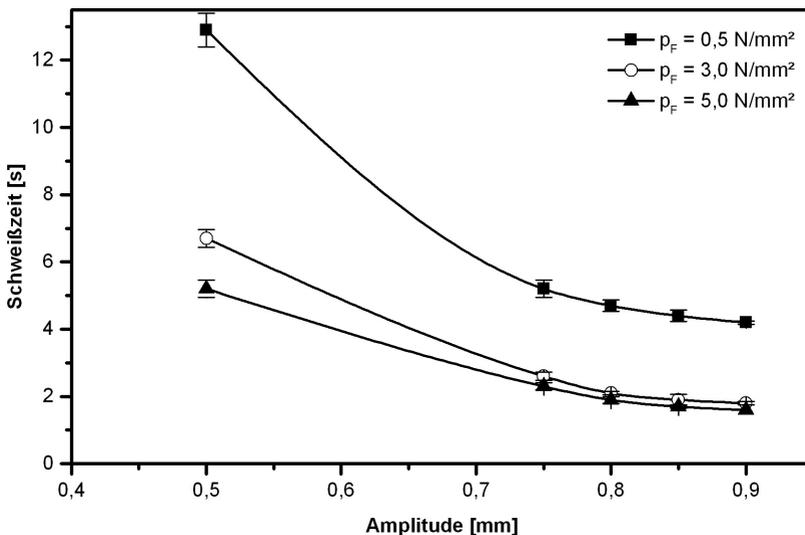


Bild 5.41: Einfluss der Amplitude auf die Schweißzeit bei verschiedenen Fügedrücken;
 Material: PBT; Schwingrichtung: linear quer; freie Einspannlänge: 2 mm;
 Schweißweg: 1,2 mm;

Zur Bestätigung der oben aufgeführten Berechnung wurde die reale Durchbiegung der Plattenprüfkörper während des Vibrationsschweißprozesses unter Querschwingung gemessen. Dazu wurde die Hochgeschwindigkeitskamera senkrecht zur Schwingrichtung auf die kurze Stirnseite der Plattenprüfkörper ausgerichtet. Es wurden Schweißungen mit einer freien Einspannlänge von 5 mm und einem Fügedruck von 5 N/mm² durchgeführt, da hier die Durchbiegung am größten und der Messfehler somit am geringsten ist. Die Auflösung der Aufnahmen betrug 25 µm/Pixel.

Bild 5.42 Mitte zeigt die Plattenprüfkörper zu Beginn des Prozesses in der Nulllage. Anschließend wurde für die verschiedenen Prozessphasen (Feststoffreibung, instationäre Schmelzebildung, quasistationäre Schmelzebildung) die geometrische Durchbiegung bei maximaler Auslenkung mittels Grauwertanalyse ausgewertet. Bilder 5.42 links und rechts zeigen die Plattenprüfkörper bei maximaler Auslenkung. Entgegen der Annahmen liegt die gemessene Durchbiegung mit 0,075 mm ca. 50 % über dem berechneten Wert und ist unabhängig von den Prozessphasen. Auch wenn sich bereits Schmelze zwischen den Plattenprüfkörpern gebildet hat und somit die Reibkraft deutlich absinkt, bleibt die Durchbiegung auf konstantem Niveau.

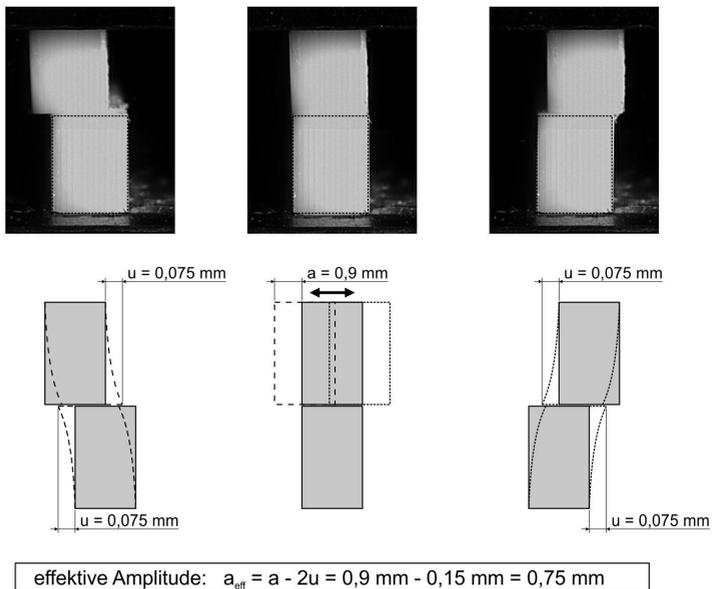


Bild 5.42: Bestimmung der Durchbiegung mittels Hochgeschwindigkeitskamera und Grauwertanalyse; Material: PBT; Schwingrichtung: linear quer; freie Einspannlänge: 5 mm; Fügedruck: 5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm; oben: Aufnahmen der Hochgeschwindigkeitskamera (2000 fps); unten: gemessene Durchbiegung und Berechnung der effektiven Amplitude;

Die Ursache für die deutlich größere Durchbiegung ist vermutlich auf eine Resonanzüberhöhung infolge der elastischen Deformation der Plattenprüfkörper zurückzuführen. Bei der ersten Auslenkung wirkt die Rückstellkraft der elastischen Deformation der Reibkraft entgegen. Nach Durchlaufen des Umkehrpunkts bei maximaler Auslenkung addieren sich jedoch beide Kräfte. Die Durchbiegung in die entgegengesetzte Richtung vergrößert sich somit. Gleichzeitig nimmt die Stärke der Anregung nach und nach ab, indem die Reibkraft mit zunehmender Temperatur verringert wird. Nach wenigen Schwingungen stellt sich ein Gleichgewichtszustand mit konstanter Durchbiegung ein. Erst mit Stoppen der Anregungsfrequenz in der Ausschwing- und Abkühlphase wird auch die Resonanzschwingung beendet.

Neben der Durchbiegung der Bauteilwände ist bei komplexen Bauteilen auch das Spiel im Aufnahmewerkzeug problematisch. Eine exakte Anpassung der Werkzeugkontur an ein Spritzgießbauteil im Zehntelmillimeter-Bereich ist nahezu unmöglich, wenn aufgrund der hohen Stückzahlen mehrere Kavitäten für den Spritzgießprozess eingesetzt werden. Wie auch die Durchbiegung, verringert das Bauteilspiel im Aufnahmewerkzeug die effektive Amplitude nur in Bereichen mit Querschwingungsanteil. Die am untersuchten Plattenprüfkörper ermittelte Verringerung der Amplitude von bis zu 150 µm kann somit ohne Übertreibung auch auf industrielle Bauteile übertragen werden.

Bild 5.43 zeigt die Auswirkung der unterschiedlichen effektiven Amplituden zwischen Bereichen unter Längs- und Querschwingung auf die resultierende Schweißzeit.

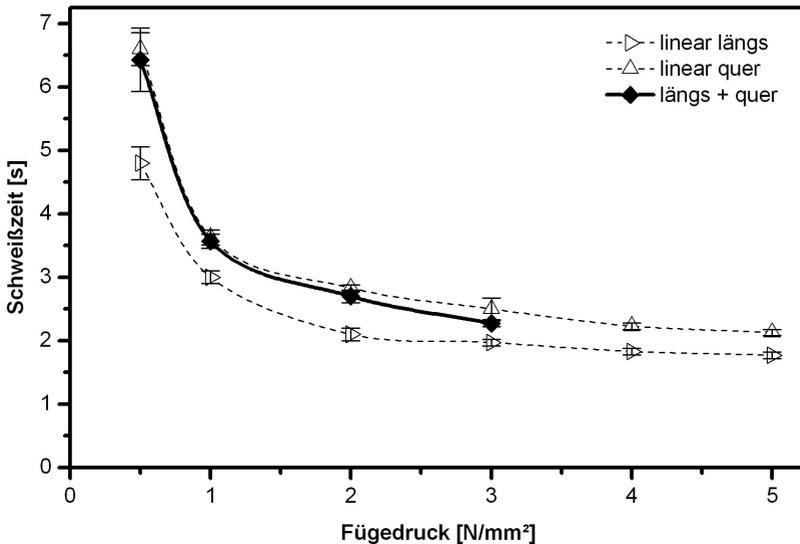


Bild 5.43: Einfluss der Schwingrichtung auf die Schweißzeit in Abhängigkeit des Fügedrucks; Material: PBT; freie Einspannlänge: 5 mm; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Die Schweißzeit für die Plattenprüfkörper unter reiner Längsschwingung ist deutlich geringer als bei reiner Querschwingung. Werden hingegen Längs- und Querschweißung gleichzeitig durchgeführt, wie es bei jedem industriellen Bauteil mit umlaufender Schweißnaht zwangsläufig auftritt, so liegt die Schweißzeit auf dem Niveau der Schweißversuche unter reiner Querschwingung. Dies bedeutet, dass die Querbereiche aufgrund ihrer geringeren effektiven Amplitude und der damit verbundenen geringeren Energieumsetzung die Längsbereiche ausbremsen. Folglich muss eine Fügedruckumverteilung von den Längs- zu den Querbereichen stattfinden, um ein global gleichmäßiges Aufschmelzen zu erreichen. Die geringere effektive Amplitude in den Querbereichen wird durch einen höheren Fügedruck ausgeglichen. Die Folgen sind geringere Restschmelzeschichtdicken und damit auch geringere mechanische Eigenschaften der unter Querschwingung erzeugten Schweißnähte.

