

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern

Georg Völlner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Wilden,
Technische Universität Berlin

Die Dissertation wurde am 26.05.2009 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 05.10.2009 angenommen.

Georg Völlner

**Rührreibschweißen
mit Schwerlast-Industrierobotern**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 235

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2009

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere
die der Übersetzung, des Nachdrucks, der
Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe
auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege
und der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser
Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2010

ISBN 978-3-8316-0955-0

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwenden in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Ich möchte an dieser Stelle Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, dem Leiter des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der Technischen Universität München, für die Möglichkeit zur Promotion und die Betreuung meiner Arbeit danken. Mein Dank gilt auch meinem Zweitprüfer, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Wilden. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, dem Leiter des Lehrstuhls für Betriebswissenschaften und Montagetechnik der Technischen Universität München, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates sehr herzlich bedanken.

Für die zahlreichen aufheiternden und fruchtbaren Diskussionen zum und neben dem Thema sowie für die Korrektur der schriftlichen Arbeit möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen, die mir auf diesem Wege geholfen haben, herzlichst danken. Darüber hinaus möchte ich mich insbesondere bei den Mitarbeitern der EADS Deutschland GmbH für die hervorragende Zusammenarbeit und die Bereitstellung der Schweißanlage bedanken.

München, im November 2009

Georg Völlner

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Anwendungen des Rührreibschweißens	1
1.3 Motivation	6
1.4 Ziel der Arbeit	6
1.5 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise	7
2 Grundlagen	9
2.1 Allgemeines	9
2.2 Schweißprozess	9
2.2.1 Ablauf	9
2.2.2 Parameter	11
2.2.3 Schweißnahtzonen	13
2.2.4 Vorteile des Verfahrens	14
2.2.5 Nachteile des Verfahrens	15
2.3 Prüfung von Schweißverbindungen	16
2.3.1 Zugversuch	16
2.3.2 Biegeprüfung	19
2.3.3 Schweißnahtmerkmale	20
2.3.4 Härtemessung	22
2.4 Industrieroboter	23
2.4.1 Aufbau	24
2.4.2 Bewegungsplanung eines Roboters	25
2.4.3 Steifigkeiten im Raum	27
3 Stand der Technik	29
3.1 Allgemeines	29

3.2	FSW-Anlagen	29
3.2.1	Spezialanlagen	30
3.2.2	CNC-Maschinen	32
3.2.3	Tripoden	34
3.2.4	Knickarmroboter	35
3.3	Werkzeugentwicklung für Roboter	37
3.4	Zusammenfassung und Handlungsbedarf	42
4	Experimenteller Aufbau	45
4.1	Allgemeines	45
4.2	Schwerlastroboter	45
4.3	Spindel	48
4.4	Kraftregelung	48
4.5	Umgebung	49
4.6	Verwendete Werkzeuge	49
5	Einfluss der Anlagentechnik auf den Schweißprozess	51
5.1	Allgemeines	51
5.2	Schweißen mit hohen Drehzahlen	51
5.2.1	Versuchsbedingungen	51
5.2.2	Versuchsdurchführung	55
5.2.3	Auswertung der Versuche	57
5.3	Schweißen mit niedrigen Drehzahlen	78
5.3.1	Vorbemerkung	78
5.3.2	Versuchsplanung	78
5.3.3	Ergebnisse	80
5.4	Schlussfolgerungen zur Anlagenfähigkeit	90
5.4.1	Anwendungsbereich des Roboters	90
5.4.2	Qualität der erzeugten Schweißnähte	91
5.4.3	Kraft-/Positionsregelung	92

5.4.4	Systemverhalten beim Eintauchen und Schweißen	92
5.4.5	Auswirkungen der Prozesskräfte auf die elastische Strukturverformung des Roboters	94
6	Schweißen enger Radien mit einem Roboter	97
6.1	Allgemeines	97
6.2	Übergang von ebenem zu konvexem Schweißnahtverlauf	98
6.2.1	Kontakt des Werkzeuges auf der Fügeteiloberseite	98
6.2.2	Resultierende Nahtformen	100
6.2.3	Wärmetransport in die Spannvorrichtung	102
6.2.4	Mögliche resultierende Nahtmerkmale	103
6.3	Erwarteter Einfluss des Roboters	105
6.4	Abhilfestrategien	106
6.4.1	Variation des Anstellwinkels über dem Radius	106
6.4.2	Änderung der programmierten Bahn	110
6.4.3	Optimierung der Schultergeometrie	111
6.5	Modellbildung und Simulation des Schweißvorganges	114
6.5.1	Zweck des Modells	114
6.5.2	Aufbau des Modells	115
6.5.3	Ideal steifes System	115
6.5.4	Nachgiebigkeitsbehaftetes System	125
6.6	Versuchsbedingungen	128
6.7	Versuchsdurchführung	131
6.7.1	Vorgehen	131
6.7.2	Erfassung der realen Roboterbahn	131
6.7.3	Einstellung der grundlegenden Prozessparameter	133
6.7.4	Referenzversuche ohne Anpassungen	135
6.7.5	Variation der Schweißstrategie	136
6.7.6	Variation des Werkzeuges	144

6.8	Schlussfolgerungen	145
6.8.1	Gültigkeit für andere Schweißnahtgeometrien	145
6.8.2	Veränderung der Schweißbahn	146
6.8.3	Einfluss der Spanntechnik	148
6.8.4	Werkzeuggestaltung	148
6.8.5	Konstruktion der Fugestelle	149
6.8.6	Belastungen des Roboters	150
7	Zusammenfassung und Ausblick	151
7.1	Zusammenfassung	151
7.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	154
7.3	Ausblick	154
8	Literaturverzeichnis	159
9	Abbildungsverzeichnis	179
10	Tabellenverzeichnis	186
Anhang		187
A1	Werkzeugzeichnungen	187
A2	Legierungszusammensetzungen der geschweißten Werkstoffe	191
A3	Ergebnisse der Kraftmessungen	192
A4	Ergebnisse der Zugversuche	194
A5	Berechnete Roboterbelastungen	195

Abkürzungs- und Formelzeichenverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
6D	sechsdimensional (drei tanslatorische, drei rotatorische Freiheitsgrade)
A1 ... A6	Achsen eines Roboters inclusive deren Durchnummerierung
AG	Aktiengesellschaft
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CIRC	Zirkularbewegung des TCP
Corp.	Corporation
DIN	Deutsches Institut für Normung
DMS	Dehnungsmessstreifen
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V.
EN	Euronorm
e. V.	eingetragener Verein
Fa.	Firma
f./ff.	und folgende (Singular/Plural)
FFT	Fast Fourier Transformation
FSW	Friction Stir Welding (engl.: Rührreibschweißen)
ggf.	gegebenenfalls
GW	Grundwerkstoff
HV	Vickers-Härte

Abkürzung	Bedeutung
ISO	International Organization for Standardization
IPM	Integrated process monitoring
kg	Kilogramm
kmU	kleine und mittelständische Unternehmen
KOS	Koordinatensystem
LIN	Linearbewegung des TCP
Mio.	Millionen
o. ä.	oder ähnliche
o. Jg.	ohne Jahrgang
PA	Schweißlage „Wannenposition“ nach DIN EN ISO 6947
PC	Schweißlage „Querposition“ nach DIN EN ISO 6947
PKW	Personenkraftwagen
PTP	point-to-point (Bewegungsart eines Roboters, achsbezogen)
s.	siehe
TCP	tool center point (engl.: Werkzeugbezugspunkt)
TMZ	Thermomechanisch beeinflusste Zone
TWI	The Welding Institute
u. a.	unter anderem
u. U.	unter Umständen
v. a.	vor allem
vgl.	vergleiche
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WEZ	Wärmeeinflusszone

Abkürzung	Bedeutung
z. B.	zum Beispiel

Variable	Einheit	Bedeutung
A	%	Bruchdehnung
C_{ax}	N/mm	Steifigkeit in axialer Richtung
C_{tang}	N/mm	Steifigkeit in tangentialer Richtung zur Schweißbahn
E	N/mm ²	Elastizitätsmodul
E^S	J/m	Streckenenergie
d_P	mm	Durchmesser des Werkzeugpins
d_S	mm	Durchmesser der Werkzeugschulter
$d_{ü}$	mm	Überschleifdistanz
$F_{Prüf}$	N	Prüfkraft
F_w	N	Prozesskraftkomponente in Axialrichtung des Werkzeuges (Anpresskraft)
$F_{w, R}$	N	Prozesskraft im Bereich des Radius
F_x	N	Prozesskraftkomponente in Schweißrichtung
F_y	N	Prozesskraftkomponente quer zur Schweißrichtung
F_z	N	Prozesskraftkomponente senkrecht zur Bauteiloberfläche
h	mm	reale Eintauchtiefe des Werkzeuges
h'	mm	programmierte Eintauchtiefe des Werkzeuges
k_w	mm	Korrekturweg in Werkzeugaxialrichtung
l_P	mm	Länge des Werkzeugpins
M_w	Nm	Drehmoment um das FSW-Werkzeug
M_x	Nm	Drehmoment um die x-Achse
M_{xy}	Nm	Betrag der Drehmomente, die aus M_x und M_y resultieren

Variable	Einheit	Bedeutung
M_y	Nm	Drehmoment um die y-Achse
M_z	Nm	Drehmoment um die z-Achse
n	min^{-1}	Werkzeugdrehzahl
r_a	mm	Außenradius einer gekrümmten Oberfläche
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
r_S	mm	Radius der Werkzeugschulter
r_P	mm	Radius des Werkzeugpins
$R_{p0,2}$	N/mm^2	0,2 %-Dehngrenze
r_{prog}	mm	Programmierter Werkstückradius
s	mm	Weg
t	s	Verweildauer des rotierenden Werkzeuges auf den Fügepartnern nach dem Eintauchen des Werkzeuges
\vec{T}	mm	Tangentenvektor
V	mm	Verzögerung der Umschwenkbewegung (örtlich)
\vec{V}	mm	Verschiebung, Vektor aus den Komponenten V_x und V_z
V_{tang}	mm	zur Schweißkontur tangentialer Anteil der Verschiebung \vec{V}
V_x	mm	Verschiebung der Schweißbahn in horizontaler Richtung
V_z	mm	Verschiebung der Schweißbahn in vertikaler Richtung
v	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
v_{prog}	mm/min	Programmierte Vorschubgeschwindigkeit
x, y, z	mm	kartesische Koordinaten

Variable	Einheit	Bedeutung
α	°	Anstellwinkel (stechend) des Werkzeuges zur Werkstücknormalen gegen die Schweißrichtung
α_B	°	Biegewinkel
α_{real}	°	realer Anstellwinkel (stechend) des Werkzeuges
α_{soll}	°	Sollwert für den Anstellwinkel über dem Radius
φ	-	Drehwinkel
μ	-	Reibungskoeffizient
τ	N/mm ²	Scherspannung
Ω	s ⁻¹	Winkelgeschwindigkeit