Bild 5.44 zeigt die Reißfestigkeiten der unter reiner Längs- und reiner Querschwingung erzeugten Schweißnähte sowie die resultierenden Festigkeitswerte bei gleichzeitiger Längs- und Querschweißung für die beiden einzelnen Bereiche. Die Reißfestigkeiten unter reiner Längs- und reiner Querschwingung zeigen die materialspezifische Fügedruckabhängigkeit. Dabei liegen die Festigkeitswerte für die Längsschweißung geringfügig höher als für die Querschweißung. Bei gleichzeitiger Längs- und Querschweißung steigen die Festigkeiten in den Längsbereichen leicht an. Ein Festigkeitsabfall aufgrund steigenden Fügedrucks ist nicht mehr festzustellen. Dafür fallen die Festigkeitswerte in den Querbereichen um so deutlicher.

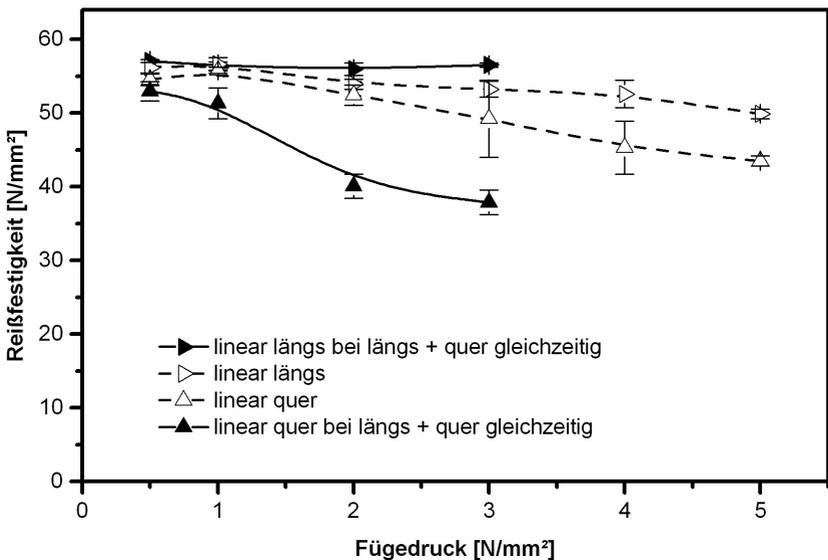


Bild 5.44: Einfluss der Schwingrichtung auf die Reißfestigkeit in Abhängigkeit des Fügedrucks; Material: PBT; freie Einspannlänge: 5 mm; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Die ermittelten Reißdehnungen zeigen, dass besonders bei geringen Fügedrücken bei den Querschweißungen deutlich geringere Werte als bei den Längsschweißungen erreicht werden (Bild 5.45). Erst ab Fügedrücken oberhalb von 2 N/mm² gleichen sich die Reißdehnungen der beiden Schwingrichtungen an. Das Auseinanderdriften der mechanischen Eigenschaften bei gleichzeitiger Längs- und Querschweißung wird hier noch deutlicher. Bezogen auf ein reales Bauteil sind die mechanischen Schwachstellen in den Bereichen unter Querschwingung zu suchen. Dies muss bei der Bauteilauslegung beachtet werden.

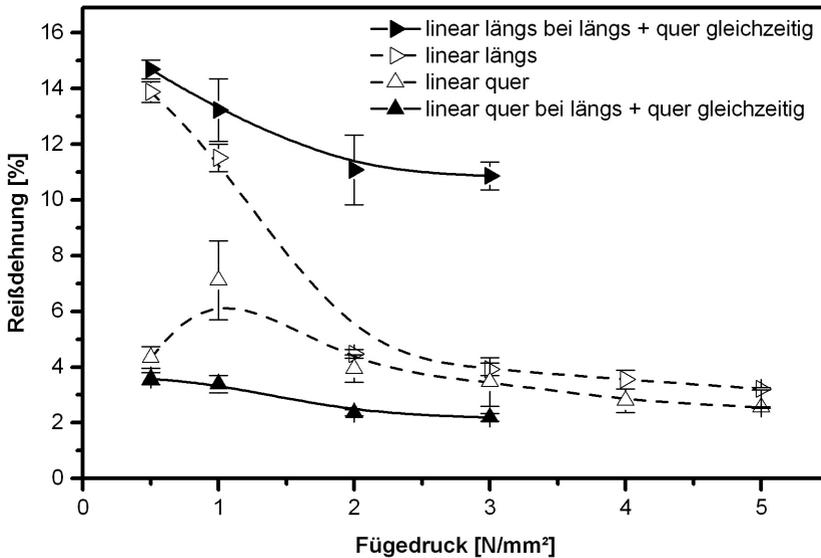


Bild 5.45: Einfluss der Schwingrichtung auf die Reißdehnung in Abhängigkeit des Fügedrucks; Material: PBT; freie Einspannlänge: 5 mm; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Kurzzusammenfassung - Einfluss der Schwingrichtung

Die Schwingrichtung beeinflusst wesentlich die Energieumsetzung im Schweißnahtbereich und somit die benötigte Schweißzeit bis zum Erreichen des erforderlichen Schweißwegs. Die geringere Biegesteifigkeit und das geometrische Spiel im Aufnahmewerkzeug führen dazu, dass die effektiv wirkende Amplitude in Schweißnahtbereichen mit Querschwingungsanteil kleiner ist als in Bereichen unter reiner Längsschwingung. Für ein Bauteil mit umlaufender Schweißnaht resultieren daraus lokal unterschiedliche Schweißgeschwindigkeiten, welche über die Prozessdauer zu einer ungleichmäßigen Fügedruckverteilung führen. Hohe mechanische Eigenschaften in den Bereichen unter reiner Längsschwingung und geringere mechanische Eigenschaften in den Bereichen mit Querschwingungsanteil sind die Folge.

5.6 Verbesserungsansätze und -potential

Lokale Schwachstellen infolge ungleichmäßiger Prozessbedingungen treten vor allem bei niedrigen Fügedrücken auf. Die Verwendung vergleichsweise hoher Fügedrücke minimiert zwar das Risiko dieser lokalen Schwachstellen, reduziert jedoch aufgrund der geringeren Restschmelzeschichtdicken grundsätzlich die erreichbaren Schweißnahtfestigkeiten. Die alternative Prozessführung des sogenannten Hochdruckanfahrens, welche von *Schlarb* [Sch89] zur Reduzierung der Prozesszeiten bereits 1989 vorgestellt wurde, bietet hier einen möglichen Lösungsansatz, um den Vorteil des gleichmäßigen Prozessstarts über die komplette Schweißnahtlänge bei hohen Fügedrücken und den Vorteil der guten mechanischen Eigenschaften, welche aus den hohen Restschmelzeschichtdicken bei geringen Fügedrücken resultieren, zu kombinieren.

Bild 5.46 zeigt die Prozessverlaufskurve für das Hochdruckanfahren am Beispiel von PA66-GF30 mit 0,5 mm Bauteilverzug. Der Prozess startet mit einem Fügedruck von 6 N/mm². Nach Erreichen der Phase 3 wird der Fügedruck auf 0,5 N/mm² reduziert. Aufgrund der Rückdeformation des Plattenprüfkörpers bei geringerem Fügedruck kommt es kurzzeitig zu einem Abfall des gemessenen Schweißweges. Nach erneutem Erreichen der Phase 3 für den geringeren Fügedruck kann der Prozess beendet werden.

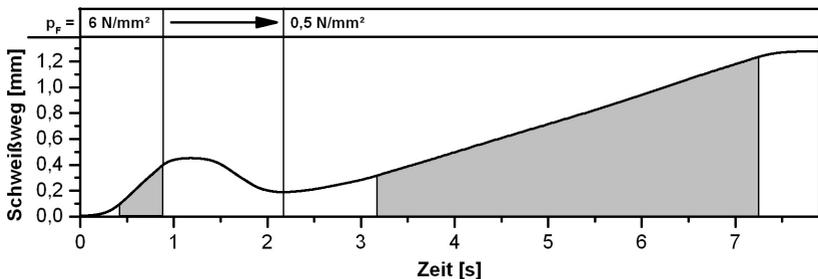


Bild 5.46: Prozessverlaufskurve beim Hochdruckanfahren in Gegenwart von Bauteilverzug;
 Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 6 N/mm² -> 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Bild 5.47 zeigt die resultierende Verteilung der lokalen Reißfestigkeiten und Reißdehnungen. Vergleicht man diese mit den Ergebnissen der konventionellen Prozessführung (Bild 5.32, S. 78) bei 0,5 mm Bauteilverzug und einem Fügedruck von 0,5 N/mm², so wird das Potential des Hochdruckanfahrens deutlich. Auch wenn der Festigkeitsgradient über die Schweißnahtlänge nicht vollständig eliminiert werden konnte, wurde zumindest das Niveau der lokalen Schwachstelle und damit auch die Gesamtbauteilfestigkeit von ca. 61 N/mm² bei konventioneller Prozessführung auf ungefähr 67 N/mm² beim Hochdruckanfahren angehoben (Bild 5.48). Positiver Nebeneffekt ist die zusätzliche Verkürzung der Prozesszeit.

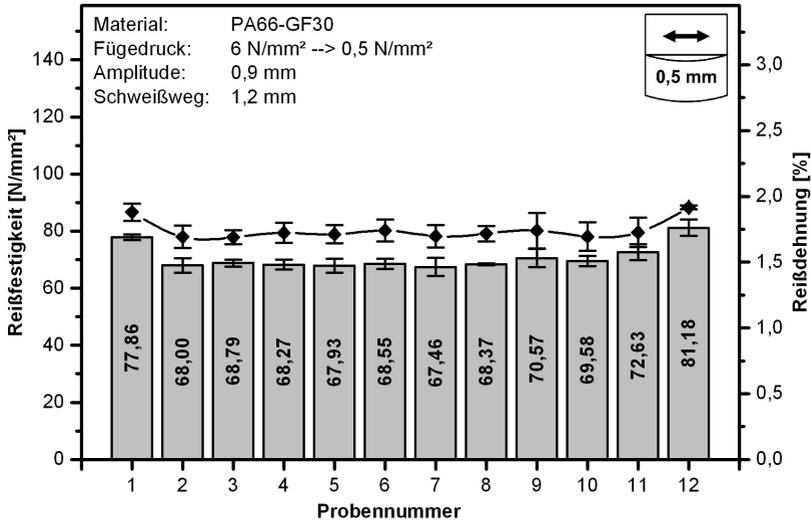


Bild 5.47: Hochdruckanfahren bei hohem Bauteilverzug; lokale Reißfestigkeiten und -dehnungen; Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs; Fügedruck: 6 -> 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

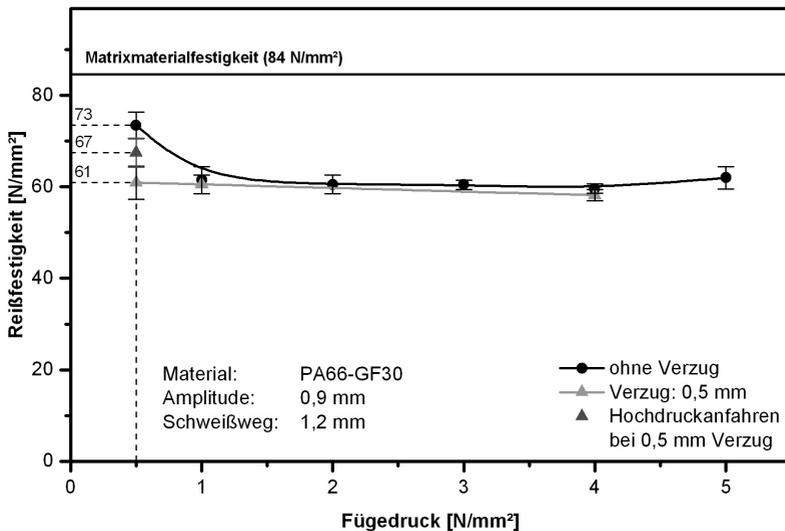


Bild 5.48: Hochdruckanfahren bei hohem Bauteilverzug; Gesamtbauteilfestigkeiten; Material: PA66-GF30; Schwingrichtung: linear längs; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Ein weiterer Lösungsansatz ist das Vorwärmen der Fügeflächen. Ziel ist es, in Gegenwart von Bauteilverzug auch bei geringen Fügedrücken innerhalb kürzester Zeit eine gleichmäßige Schmelzebildung über die gesamte Schweißnahtlänge zu erreichen. Durch den Energievorschuss wird die Dauer der Phase der Feststoffreibung minimiert und somit der in Kapitel 5.3.1 beschriebenen Fügedrukinvertierung entgegengewirkt. Im Idealfall werden die durch Bauteilverzug hervorstehenden Bereiche durch die Vorwärmung komplett in Schmelze überführt. Ähnlich der Angleichphase beim Heizelementschweißen werden die Fügeflächen beim Aufeinanderfahren der beiden Bauteile durch Schmelzeverdrängung vollständig in Kontakt gebracht. Ein gleichmäßiger Prozessbeginn ist mit beginnender Vibrationsbewegung gewährleistet. Dabei ist nicht von Relevanz, welche Methode zur Vorwärmung der Fügeflächen verwendet wird. Entscheidend ist, die Oberflächentemperatur so nah wie möglich an den Schmelztemperaturbereich oder darüber hinaus zu bringen.

Da sich das Vibrationsschweißen mit IR-Vorwärmung bereits in einigen Industriebereichen zur Reduzierung der Fusselbildung etabliert hat, ist es naheliegend diese Technologie auch für die Fügeflächenvorwärmung zur Reduzierung des Fügedruckgradienten bei Bauteilverzug einzusetzen. Die Bilder 5.49 bis 5.51 zeigen den Einfluss der IR-Vorwärmung auf die lokale Festigkeitsverteilung am Beispiel der Plattenprüfkörper aus PA66-GF30 mit einem Bauteilverzug von 0,5 mm.

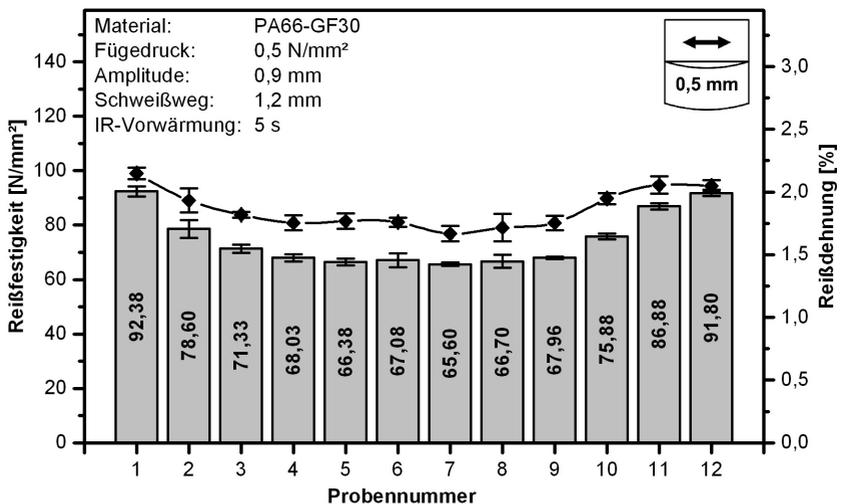


Bild 5.49: lokale Reißfestigkeiten beim Vibrationsschweißen mit 5-sekündiger IR-Vorwärmung;
 Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs
 Strahlerabstand: 2 mm; IR-Vorwärmzeit: 5 s;
 Fügedruck: 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