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Der moderne Leichtbau findet seinen Anfang in der Entwicklung neuer Werkstoffe und Legierungen, welche sich durch höhere mechanische Belastbarkeiten bei gleichzeitig geringerem spezifischen Gewicht auszeichnen. Diese Werkstoffentwicklungen führen insbesondere bei metallischen Werkstoffen wie Aluminium zu einer immer schlechteren Schweißbarkeit mittels konventioneller Schmelzschweißverfahren. Das grundlegende Problem ist hierbei oft die Anfälligkeit der Werkstoffe für Poren oder Heißrisse, die sich während des Wiedererstarrungsprozesses aus der verflüssigten Schmelze ergeben (DILTNEY 2005, S. 233 f.; KAMMER ET AL. 2003, S. 198 ff.). Ein Schweißverfahren, welches neben vielen weiteren Vorteilen (s. Abschnitt 2.2.4) diese Problematik umgeht und somit fähig ist, auch als nicht schweißbar geltende Werkstoffe stoffschlüssig zu verbinden, ist das Rührreibschweißen (engl.: *Friction Stir Welding* – FSW). Es wurde 1991 vom Forschungsinstitut „The Welding Institute“ (TWI) in Großbritannien zum Patent angemeldet (SCHUTZRECHT WO9310935), im darauf folgenden Jahr wurde das Patent erteilt. Einige Jahre später (1994, erteilt 1995) wurde dieses Basispatent von der Firma Norsk Hydro durch ein zusätzliches erweitert (SCHUTZRECHT WO9526254), welches einen speziellen Materialfluss während des Schweißprozesses definiert. Infolge intensiver Forschungsarbeiten, die weltweit durchgeführt werden, sind seit der Erfindung des Prozesses mehr als 1300 weitere Patente entstanden (TWI 2009), wovon viele jedoch infolge einer Anmeldung in unterschiedlichen Ländern mehrmals aufgeführt sind. Die große Anzahl der angemeldeten Patente zeugt in beeindruckender Weise vom Potential des Verfahrens und dem Interesse seitens der Industrie. Die Patente erstrecken sich vor allem über unterschiedliche Möglichkeiten der Verbindungsgeometrien sowie der Werkzeug- und Maschinenentwicklungen. Nicht zuletzt findet das Verfahren mittlerweile auch in Form eines Entwurfes den Weg in das internationale Normensystem (PRDIN EN ISO 25239).

1.2 Anwendungen des Rührreibschweißens

Schiffbau

Eine erste Anwendung fand das FSW-Verfahren bereits 1995 im Schiffbau. Treibende Kraft war hierbei die Entwicklung von Fährschiffen (MIDLING ET AL.

1999), welche sich in der neuen Generation durch ein geringeres Gesamtgewicht bei gleichzeitig reduzierten Produktionskosten und Fertigungszeiten auszeichnen sollten. Darüber hinaus war es Ziel, deren Effizienz durch eine erhöhte Ladekapazität weiter zu steigern. Diese Anforderungen konnten durch das Vorfertigen von großen Aluminiumpaneelen erfüllt werden, die in 16 m langen Bahnen aus schmalen, stranggepressten Aluminium-Hohlprofilen mittels FSW gefügt wurden. Die Einschweißtiefe betrug bei diesen Anwendungen wenige Millimeter.

Luft- und Raumfahrt

Auch die Luft- und Raumfahrtindustrie profitiert bereits in vielfältiger Weise von den Vorteilen des Rührreibschweißens, wenngleich die Anforderungen an die Schweißnähte teilweise unterschiedlich sind: Allen gemeinsam ist die Ersparnis von Masse sowie bessere mechanische Eigenschaften der Schweißverbindungen, verglichen mit konventionellen Fügemethoden wie dem Nieten. Dies betrifft sowohl statische (TWEEDY ET AL. 2006) als auch dynamische (LOHWASSER 2002) Eigenschaften. Die Anforderungen der Raumfahrt an die Verbindungen beziehen sich jedoch auf kurzzeitige, hohe Belastungen mit starken Vibrationen, um Trägerraketen und deren Nutzlasten sicher in das Weltall befördern zu können. Als erfolgreiche Anwendungen sind beispielsweise die DELTA-Raketen der Firma Boeing zu nennen (KALLEE ET AL. 2002; KALLEE ET AL. 2003). Durch die Umstellung von Nieten auf Rührreibschweißen der Treibstofftanks konnten hier Kostenreduktionen von 60 % sowie eine Verkürzung der Produktionszeit von 23 auf sechs Tage erreicht werden (ESAB 2005). Des Weiteren werden durch die Anwendung des FSW Nahteigenschaften erzielt, die um bis zu 50 % besser sind als die bislang eingesetzter Fügetechniken (NASA 2002). Ähnliche Erfolge konnten indes auch bei weiteren Anwendungen der Raumfahrt erzielt werden, wie beispielsweise dem Rahmen des Ariane 5-Haupttriebwerks (BROOKER ET AL. 2000), an dem Überlappverbindungen mit einer Einschweißtiefe von 2,4 mm erfolgreich hergestellt werden konnten. Weitere Beispiele bieten außerdem der Treibstofftank des Space Shuttle (BMP 2002) mit zugehörigen Domen (NCAM 2004; Abbildung 1) oder der japanischen H-IIB-Trägerrakete (GOTO ET AL. 2005). Vor allem die Fertigung der großen Tankstrukturen erfordert die Herstellung langer, gerader Nähte sowie Orbitalschweißnähte. Die hierfür aufgebauten Schweißmaschinen wurden in der Regel speziell für diese Zwecke aufgebaut und erfüllen somit alle notwendigen Anforderungen des Prozesses und der Bauteilgeometrie.

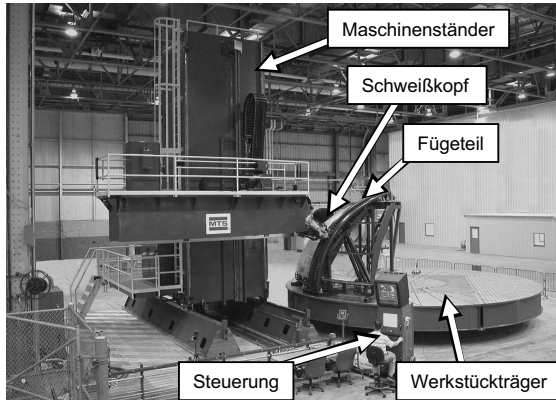


Abbildung 1: Universal Welding System (UWS) zur Fertigung von Tankdomen (NCAM 2004)