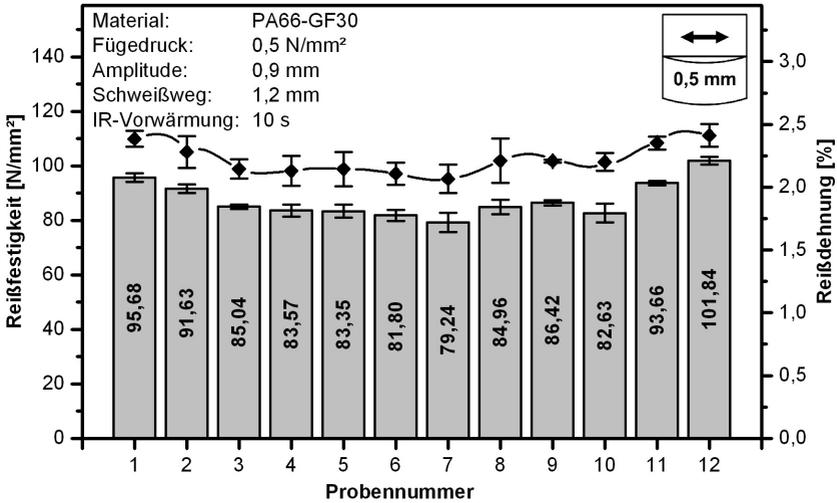


Bild 5.50: lokale Reißfestigkeiten beim Vibrationsschweißen mit 10-sekündiger IR-Vorwärmung; Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs
 Strahlerabstand: 2 mm; IR-Vorwärmzeit: 10 s; Fügedruck: 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

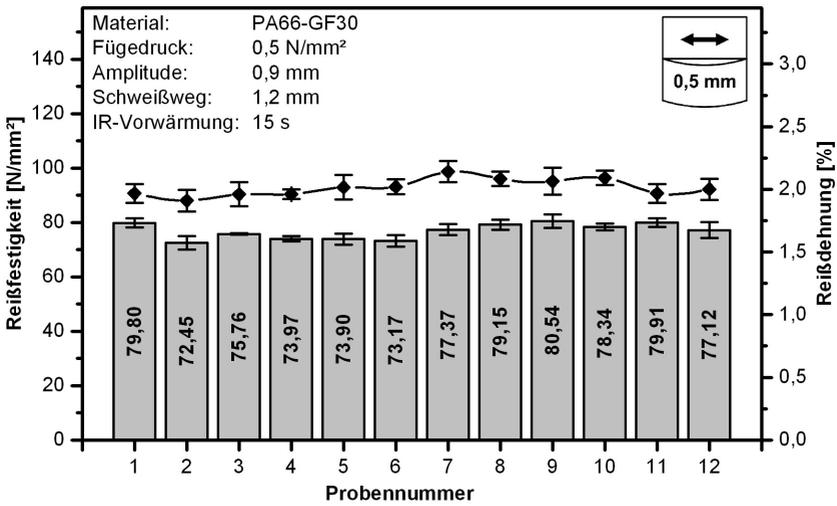


Bild 5.51: lokale Reißfestigkeiten beim Vibrationsschweißen mit 15-sekündiger IR-Vorwärmung; Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs
 Strahlerabstand: 2 mm; IR-Vorwärmzeit: 15 s; Fügedruck: 0,5 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

Mit zunehmender Vorwärmzeit zeigt sich eine Verringerung des Festigkeitsgradienten über die Schweißnahtlänge. Bereits bei 5-sekündiger IR-Vorwärmung konnte die lokale Schweißnahtfestigkeit im Zentrum des Plattenprüfkörpers auf ca. 65 N/mm², gegenüber 61 N/mm² bei klassischer Prozessführung, angehoben werden. Die Versuchsergebnisse bei 10-sekündiger IR-Vorwärmung zeigten lokale Schweißnahtfestigkeiten auf dem Niveau der Matrixmaterialfestigkeit. In den Randbereichen des Plattenprüfkörpers wurden sogar Festigkeiten bis zu 100 N/mm² gemessen. Dies lässt auf eine Verstärkungswirkung durch die Glasfasern über die Grenzfläche hinweg schließen. Bestätigt wird dies durch die Bruchbilder der Zugproben. Während der Bruch bei den Zugproben aus dem zentralen Bereich des Plattenprüfkörpers genau durch die Schweißnaht verläuft (Bild 5.52), zeigen die Zugproben aus den Randbereichen einen Mischbruch durch die Schweißnaht und das Grundmaterial (Bild 5.53). Mit weiter zunehmender Vorwärmzeit nimmt die Schweißnahtfestigkeit wieder ab. Dies ist eventuell auf eine thermische Schädigung des Materials durch die IR-Strahlung zurückzuführen.

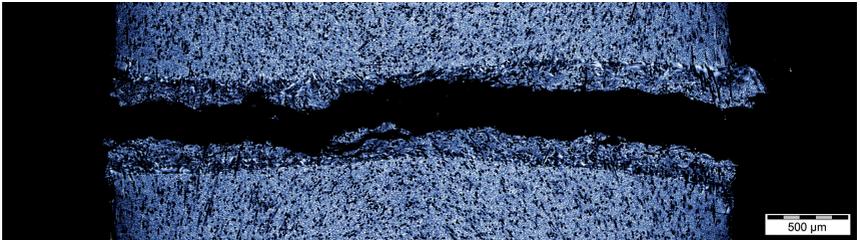


Bild 5.52: Bruchbild der Vibrationsschweißnaht mit 10-sekündiger IR-Vorwärmung; Probennummer 7 (zentraler Bereich des Plattenprüfkörpers); Reißfestigkeit: ca. 80 N/mm²; Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs;

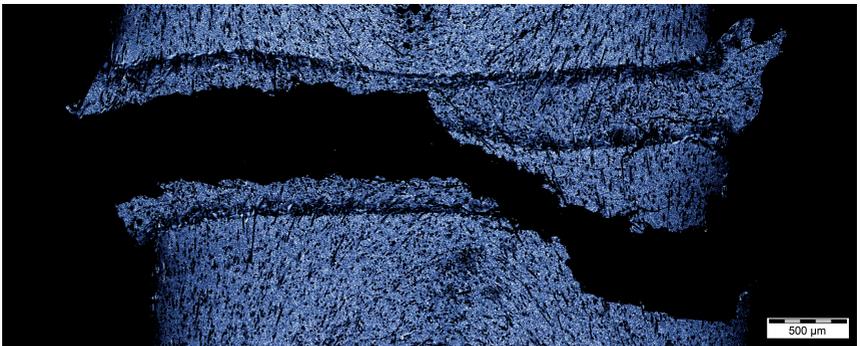


Bild 5.53: Bruchbild der Vibrationsschweißnaht mit 10-sekündiger IR-Vorwärmung; Probennummer 12 (Randbereich des Plattenprüfkörpers); Reißfestigkeit: ca. 100 N/mm²; Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs;

Neben der lokalen Vorwärmung der Fügeflächen ist besonders bei Materialien mit geringer Schmelztemperatur auch eine globale Bauteilvorwärmung zielführend. Bild 5.54 zeigt die erreichbaren Gesamtbauteilfestigkeiten in Gegenwart von 0,1 mm Bauteilverzug bei PP. Dabei wurden die Plattenprüfkörper im Ofen auf 80 °C temperiert. Trotz des Bauteilverzuges konnten unabhängig vom gewählten Fügedruck die gleichen Gesamtbauteilfestigkeiten erreicht werden, wie bei den Plattenprüfkörpern ohne Bauteilverzug. Neben der Verringerung der Biegesteifigkeit ist dies vor allem auf die deutlich kürzere Prozesszeit zum Durchlaufen der Feststofffreibphase zurückzuführen. Die zeitliche Diskrepanz zwischen den Prozessstarts in den hervorstehenden und zurückliegenden Schweißnahtbereichen wurde so stark verringert, dass sich keine merkliche Fügedruckumverteilung einstellt.

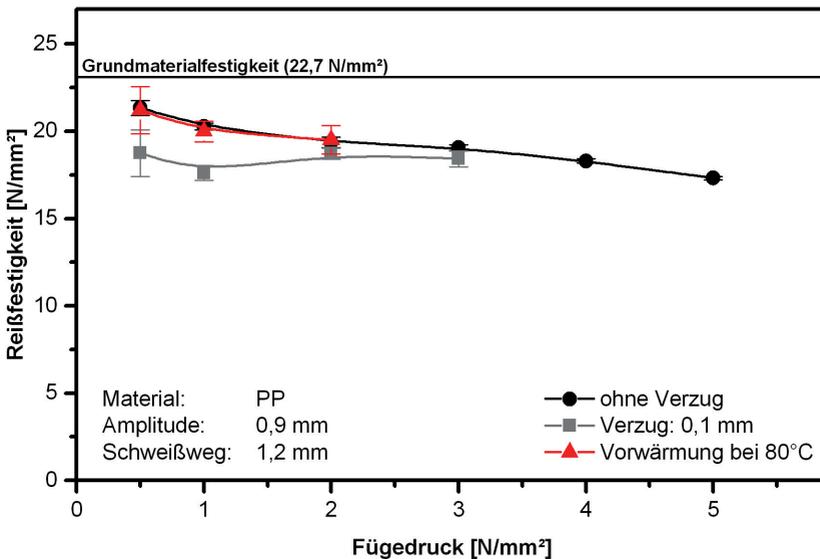


Bild 5.54: erreichbare Gesamtbauteilfestigkeiten in Gegenwart von Verzug mit und ohne Bauteilvorwärmung; Material: PP; Schwingrichtung: linear längs;

6.2 lokale Prozessbedingungen

Nach bisherigem Erkenntnisstand wird die Qualität einer Vibrationsschweißnaht vom eingestellten Fügedruck dominiert, unter der Bedingung, dass die Phase der quasistationären Schmelzebildung erreicht wird. Dabei können die besten mechanischen Eigenschaften bei möglichst geringen Fügedrücken erzielt werden. Die Ergebnisse zum Einfluss des Bauteilverzugs und zum Einfluss der Schwingrichtung haben jedoch gezeigt, dass dies nur für idealisierte Bauteile gilt, bei denen an jeder Position der Fügefläche die gleichen Prozessbedingungen herrschen. Sobald sich durch innere oder äußere Einflüsse der Start oder die Dauer der Prozessphase 1 lokal unterscheidet, führt dies zu einer ungleichmäßigen Fügedruckverteilung über die Schweißnahtlänge und damit zu lokal unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften.

Im Falle des Bauteilverzugs kommt es zu temporär unterschiedlichen Prozessstarts zwischen hervorstehenden und zurückliegenden Bereichen der Fügefläche. Die Folge ist ein Fügedruckgradient mit hohen Fügedrücken in den zurückliegenden Bereichen und niedrigen Fügedrücken in den hervorstehenden Bereichen. Auch bei, im Verhältnis zur Größe des Verzugs, sehr hohen Schweißwegen kann dieser Fügedruckgradient über die Prozessdauer nicht hinreichend abgebaut werden. Vermutlich ist dies auf die lokal unterschiedlichen Schweißzeiten zurückzuführen. Bild 6.2 zeigt schematisch die Prozessverlaufskurven für die hervorstehenden Randbereiche (Position 1) und das zurückliegende Zentrum (Position 2) des Plattenprüfkörpers in Gegenwart von Bauteilverzug. Die Prozessverlaufskurve der Randbereiche zeigt zunächst einen degressiven Verlauf, da durch stetige Zunahme der Fügefläche der Prozess gebremst wird. Erst nach vollständigem Kontakt der beiden Platten beginnt der Prozess auch im zentralen Bereich und beide Prozesskurven nehmen den gleichen Verlauf ein. Die wesentliche Diskrepanz zwischen diesen beiden Bereichen liegt in den lokal unterschiedlich langen Schweißzeiten. Bis zu dem Zeitpunkt, zu dem der Schweißprozess im zentralen Bereich beginnt, erfahren die Randbereiche einen Energievorsprung. Dieser wärmt das Material bereits vor und es wird auch später im Prozess weniger Energie benötigt, um das vorgewärmte Material aufzuschmelzen. Darin ist die Ursache zu sehen, warum der zentrale Bereich trotz höheren Fügedrucks energetisch nicht mehr aufholen kann und sich so der Fügedruckgradient nicht innerhalb wirtschaftlich relevanter Schweißzeiten abbaut.

In Bild 6.2 sind zusätzlich drei thermographische Aufnahmen der Plattenprüfkörper aus PP mit 0,1 mm Bauteilverzug bei einem Fügedruck von 1,0 N/mm² nach 1 Sekunde (Bild 6.2a), nach 1,8 Sekunden (Bild 6.2b) und nach 2,2 Sekunden (Bild 6.2c) Schweißzeit abgebildet. Es ist deutlich zu erkennen, dass im zentralen Bereich der Platte der Schweißprozess ca. 2 Sekunden später als in den Randbereichen beginnt. Das bedeutet, dass die Randbereiche einen deutlichen Vorsprung hinsichtlich der Energiezufuhr haben. Dieser Vorsprung kann auch durch die erhöhte Energieumsetzung infolge des höheren Fügedrucks nicht mehr aufgeholt werden. Die einzige Möglichkeit, lokale Schwachstellen zu vermeiden, ist ein gleichmäßiger Prozessstart über die komplette Schweißnahtlänge.

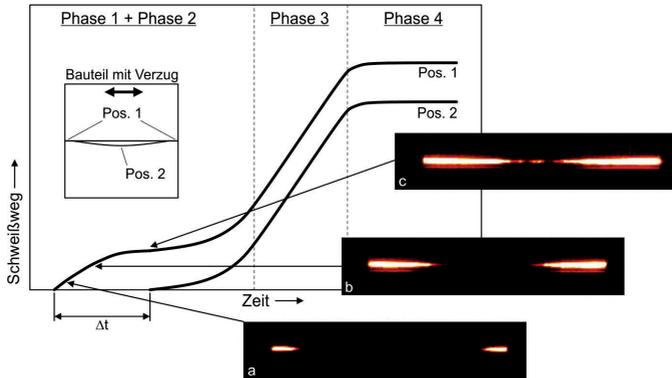


Bild 6.2: lokale Prozessverlaufskurven in Gegenwart von Bauteilverzug;

Neben Unebenheiten in der Fügeflächengeometrie führt auch eine schiefe Ausrichtung der Fügepartner bzw. der Aufnahmewerkzeuge zueinander zu den oben beschriebenen ungleichmäßigen Prozessbedingungen. Besonders kritisch ist dabei die hohe Empfindlichkeit des Prozesses schon auf geringste Höhenunterschiede. Für das untersuchte PP konnte bereits bei einem Kippwinkel von nur $0,02^\circ$ ein Festigkeitsgradient über die Schweißnahtlänge gemessen werden. Dieser Kippwinkel entspricht bei einem Bauteil von 1,5 m Länge, was beispielsweise beim Schweißen der Luftführung an die I-Tafel keine Seltenheit ist, einem Höhenunterschied zwischen den beiden äußeren Fügeflächenkanten von 0,5 mm. Eine so genaue Werkzeugausrichtung ist nur mit hohem technischen und zeitlichen Aufwand zu erreichen.

Ein weiterer, negativer Einfluss kann die Ausrichtung der Bauteilwände zur Schwingrichtung sein. Je nach Biegesteifigkeit und geometrischem Spiel im Aufnahmewerkzeug wird in Schweißnahtbereichen mit Querschwingungsanteil die effektive Amplitude durch Mitschwingen der Bauteilwand reduziert. Dies führt zu einem geringeren Energieeintrag im Vergleich zu Bereichen unter Längsschwingung. Die daraus resultierende geringere Prozessgeschwindigkeit führt ebenfalls zu einem Fügedruckgradienten mit höheren Fügedrücken in den Bereichen unter Querschwingung und geringeren Fügedrücken in den Bereichen unter Längsschwingung.

6.3 Übertragbarkeit der Ergebnisse auf industrielle Bauteile

Die Komplexität bei der Übertragung der Ergebnisse auf industrielle Bauteile liegt in der Summierung der in dieser Arbeit gezielt separierten, festigkeitsmindernden Einflussgrößen. Die Herausforderung liegt in der Ermittlung der Störfaktoren und deren gezielter Minimierung. Im Zentrum der Analyse sollte dabei die Phase der Feststoffreibung stehen. Das Ziel ist es, den Beginn und die Dauer der Phase 1 für alle Bereiche der Fügefläche aneinander anzugleichen. Eine sehr sichere und präzise Methode hierfür ist die Verwendung von IR-Kameras. Sie ermöglichen die Visualisierung der Wärmeentwicklung entlang der Schweißnaht. Voraussetzung ist jedoch die Zugänglichkeit / Sichtbarkeit der Fügeebene. Dies ist aufgrund der Verwendung von verdeckten Schweißnahtgeometrien bei industriellen Bauteilen in der Regel nicht gegeben. Die Verwendung von präparierten Bauteilen, bei denen die Abdeckung entfernt wurde, ist jedoch zu Einrichtzwecken vorstellbar. Des Weiteren ist zu beachten, dass bei Fügeteilen mit umlaufender Schweißnaht mindestens zwei synchronisierte IR-Kameras verwendet werden müssen, um die komplette Schweißnaht betrachten zu können.

Eine technisch einfachere, dafür zeitlich intensivere Methode ist die Durchführung von Anreibversuchen. Dabei werden Schweißversuche mit extrem kurzer Schweißzeit bzw. extrem geringem Fügeweg durchgeführt. Ziel ist nicht das Verbinden der Fügepartner, sondern die Ermittlung hervorstehender Schweißnahtbereiche. Um ein möglichst genaues Ergebnis zu erhalten, sollten die Versuche beim geringstmöglichen Fügedruck durchgeführt werden. Die Bauteile werden im Anschluss auseinandergerissen und die Stellen, in den bereits Grenzflächenreibung stattgefunden hat, ermittelt. So lassen sich Schiefstellung durch verkippte Aufnahmewerkzeuge und Abweichungen der Bauteilgeometrie ermitteln.