Im Bereich der Luftfahrt hingegen sind die Produktlebenszyklen bedeutend länger. Bei kalkulierten Lebensdauern der Flugzeuge von ca. 30 Jahren müssen neben einer schadenstoleranten Bauweise auch umgebungsbedingte Einflüsse wie Korrosion der Verbindungen besonders berücksichtigt werden. Der Business-Jet „Eclipse 500“ stellt hier einen Meilenstein der Verfahrensanwendung in diesem Industriezweig dar. Die Firma Eclipse Aviation investierte zu diesem Zweck etwa 20 Mio. US-\$, wovon ca. ein Drittel für die portalbasierte Anlagentechnik (Abbildung 2) und der Rest für die Prozessentwicklung aufgebracht wurde (BCA 2005, S. 5). Durch diese Entwicklungsarbeit werden neben weiteren Bereichen, beispielsweise an einer Kabinenhälfte, insgesamt mehr als 18 m an FSW-Nähten realisiert, welche in einer Zeit von 36 Minuten hergestellt werden (ECLIPSE 2004). Insgesamt ergibt sich auch bei dieser Anwendung eine Verringerung der Montagezeiten um ca. 80 % gegenüber konventionell genieteten Strukturen (CHRISTNER 2007). Dieses Flugzeug bietet bereits ein beeindruckendes Beispiel für das Potential des Rührreibschweißens. Weltweit beschäftigen sich zudem international führende Flugzeughersteller für große Passagiermaschinen sowie deren Zulieferer mit der Entwicklung des FSW-Verfahrens (BAUMANN 2006; KALLEE ET AL. 2002; MENDEZ & EAGAR 2002). Als Schweißanlagen werden hierbei unter anderem Sondermaschinen der Firmen Brötje Automation bzw. Crawford Swift eingesetzt, welche in Portalbauweise aufgebaut sind und mit einer vollen 3D-Fähigkeit über Verfahrenswege von mehreren Metern verfügen.

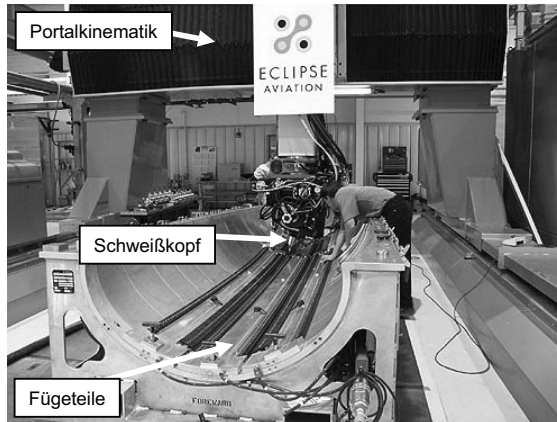


Abbildung 2: Portalkinematik zur Fertigung der Rumpfstruktur des Flugzeuges Eclipse 500 (ECLIPSE 2004)

Schienenfahrzeugindustrie

Die positiven Verbindungs- und Verzugseigenschaften rührreibgeschweißter Aluminiumprofile kommen auch der Schienenfahrzeugindustrie zugute. So wurden schmelzschweißende Verfahren zum Fügen von Bodenpaneelen des japanischen Shinkansen-Hochgeschwindigkeitszuges durch FSW ersetzt, um dadurch Platz und Masse einzusparen (LATHI 2003). Auch die Firma Alstom LHB GmbH berichtet über rührreibgeschweißte Strukturen von Nahverkehrszügen (BLACH & SENNE 2002), die von der Firma SAPA ebenfalls aus Strangpressprofilen erfolgreich gefügt werden (SAPA 2003).

Automobilbau

Vereinzel existieren auch Anwendungen des FSW in der Automobilindustrie, insbesondere bei so genannten Technologieträgern. So wurde das Verfahren erstmals branchenweit an einem Sportwagen eingesetzt, bei dem ein stranggepresster Mitteltunnel an die Aluminiumrahmenkonstruktion geschweißt wird, welche selbst wiederum aus Aluminium-Strangpressprofilen und -Gussteilen besteht (FORD 2003; KALLEE 2005; Abbildung 3). Um 30 % bessere Verbindungseigenschaften gegenüber dem bislang eingesetzten Schutzgasschweißverfahren konnten auch durch FSW-Nähte an Strukturkomponenten des Sportwagens „Panoz Esperate“ erzielt werden (SMITH ET AL. 2003b), welche mit Hilfe eines Industrieroboters in Form von Steppnähten hergestellt wurden (SMITH ET AL. 2003a). Innerhalb Deutschlands wurde die erste Anwendung des

Rührreischweißens in der Serienfertigung ebenfalls an einem Sportwagen, dem Audi R8, realisiert (MEYER & SCHILLING 2007). Hier werden Mitteltunnelschließbleche unterschiedlicher Dicke gefügt und anschließend umgeformt („Tailored blanks“). Durch den Einsatz unterschiedlicher Blechstärken konnten so etwa 20 % Material eingespart werden, was einer Masse von ca. 1 kg entspricht. Dabei kann bei der geschweißten Legierung eine Nahtgüte von ca. 96 % hinsichtlich der Zugfestigkeit erreicht werden (STROMBECK 2007). Das Verfahren findet auch Interesse seitens der Zulieferindustrie. So wird über den Einsatz des FSW an Abgasrückführkühlern berichtet (ANONYM 2006), welche aus Aluminium-Druckguss hergestellt werden. Die Firma „Simmons Wheels“ (Australien) entwickelte Leichtmetallfelgen, für deren Herstellung zunächst lange Röhren aus Blechmaterial rührreibgeschweißt werden (KALLEE 2005). Nach dem Trennen in kleine Abschnitte werden diese dann umgeformt und mit einem Innenteil zu einem fertigen Produkt verschraubt. Weitere Anwendungen finden sich bei der Herstellung von Hohlkammertanks aus stranggepressten Profilen (OOSTERKAMP & HEURTAUX 2006) sowie auch bei FSW-Punktschweißungen an den Türen und der Motorhaube des Mazda RX8 (MACHINE DESIGN 2004; KALLEE 2005).