Sollte der Prozess auf einer Seite bzw. an einer Ecke des Bauteils beginnen, so muss die Neigung der Aufnahmewerkzeuge angepasst werden, bis mindestens zwei gegenüberliegende Bereiche der Fügefläche von Beginn an im Eingriff sind. Idealerweise sind die Aufnahmewerkzeuge segmentiert aufgebaut. So lassen sich auch Unebenheiten der Fügefläche infolge Bauteilverzugs durch Anheben bzw. Absenken der einzelnen Segmente ausgleichen.

Ist keine Optimierung des Wärme- bzw. Anreibbilds durch Justierung der Aufnahmewerkzeuge mehr möglich, sollte die Fügekraft schrittweise angehoben werden, bis ein gleichmäßiger Prozessstart realisiert werden kann. Der dafür benötigte Fügedruck sollte die für das Bauteil bestmöglichen Schweißnahteigenschaften bei Verwendung der klassischen Prozessführung liefern. Wird nach wie vor ein vergleichsweise hoher Fügedruck ($> 2 \text{ N/mm}^2$) zum Ausgleich des Bauteilverzugs benötigt, so sollte eine Anpassung der Spritzgießwerkzeuge in Betracht gezogen werden.

Zur Prozessüberwachung kann nach wie vor die Prozessverlaufskurve herangezogen werden. Diese wird bei den meisten Vibrationsschweißanlagen standardmäßig aufgezeichnet. Bei idealer Ausrichtung der Aufnahmewerkzeuge und der richtigen Wahl des Fügedrucks sollte diese den charakteristischen Verlauf haben (Bild 6.3). Die Phase der Feststoffreibung ist deutlich zu erkennen (0 s bis 1,1 s). Die Phase der instationären Schmelzebildung ist durch einen rein progressiven Anstieg der Prozessverlaufskurve gekennzeichnet (1,1 s bis 3,4 s). Es schließt sich die Phase der quasistationären Schmelzebildung an (3,4 s bis 5,6 s), welche erreicht werden muss, um reproduzierbare Schweißnahteigenschaften zu erreichen. Mit Erreichen des vorgegebenen Schweißweges bzw. der vorgegebenen Schweißzeit wird die Vibrationsbewegung abgebremst und es schließt sich die Abkühlphase an.

Werden jedoch durch innere oder äußere Prozesseinflüsse lokal unterschiedliche Prozessbedingungen verursacht, so werden diese auch in der Prozessverlaufskurve ersichtlich. Die Phase 1 ist kaum noch zu erkennen, da diese lokal zu unterschiedlichen Prozesszeiten stattfindet. In der globalen Messgröße Schweißweg schwimmt dies in der Phase 2. Diese verlängert sich dadurch. Des Weiteren ist die Verlaufskurve in Phase 2 nicht mehr durch einen rein progressiven Anstieg gekennzeichnet, sondern zeigt im ersten Teil aufgrund der Zunahme der Fügefläche und der damit einhergehenden Verringerung der Prozessgeschwindigkeit einen degressiven Anstieg (Bild 6.4).

Je stärker die Unterschiede der lokalen Prozessbedingungen werden, umso deutlicher ist dies in der Prozessverlaufskurve erkennbar. Der aus Bauteilverzug bzw. Schiefstellung der beiden Fügeteile resultierende Höhenunterschied kann über den degressiven Kurvenverlauf der Prozessverlaufskurve ermittelt werden. Bild 6.5 zeigt dies am Beispiel des Plattenprüfkörpers aus PA66-GF30 mit 0,5 mm Bauteilverzug. Der eingestellte Fügedruck von 1 N/mm² ist nicht hoch genug, um den Plattenprüfkörper zu deformieren und so den Verzug auszugleichen. Mit Beginn der Vibrationsbewegung zeigt die Prozessverlaufskurve einen degressiven Anstieg, bis ein Schweißweg von 0,5 mm erreicht wird. Erst jetzt ist die komplette Fügefläche in Kontakt. Trotz des Erreichens der Phase 3 bildet sich ein Festigkeitsgradient über die Schweißnahtlänge. Die lokale Schwachstelle bestimmt die Gesamtbauteilfestigkeit.

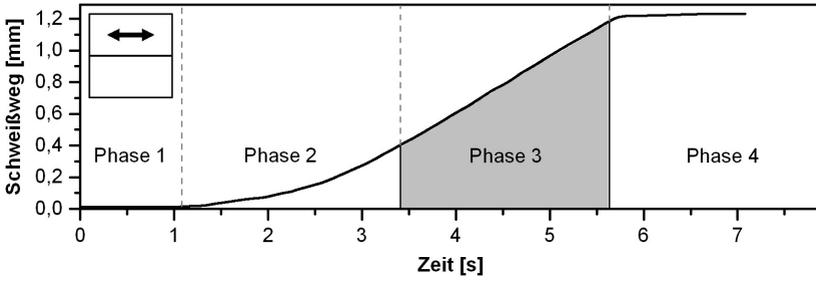


Bild 6.3: optimale Prozessverlaufskurve;
 Material: PA66-GF30; Verzug: ohne; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

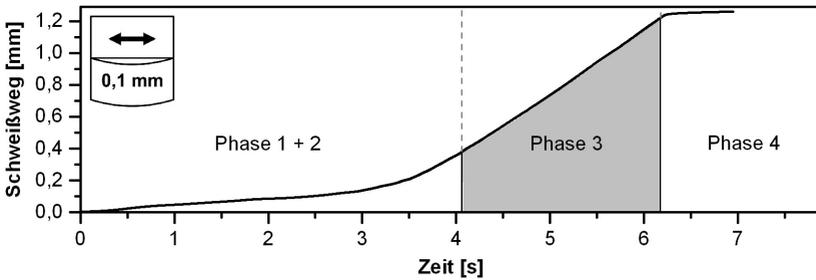


Bild 6.4: Prozessverlaufskurve bei geringem Bauteilverzug;
 Material: PA66-GF30; Verzug: 0,1 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

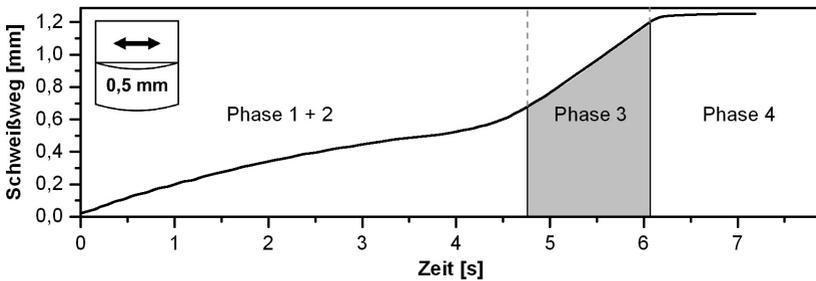


Bild 6.5: Prozessverlaufskurve bei hohem Bauteilverzug;
 Material: PA66-GF30; Verzug: 0,5 mm; Schwingrichtung: linear längs;
 Fügedruck: 1 N/mm²; Amplitude: 0,9 mm; Schweißweg: 1,2 mm;

6.4 alternative Prozessführungsmethoden

Am Beispiel des Hochdruckanfahrens und der Bauteilvorwärmung wurden zwei Möglichkeiten aufgezeigt, um lokale Schwachstellen trotz ungünstiger Bauteilgeometrien zu reduzieren und somit höhere Gesamtbauteilfestigkeiten zu erreichen. Beide Methoden erzielen einen, im Vergleich zur konventionellen Prozessführung, homogeneren Prozessverlauf über die Schweißnahtlänge.

Beim Hochdruckanfahren wird die Fügefläche aufgrund der hohen Anpresskraft zwangsweise in Kontakt gebracht. Der Prozess kann über die komplette Schweißnahtlänge gleichmäßig starten. Nach dem Abschweißen eines definierten Angleichwegs wird auf einen möglichst geringen Fügedruck abgesenkt, um hohe mechanische Eigenschaften zu erzielen. Diese Methode scheint für die industrielle Serienfertigung besonders geeignet zu sein, da neben den besseren mechanischen Eigenschaften auch kürzere oder zumindest gleiche Prozesszeiten erzielt werden. Die Prozesssicherheit hängt jedoch von der Reproduzierbarkeit der Fügedruckschaltung der Anlagentechnik ab.

Die gezeigte Gesamtbauteilvorwärmung ist dagegen für die Serienfertigung ungeeignet. Zumal die Vorwärmung des gesamten Bauteils aus energetischer Sicht nicht sinnvoll ist, da die Wärmeenergie nur im Bereich der Fügefläche benötigt wird. Effizienter ist hier die lokale Vorwärmung durch Warmgas oder Infrarot-Strahler. Eine Erwärmung der Fügefläche bis zum Schmelztemperaturbereich ist mit diesen Systemen in wenigen Sekunden realisierbar. Des Weiteren wird der Vibrationsschweißprozess mit vorgeschalteter IR-Vorwärmung bereits in der Serienfertigung eingesetzt, um die Fusselbildung in der Phase der Feststoffreibung zu reduzieren. Prinzipiell wird dabei der gleiche Ansatz verfolgt, wie er für die Reduzierung der lokalen Schwachstellen notwendig wäre. Durch die Vorwärmung mit den IR-Strahlern soll die Phase der Feststoffreibung verkürzt werden. Die Nachteile dieser Prozessmodifikation gegenüber dem Hochdruckanfahren sind die deutliche Verlängerung der Gesamtzykluszeit durch den vorgeschalteten Erwärmprozess und die höheren Kosten der Anlagentechnik für die Strahlersysteme samt Regelungstechnik.

7 Zusammenfassung

Das Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung der Einflüsse der Geometrieschwankungen industriell gefertigter Spritzgussbauteile auf den Prozessverlauf und die mechanischen Schweißnahteigenschaften beim linearen Vibrationsschweißen.

Es konnte gezeigt werden, dass für unverstärkte Werkstoffe unter optimalen Prozessvoraussetzungen und bei richtiger Wahl der Schweißparameter Schweißnahtfestigkeiten auf Grundmaterialniveau erreicht werden können. Da das Erreichen optimaler Prozessvoraussetzungen nur unter Laborbedingungen möglich ist, wurden anhand eines Plattenprüfkörpers industrielle Randbedingungen nachgestellt und hinsichtlich ihrer Einflüsse auf den Prozessverlauf untersucht. Dabei konnten drei wesentliche geometrische Einflussgrößen identifiziert werden, welche den Prozess negativ beeinflussen.

Die Verwendung ungleicher Wandstärken führt besonders unter Querschwingung zu einem ungleichmäßigen Aufschmelzen der beiden Fügepartner. Aufgrund des geringeren Materialvolumens, welches erwärmt und aufgeschmolzen werden muss, und des geringeren Wärmetransportes im Fügepartner mit der geringeren Wandstärke durchläuft dieser die einzelnen Prozessphasen schneller als der Fügepartner mit der höheren Wandstärke. Dies führt zu einer unsymmetrischen Schweißnaht mit ungünstigen Fließbedingungen. Der Effekt wird zum einen durch die Geschwindigkeit der Energieeinbringung beeinflusst. Je langsamer die Energieeinbringung, z. B. durch Verringerung der Amplitude oder des Fügedrucks, ist, desto ungleichmäßiger ist die Schmelzeerzeugung. Zum anderen wird der Effekt um so stärker, je größer der Wanddickenunterschied ist. Daraus resultiert ein Festigkeitsverlust, welcher durch die Verwendung gleicher Wandstärken vermieden werden kann.

Anhand der Versuche mit Bauteilverzug und schief ausgerichteten Bauteilen wurde gezeigt, dass Unebenheiten in den Fügeflächen bei niedrigen Fügedrücken zu lokal unterschiedlichen Prozessbedingungen führen. Generell gilt, dass hervorstehende Bereiche, welche zuerst in Kontakt mit dem Fügepartner stehen, höhere Festigkeiten zeigen als zurückliegende Bereiche, welche erst nach längerer Prozessdauer in Kontakt mit dem Fügepartner kommen. Die daraus resultierenden lokalen Schwachstellen dominieren die Gesamtbauteilfestigkeit. Werden hingegen hohe Fügedrücke verwendet, welche durch Deformation der Fügepartner einen vollständigen Kontakt der Fügeflächen herstellen, wird eine homogene Festigkeitsverteilung über die Schweißnahtlänge erreicht. Hierbei werden jedoch ungünstige Eigenspannungszustände infolge der Bauteildeformation verursacht, welche bei spannungsrissempfindlichen Werkstoffen kritisch sind.

Die Versuche mit Variation der Schwingrichtung haben gezeigt, dass unter Querschwingung durch Mitschwingen der Bauteilwand infolge von Biegung oder Spiel im Aufnahmewerkzeug die effektiv wirkende Amplitude maßgeblich verringert wird. Dadurch wird die Prozessgeschwindigkeit unter Querschwingung reduziert. Ein solcher Effekt konnte in den Bereichen unter Längsschwingung nicht festgestellt werden. Demnach werden sich die Prozessgeschwindigkeiten in Abhängigkeit der Schwingrichtung über die umlaufende Schweißnaht unterscheiden. Dabei bremsen die Bereiche mit geringster effektiver Amplitude den Prozess ab und werden folglich mit einem höheren Fügedruck beaufschlagt. Dies wirkt sich negativ auf die lokalen mechanischen Eigenschaften in diesen Bereichen aus.

Die ermittelten festigkeitsreduzierenden Effekte sind auf einen lokal ungleichmäßigen Beginn oder eine lokal unterschiedliche Dauer der Phase 1 des Vibrationsschweißprozesses zurückzuführen. Der bisherige Erkenntnisstand, dass alleinig das Erreichen der Phase 3 zu reproduzierbaren Schweißnahteigenschaften führt, kann somit für industriell gefertigte Bauteile nicht bestätigt werden. Diese Aussage gilt nur, wenn eine über die Schweißnahtlänge identische Prozessphase 1 gewährleistet ist. Eine Aussage dazu kann nach wie vor an der Weg-Zeit-Verlaufskurve getroffen werden. Im Falle ungleichmäßiger Prozessbedingungen verschwindet der charakteristische progressive Kurvenverlauf in der Phase 2, da diese zum Teil mit der Phase 1 verschmilzt. Je unterschiedlicher die Prozessbedingungen über die Schweißnahtlänge sind, desto deutlicher zeigt der Kurvenverlauf in Phase 2 einen degressiven Anstieg. Ausgeprägte lokale Schwachstellen sind in Abhängigkeit der Drucksensibilität des Werkstoffs zu erwarten.

Mit der Prozessführung des Hochdruckanfahrens und der Bauteilvorwärmung wurden zwei Möglichkeiten aufgezeigt, die lokalen Prozessbedingungen über die Schweißnahtlänge aneinander anzugleichen und somit die Gesamtbauteileigenschaften zu verbessern. Diese Maßnahmen sollten jedoch das letzte Mittel sein, um ein Bauteil in der benötigten Qualität zu produzieren. Alle aufgezeigten Ursachen für die Verringerung der Schweißnahtqualität beim konventionellen linearen Vibrationsschweißen sind auf Fehler in der Bauteil- bzw. Werkzeugkonstruktion oder auf die Prozessschwankungen der vorausgehenden, formgebenden Verarbeitungsprozesse zurückzuführen. Eine Optimierung in diesen Bereichen kann ebenfalls eine deutliche Qualitätsverbesserung des Schweißprozesses mit sich bringen.

Literaturverzeichnis

- [BBOS07] BAUER, E. ; BRINKMANN, S. ; OSSWALD, T. A. ; SCHMACHTENBERG, E.: *Saechtling Kunststoff-Taschenbuch*. 30. Ausgabe. München : Carl Hanser Verlag, 2007
- [Bon98] BONTEN, C.: *Beitrag zur Erklärung des Wirkmechanismus in Schweissverbindungen aus teilkristallinen Thermoplasten*, Universität Essen, Diss., 1998
- [DIN03] DIN: *DIN 8580 - Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin, 2003
- [DVS85] DVS: *DVS Richtlinie 2203-2: Prüfen von Schweißverbindungen aus thermoplastischen Kunststoffen - Zugversuch*. Stand: Juli 1985
- [DVS02] DVS: *DVS-Richtlinie 2217, Teil 2: Vibrationsschweißen von Formteilen und Halbzeugen aus thermoplastischen Kunststoffen in der Serienfertigung; Formteile aus Polyamid*. Stand: Dezember 2002
- [EG89] EHRENSTEIN, G. W. ; GIESE, M.: *Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben Nr. 7330 "Das Verhalten von Vibrationsschweißnähten bei statischer, dynamischer und stoßartiger Beanspruchung"*. Kassel, 1989
- [Ege86] EGEN, U.: *Gefügestruktur in Heizelementschweißnähten an Polypropylen-Rohren*. Kassel, Universität-GH Kassel, Diss., 1986
- [Ehr04] EHRENSTEIN, G. W.: *Handbuch der Kunststoffverbindungstechnik*. München : Carl Hanser Verlag, 2004
- [EK06] EHRENSTEIN, G. W. ; KÜNKEL, R.: Strukturbildung in der Schweißnaht beim Vibrationsschweißen. In: *Schweißen und Schneiden* 58 (2006), Nr. 7, S. 345–349
- [EKG05] EHRENSTEIN, G. W. ; KÜNKEL, R. ; GEHDE, M.: *Abschlussbericht zum AiF-Projekt Nr. 13.512N "Bemessungskennwerte für die Verbindungsauslegung und werkstoff- / prozessabhängige Nahteigenschaften beim Vibrationsschweißen verstärkter Thermoplaste"*. Erlangen, 2005
- [Erh80] ERHARD, G.: *Zum Reibungs- und Verschleißverhalten von Polymerwerkstoffen*. Karlsruhe, Universität Karlsruhe, Diss., 1980
- [Gab81] GABLER, K.: Beurteilung der Schweißbarkeit unterschiedlicher Thermoplaste im Hinblick auf das Heizelementstumpfschweißen. In: *Adhäsion* (1981), Nr. 2, S. 108–115