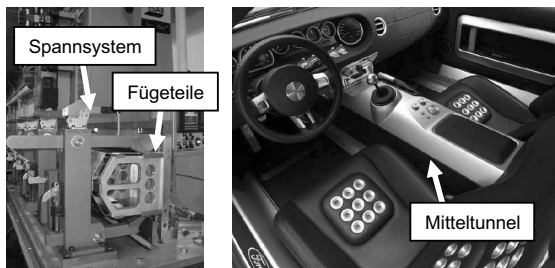


Abbildung 3: Links: Fertigung des Ford GT Mitteltunnels; rechts: Endprodukt (KALLEE 2005)

Oben genannte Anwendungen repräsentieren die wichtigsten Industriezweige in Bezug auf das Rührreischweißverfahren und geben einen ersten Einblick in deren Vielfalt. Über diese Beispiele hinaus existieren weitere Anwendungsfelder in der Elektroindustrie (SYKATEK 2004), der Nahrungsmittelindustrie (MEYER & SCHILLING 2004) oder der Medizintechnik (SCHILLING & STROMBECK 2005). Selbst für militärische Zwecke wird das Verfahren bereits erfolgreich erprobt und eingesetzt (NCEMT 2003).

1.3 Motivation

Die eingangs erwähnten Anwendungen verdeutlichen, dass das FSW-Verfahren bereits Einzug in wichtige und große Industriezweige gehalten hat. Meist handelt es sich um Einschweißtiefen im Dickenbereich einiger Millimeter, sei es zum Fügen von Tankstrukturen, stranggepressten Bodenplatten oder Kleinteilen der Fahrzeugindustrie. Für einen Großteil dieser Anwendungen wurden spezielle Anlagen konstruiert, die den Anforderungen sowohl des Produktes als auch des Prozesses genügen. Der Aufbau spezieller Anlagen zieht dabei erhebliche Anschaffungskosten nach sich. Des Weiteren muss der Auslastungsgrad dieser Anlagen für einen rentablen Betrieb entsprechend hoch sein. Es ist derzeit jedoch verstärkt ein allgemeiner Trend weg von Massenprodukten hin zu individuell gestalteten Teilen mit entsprechend geringer Stückzahl zu beobachten. Somit wird die Anschaffung von Sonderschweißanlagen insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen (kmU) uninteressant, da sie aus dem Potential des Verfahrens keinen unmittelbaren finanziellen Nutzen ziehen können. Für geringe Einschweißtiefen können auch Industrieroboter eingesetzt werden, die infolge der Entwicklung in den vergangenen Jahren stetig steigende Traglasten erlauben. Vereinzelt werden derartige Systeme zu Forschungszwecken herangezogen, ein verbreiteter Einsatz in der Industrie findet jedoch noch nicht statt. Als Hauptargument wird hierfür meist die mangelnde Steifigkeit im Vergleich zu parallelkinematischen Robotern oder FSW-Anlagen herangezogen (STROMBECK ET AL. 2000; SHEIKHI & DOS SANTOS 2006). Mögliche weitere Ursachen sind die mangelnde Kenntnis über die Einsatzpotentiale von Robotern bzw. über den Prozess selbst.

1.4 Ziel der Arbeit

Mit dieser Arbeit soll der Einsatzbereich von Industrierobotern zum FSW erweitert werden. Industrieroboter mit hohen Traglasten zeichnen sich durch einen großen Arbeitsraum aus und erfordern im Vergleich zu konventionellen FSW-Anlagen einen geringeren Investitionsaufwand. Dadurch könnte die Anwendung des Rührreibschweißens auch für kmU mit Blick auf die Anschaffungskosten für die Schweißanlage interessant werden. Mangels Erfahrungen mit dem Roboter zum Rührreibschweißen werden diese Systeme hierfür bislang nicht eingesetzt. Des Weiteren bestehen die bisherigen Anwendungen lediglich meist nur aus geraden Schweißnähten, aus Nähten in der Ebene oder über große Umfänge. Erfahrungen mit dem Schweißen über enge Radien im dreidimensionalen Raum existieren daher fast nicht. Industrieroboter bieten gegenüber anderen Handhabungssystemen eine

sehr hohe Bewegungskomplexität, die es erlaubt, theoretisch beliebigen Schweißnahtkonturen zu folgen, sofern keine (Eigen-)Kollisionen auftreten und sich die Achsbewegungen innerhalb der zugelassenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen befinden. Gerade in der Automobilindustrie können Schweißnahtgeometrien mitunter sehr komplex gestaltet sein. Ziel der Arbeit soll es deshalb sein, den Robotereinsatz für das Rührreißschweißen mit Einschweißtiefen im Bereich einiger Millimeter genauer zu untersuchen und die Grundlagen für das Schweißen über enge Radien hinweg zu schaffen.

1.5 Aufbau der Arbeit und Vorgehensweise

Die vorliegende Abhandlung beschreibt in Kapitel 2 die Grundlagen, auf deren Basis die weitere Arbeit aufbaut. So werden in Abschnitt 2.2 zunächst die wesentlichen Abläufe und Eigenschaften des FSW-Prozesses vorgestellt sowie die einstellbaren Verfahrensparameter näher aufgezeigt. Daran anschließend werden die Vorteile und Randbedingungen des Prozesses gegenüber konventionellen schmelzschweißenden Verfahren erläutert. Der Abschnitt 2.3 beinhaltet Möglichkeiten einer zerstörenden Prüfung rührreibgeschweißter Verbindungen, durch welche die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche qualitativ sowie quantitativ bewertet wurden. Das Kapitel wird mit dem grundsätzlichen Aufbau und der Beschreibung von Industrierobotern abgeschlossen.