- [Geh93] GEHDE, M.: *Zum Extrusionsschweißen von Polypropylen*, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss., 1993
- [Geh06a] GEHDE, M.: Schweißverfahren für WPC. In: *Tagungsband 6th Global Wood and Natural Fibre Composites*. Kassel, 5.-6.04.2006
- [Geh06b] GEHDE, M.: Neue Erkenntnisse zum Vibrationsschweißen. In: *Tagungsband Schweißen in der Serienfertigung des SKZ*. Würzburg, 9.-10.05.2006
- [Geh07] GEHDE, M.: Qualitätsanforderungen in Schweiß- und Fügeprozessen. In: *Tagungsband BMBF des KuZ Innovationsforums*. Leipzig, 25.-26.01.2007
- [Gie92] GIESE, M.: Vibration Welding of Random Glass Mat Reinforced Thermoplastic Composites. In: *Tagungsband zur Annual Technical Conference der Society of Plastics Engineers*. Detroit, USA, 3.-7.05.1992, S. 884–887
- [Gie95] GIESE, M.: *Fertigungs- und werkstofftechnische Betrachtungen zum Vibrationsschweißen von Polymerwerkstoffen*. Erlangen-Tennenlohe, Univ. Erlangen-Nürnberg, Diss., 1995
- [Kae71] KAEUBLE, D. H.: *Physical Chemistry of Adhesion*. New York : Wiley-Interscience, 1971
- [Kai92] KAISER, H.: *Prozessanalyse und Prozessführung beim linearen Vibrationsschweißen von Kunststoffen*, Universität Paderborn, Diss., 1992
- [KEK04] KURIYKOV, Y. V. ; EHRENSTEIN, G. W. ; KÜNKEL, R.: Vibrationsschweißen mit Infrarotvorwärmung. In: *Der Praktiker* 56 (2004), Nr. 12, S. 372–373
- [KGE05] KLEINERT, R. ; GEHDE, M. ; EHRENSTEIN, G. W.: *Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt "Ganzheitliche Materialkonzepte und Systemlösungen für Mechatronic-Anwendungen"*. Berlin, 2005
- [KKE05] KURIYKOV, Y. V. ; KÜNKEL, R. ; EHRENSTEIN, G. W.: Vibrationsschweißen - Die entscheidende Sekunde für die Schweißnahtqualität. In: *Schweißen und Schneiden* 57 (2005), Nr. 10, S. 569–574
- [Mic06] MICHAELI, W.: *Einführung in die Kunststoffverarbeitung*. München : Carl Hanser Verlag, 2006
- [Nat11] NATROP, J.: *Persönliche Mitteilung*. 08.02.2011
- [N.N14a] N.N.: *Vibrationsschweißanlage mit IR-Vorwärmung, Internetauftritt der Firma Bielomatik*. 19.03.2014.
- [N.N14b] N.N.: *Vibrationsschweißanlage mit IR-Vorwärmung, Internetauftritt der Firma Branson*. 19.03.2014

-
- [N.N14c] N.N.: *Vibrationsschweißanlage mit IR-Vorwärmung, Internetauftritt der Firma KLN*. 19.03.2014
- [Pie75] PIESCHEL, D.: *Untersuchungen zur Optimierung der Wärmekontaktschweißverfahren für Plastomere (Heizelementschweißen - Wärmeimpulsschweißen)*, RWTH Aachen, Diss., 1975
- [PMR87] POTENTE, H. ; MICHEL, P. ; RUTHMANN, B.: Eine Analyse des Vibrationsschweißens. In: *Kunststoffe 77* (1987), Nr. 7, S. 711–716
- [PNPU93] POTENTE, H. ; NATROP, H. ; PEDERSON, T. K. ; UEBBING, M.: Vergleichende Untersuchungen beim Schweißen von glasfaserverstärktem PES. In: *Plastverarbeiter 44* (1993), Nr. 6, S. 26–33
- [Pot77] POTENTE, H.: Zur Theorie des Heizelement-Stumpfschweißens. In: *Kunststoffe 67* (1977), Nr. 2, S. 98–102
- [Pot04] POTENTE, H.: *Fügen von Kunststoffen*. München : Carl Hanser Verlag, 2004
- [PU93a] POTENTE, H. ; UEBBING, M.: Energieumwandlung beim Vibrationsschweißen. In: *Schweißen und Schneiden 45* (1993), Nr. 8, S. 415–419
- [PU93b] POTENTE, H. ; UEBBING, M.: Vibration Welding of High Temperature Plastics. In: *Tagungsband zur Annual Technical Conference der Society of Plastics Engineers*. New Orleans, USA, 9.-13.05.1993, S. 2075–2081
- [PU97] POTENTE, H. ; UEBBING, M.: Friction welding of polyamides. In: *Polymer Engineering & Science 37* (1997), Nr. 4, S. 726–737
- [Sch89] SCHLARB, A. K.: *Zum Vibrationsschweißen von Polymerwerkstoffen. Prozess-Struktur- Eigenschaften*. Kassel, Universität-GH Kassel, Diss., 1989
- [SE89] SCHLARB, A. K. ; EHRENSTEIN, G. W.: The impact strength of butt welded vibration welds related to microstructure and welding history. In: *Polymer Engineering and Science 29* (1989), Nr. 23, S. 1677–1682
- [Sto88a] STOKES, V. K.: Vibration welding of thermoplastics. Part I: Phenomenology of the welding process. In: *Polymer Engineering and Science 28* (1988), Nr. 11, S. 718–727
- [Sto88b] STOKES, V. K.: Vibration welding of thermoplastics. Part II: Analysis of the welding process. In: *Polymer Engineering and Science 28* (1988), Nr. 11, S. 728–739
- [Sto88c] STOKES, V. K.: Vibration welding of thermoplastics. Part III: Strength of polycarbonate butt welds. In: *Polymer Engineering and Science 28* (1988), Nr. 15, S. 989–997
-

- [Sto88d] STOKES, V. K.: Vibration welding of thermoplastics. Part IV: Strengths of poly(butylene terephthalate), polyetherimide, and modified polyphenylene oxide butt welds. In: *Polymer Engineering and Science* 28 (1988), Nr. 15, S. 998–1008
- [Sto89a] STOKES, V. K.: Thickness effects in the vibration welding of polycarbonate. In: *Polymer Engineering and Science* 29 (1989), Nr. 23, S. 1683–1688
- [Sto89b] STOKES, V. K.: Thickness Effects in the Vibration Welding of Polycarbonate. In: *Tagungsband zur Annual Technical Conference der Society of Plastics Engineers*. New York, USA, 1.-4.05.1989, S. 479–481
- [Sto90] STOKES, V. K.: Strength of Glass-Filled Modified Polyphenylene Oxide Vibration Welded Butt Joints. In: *Tagungsband zur Annual Technical Conference der Society of Plastics Engineers*. Dallas, USA, 7.-11.05.1990, S. 1758–1761
- [Sto91] STOKES, V. K.: Strength of Vibration Welded Modified Polyphenylene Oxide Structural Foam Butt Joints. In: *Tagungsband zur Annual Technical Conference der Society of Plastics Engineers*. Montreal, USA, 1991, S. 2482–2485
- [Tüc05] TÜCHERT, C.: *Einfluss der inneren Eigenschaften von Schweißverbindungen auf die langzeitige Schweißnahtgüte*. Aachen, RWTH Aachen, Diss., 2005
- [Vet11] VETTER, J.: *Persönliche Mitteilung*. 08.02.2011
- [Voy63] VOYUTSKII, S. S.: *Autohesion and Adhesion of High Polymers*. New York : Interscience Publishers, 1963