Im Anschluss an die notwendigen Grundlagen wird der aktuelle Stand von Forschung und Technik in Kapitel 3 vorgestellt. Die zentralen Fragestellungen stehen hierbei in Bezug auf die Verwendung unterschiedlicher Schweißanlagen, die in der Industrie und im Laborbetrieb zum Einsatz kommen. Letztendlich gibt es auch Bestrebungen, die erforderlichen Prozessbedingungen an die Fähigkeiten der Roboter anzupassen, was neben den Prozessparametern auch die Entwicklung spezieller Werkzeuge nach sich zieht. Diese werden in Abschnitt 3.3 vorgestellt. Der letzte Abschnitt des Kapitels schließlich beschreibt Beispiele sowie deren Ergebnisse, bei denen Industrieroboter schon für den FSW-Prozess genutzt werden.

Kapitel 4 bis 6 bilden schließlich die Hauptteile der Arbeit. Zunächst wird in Kapitel 4 der generelle Aufbau des im Rahmen der Untersuchungen verwendeten Systems erläutert. Basierend auf diesen realisierten Versuchsaufbau werden die Potentiale des Systems und dessen Einfluss auf den Schweißprozess in Kapitel 5 anhand von Schweißversuchen mit unterschiedlichen Legierungen, Einschweißtiefen und Schweißpositionen erarbeitet. Die gewonnenen Ergebnisse werden dabei

in Relation zu Vergleichsversuchen weiterer FSW-tauglicher Maschinen gesetzt, um die mit dem Roboter erreichten Schweißnahtqualitäten mit denen dieser Anlagen vergleichen zu können. Als zentrale Aussage stehen hiermit das Anlagenverhalten des Roboters während des Schweißprozesses und die resultierenden Nahtqualitäten im Vordergrund. Kapitel 6 der vorliegenden Arbeit umfasst die Prozesseignung für stark gekrümmte Oberflächen in Zusammenhang mit dem Roboter als die Werkzeug führende Anlage.

Abschließend werden in Kapitel 7 die gewonnenen Erkenntnisse der Arbeit zusammengefasst und mögliche Szenarien sowie zukünftige Entwicklungen des Rührreischweißens, insbesondere mit dem Industrieroboter, vorgestellt.

2 Grundlagen

2.1 Allgemeines

Der Begriff des Rührreibschweißens ist nach DIN EN 14610 wie das konventionelle Reibschweißen den Pressschweißverfahren zugeordnet. Das Kapitel der Grundlagen umfasst die wesentlichen Eigenschaften sowie die Vor- und Nachteile des FSW-Prozesses. Des Weiteren werden Möglichkeiten zur Prüfung von rührreibgeschweißten Verbindungen vorgestellt, die in dieser Arbeit zur Qualitätsbewertung herangezogen werden.

2.2 Schweißprozess

2.2.1 Ablauf

Im Gegensatz zu den Schmelzschweißverfahren kommt beim Rührreibschweißen ein Werkzeug zum Einsatz, welches sich während des Fügeprozesses in hartem Kontakt mit den Fügepartnern befindet. Das nahezu verschleißfeste Werkzeug besitzt im Allgemeinen zwei charakteristische Merkmale, die im Prozessablauf unterschiedliche Funktionen erfüllen müssen. Diese Merkmale sind eine Werkzeugschulter sowie ein Werkzeugstift („Pin“), die in ihrer Grundform rotationssymmetrisch und konzentrisch zum Werkzeuggrundkörper angeordnet sind. Folgende Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines FSW-Werkzeugs.

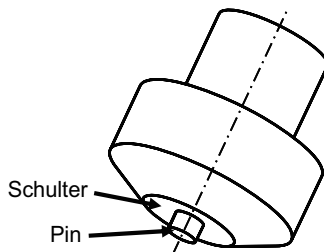


Abbildung 4: FSW-Werkzeug

Der Prozess des Rührreibschweißens lässt sich in vier grundlegende Phasen unterteilen und wird im Folgenden am Beispiel einer Stumpfstoßverbindung zweier

ebener Fügepartner (Abbildung 5) erläutert. Nach dem Vorpositionieren des Werkzeuges wird dieses in der ersten Phase, um die eigene Achse rotierend, in den Fügespalt der zu verschweißenden Werkstücke eingedrückt, bis die Werkzeugschulter mit deren Oberflächen in harten Kontakt kommt. Durch die Relativbewegung des Werkzeuges gegenüber den still stehenden Fügepartnern entsteht Reibungswärme, wodurch die Fügepartner erwärmt werden. Die zweite Phase des Prozesses ist durch eine Verweilzeit gekennzeichnet. Während dieser Zeit wird das rotierende Werkzeug weiter mit hoher Kraft auf die Werkstücke gepresst und die Fügepartner dadurch schließlich in einen lokal plastifizierten Zustand versetzt. Die Werkzeugschulter trägt im Gegensatz zum eingetauchten Pin hierbei maßgeblich zur Wärmegenerierung bei (DUBOURG & DACHEUX 2006, S. 2). Die Temperatur der Fügepartner überschreitet deren Liquiduslinie nicht, sondern bleibt knapp unterhalb der Schmelztemperatur des Materials (COVINGTON 2005; GEBHARD & ZAEH 2006). Nach Ablauf einer ausreichenden Verweildauer t wird in der dritten Phase der eigentliche Schweißprozess gestartet und das Werkzeug entlang des Fügestoßes geführt. Die Druckspannung durch die Kraft F_w des Werkzeuges auf die Fügepartner muss dabei erhalten bleiben, damit infolge der Reibung zwischen der Werkzeugschulter und den Fügepartnern genügend Wärme erzeugt werden kann, um diese zu plastifizieren. Des Weiteren besitzt die Werkzeugschulter auch die Aufgabe, das plastifizierte Material in der Fügezone zu halten. Durch die Rotation des Werkzeugpins hingegen werden die Fügepartner mechanisch durchmischt und verpresst. Unter der hohen Kraft und der Prozesstemperatur findet schließlich ein Diffusionsprozess statt, was zu einer stoffschlüssigen Verbindung der Fügepartner führt. Letztendlich wird durch diesen Prozess eine Warmpressschweißverbindung erzeugt. Am Ende der Schweißnaht wird das Werkzeug in der letzten Phase des Prozessablaufes aus dem Verbindungsbereich zurückgezogen, wodurch ein Negativabdruck („Endkrater“) des Werkzeuges auf den Fügepartnern hinterlassen wird.

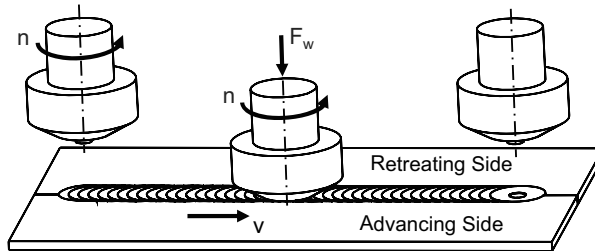


Abbildung 5: Prozessablauf beim Rührreibschweißen

Die Kombination aus Werkzeugdrehrichtung und Vorschubrichtung erlaubt eine Einteilung der Schweißnaht in zwei Seiten. Die Seite, auf der die Richtung der Umfangsgeschwindigkeit des Werkzeuges mit der Vorschubrichtung zusammenfällt, wird als *Advancing Side* bezeichnet. Die andere Seite, auf welcher die Umfangsgeschwindigkeit gegen die Vorschubrichtung zeigt, wird als *Retreating Side* bezeichnet.

2.2.2 Parameter

Zur Durchführung des Rührreibschweißprozesses existiert eine Vielzahl von Parametern, die abhängig von der Schweißaufgabe, also dem zu verschweißenden Material und der erforderlichen Einscheißtiefe, einzustellen sind.

Werkzeugparameter

Zu Beginn einer Schweißaufgabe steht die Auswahl eines geeigneten Werkzeuges. Die genannten Charakteristika von FSW-Werkzeugen sind nach wie vor Gegenstand der Forschung (KALLEE ET AL. 2002; KALLEE ET AL. 2003), da durch sie die Qualität der Schweißergebnisse maßgeblich beeinflusst werden kann. Ein wichtiges Kriterium ist dabei der Durchmesser der Werkzeugschulter. Je höher die erforderliche Einscheißtiefe ist, desto größer wird der Schulterdurchmesser gewählt (DUBOURG & DACHEUX 2006, S. 7). Ein übergroßer Schulterdurchmesser führt jedoch zu einer unnötig großen Fügezone, was unter Umständen die Qualität der Schweißnaht negativ beeinflussen kann. Auch die Form der Werkzeugschulter kann variabel gestaltet werden. Meist wird eine Kontur mit konkaver Schulteroberfläche gewählt, für einen günstigen Materialfluss während des Prozesses können in die Schulterfläche jedoch auch spiralförmige Merkmale eingebracht werden (DUBOURG & DACHEUX 2006, S. 8).

Auch der Werkzeugpin kann mit unterschiedlichen geometrischen Merkmalen versehen werden. Während anfangs glatte, zylindrische Pins verwendet wurden, stellte sich bald heraus, dass der Schweißprozess robuster gestaltet werden kann, wenn während des Schweißens ein vertikaler Materialfluss des plastifizierten Materials von der Schulteroberfläche in Richtung der Nahtwurzel unterstützt wird. Dies geschieht in den meisten Fällen durch ein in den Werkzeugpin eingeschnittenes Gewinde, welches bei Rotation das umliegende Material nach unten fördert. Des Weiteren werden die Werkzeugpins häufig auch mit Flanken versehen, um dadurch die Werkstoffe besser „verkneten“ zu können. Beide Merkmale tragen im Allgemeinen zu einem robusteren Prozessablauf bei, eine optimale Pinform für alle Schweißaufgaben gibt es jedoch nicht (FUJII ET AL. 2006a). Die Länge des Pins wird indes so eingestellt, dass sie geringfügig kürzer ist als die vorgesehene Einschweißtiefe. Durch die Plastifizierung der Fügepartner während des Prozesses wird auch ein geringes Volumen unterhalb des Pins noch mit verrührt. Der Pindurchmesser schließlich darf einen gewissen Mindestwert nicht unterschreiten, um eine zu hohe Belastung des Pinwerkstoffes während des Schweißens zu verhindern, was zum Versagen des Materials führen könnte.

Prozessparameter

Eine essentielle Bedeutung während des Schweißprozesses kommt den Parametern Anpresskraft F_w , Werkzeugdrehzahl n und Vorschubgeschwindigkeit v zu. Durch sie wird in Kombination mit den geometrischen Merkmalen des Werkzeuges die Wärmemenge bestimmt, die in die Werkstücke eingebracht wird. Die Anpresskraft F_w des Werkzeuges sorgt für einen entsprechenden Druck unterhalb der Werkzeugschulter, wodurch der plastifizierte Werkstoff ausreichend verdichtet und im Verbindungsbereich gehalten werden kann. Durch eine geeignete Einstellung der Werkzeugdrehzahl n und des Schweißvorschubes v wird genügend Reibungswärme über die Schweißnaht erzeugt, um die zu verbindenden Werkstoffe zu plastifizieren. Je nach Werkstoff existieren dabei Parameterfenster, innerhalb derer eine rührreibgeschweißte Naht fehlerfrei erzeugt werden kann. Um über die Schweißnaht eine reproduzierbare Wärmemenge in die Fügepartner einbringen zu können, sind moderne Rührreischweißanlagen in der Regel mit einer Kraftregelung ausgestattet, welche das Werkzeug mit konstanter Kraft auf die Fügepartner presst.

Neben diesen grundlegenden Prozessparametern existiert noch eine Reihe weiterer Parameter, die zu einer Steigerung der Robustheit des Prozesses beitragen. Im Allgemeinen wird das Werkzeug nicht orthogonal zur Oberfläche der Fügepartner geführt, sondern in einem stechenden Anstellwinkel α . Dieser trägt zu zwei

positiven Effekten bei. Zum einen steht dadurch die Werkzeugschulter vorderhalb der Schweißstelle über der Werkstückoberfläche, wodurch ein Werkstofftransport unter die Schulter unterstützt wird und es zu einem „Aufschwimmen“ des Werkzeuges auf der Werkstückoberfläche kommt. Zum anderen befindet sich die Werkzeugschulter im hinteren Bereich der Schweißstelle etwas tiefer in den Fügepartnern, was zu einer Nachverdichtung infolge eines höheren Druckes auf die Fügepartner führt.

Bezüglich der zweiten Phase des Prozessablaufes wurde bereits die Verweilzeit t des rotierenden Werkzeuges auf den Fügepartnern erwähnt. Diese muss sich innerhalb gewisser Grenzen befinden. Eine zu kurze Verweildauer führt zu einer ungenügenden Erwärmung der Fügestelle nach dem Eintauchen, was zumindest am Schweißnahtanfang einen zu „kalten“ Prozess zur Konsequenz hat. Eine zu lange Verweildauer dagegen hat zur Folge, dass aufgrund zu warmer Prozessbedingungen das Werkzeug unter Umständen zu tief in die Fügepartner einsinkt.

Zu Beginn eines Schweißvorganges schließlich muss das Werkzeug beschleunigt werden, bis es die gewünschte Vorschubgeschwindigkeit erreicht. Hierbei ist insbesondere bei hohen Einschweißtiefen auf eine nach oben begrenzte Beschleunigung zu achten, um den Werkzeugpin nicht unnötig hohen Belastungen auszusetzen.

2.2.3 Schweißnahtzonen

Eine rührreibgeschweißte Naht lässt sich in mehrere Zonen unterteilen (Abbildung 6). Im Zentrum der Schweißnaht befindet sich das so genannte „Nugget“. Dieses wurde während des Schweißprozesses vom Werkzeugpin unmittelbar durchmischt. Infolge der hohen Temperaturen und der mechanischen Werkzeugeinwirkung entsteht in diesem Bereich ein dynamisch rekristallisiertes Gefüge (JATA & SEMIATIN 2000), welches durch eine zwiebelschalenartige Struktur aus einzelnen Schichten beider Werkstoffe charakterisiert ist. Durch Diffusionsvorgänge ist deren Verbindung stoffschlüssig. Infolge der Asymmetrie des Prozesses durch Werkzeugdrehung und Vorschubrichtung besitzt das Nugget auf der Advancing Side nahtoberseitig einen Auslauf (im Bild links). An das Nugget grenzt die thermomechanisch beeinflusste Zone (TMZ) an. Diese wurde vom Werkzeugpin nicht mehr unmittelbar erfasst. Die Gefügestruktur ist mechanisch stark verformt, die Prozesstemperatur beim Schweißen reicht jedoch nicht mehr für eine vollständige Rekristallisation des Werkstoffes aus. Im Übergang zum Grundwerkstoff befindet sich schließlich eine rein thermisch beeinflusste Zone,

welche als Wärmeeinflusszone (WEZ) bezeichnet wird und allen thermischen Schweißverfahren gemeinsam ist. Im Gegensatz zur TMZ findet hier keine Verformung der Struktur während des Schweißprozesses statt, sondern nur ein leichtes Kornwachstum sowie eine Auslagerung infolge der Wärmeeinwirkung.

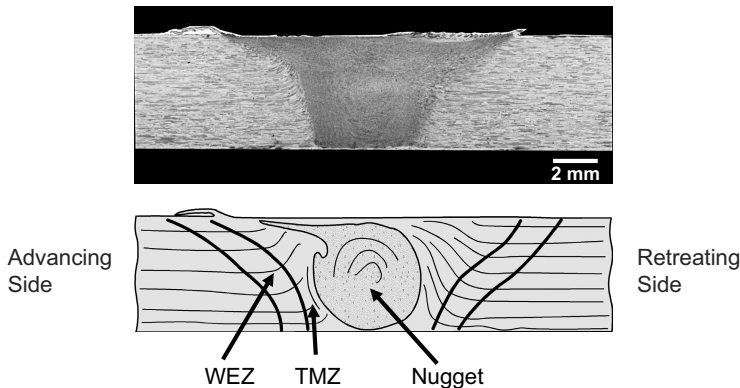


Abbildung 6: Zonen einer Rührreißschweißnaht im Querschnitt

2.2.4 Vorteile des Verfahrens

Grundsätzlich kann das Verfahren auf jede Art von Metallen angewandt werden. Aufgrund eines relativ geringen Schmelzpunktes von Aluminium (etwa 660 °C bei Reinaluminium, siehe KAMMER 2002, S. 225) ist es besonders für diesen Werkstoff und dessen Legierungen geeignet. Durch die Besonderheiten im Prozessablauf ergeben sich für rührreibgeschweißte Verbindungen positive Eigenschaften, die jene konventionell geschweißter Aluminiumverbindungen übertreffen können (PEPÉ ET AL. 2006; VAIDYA ET AL. 2006). Vereinzelte Anwendungen bzw. Forschungsarbeiten sind jedoch auch für Kupfer (ANDERSSON ET AL. 2000; CEDERQVIST 2006; HEITZENROEDER 2000; POLAR ET AL. 2005), Titan (FUJII ET AL. 2006b; JONES & LOFTUS 2006), Magnesium (JOHNSON 2003), Stahl (LIENERT 2003; JOHNSON ET AL. 2003) und sogar Kunststoffen (MATTAPELLI ET AL. 2007; WILDEN ET AL. 2006) bekannt. Auch Mischverbindungen artgleicher Werkstoffe (CAVALIERE ET AL. 2006; GEIGER ET AL. 2004 am Beispiel zweier Aluminiumlegierungen), Sandwichstrukturen (GEIGER ET AL. 2005a) sowie Werkstoffpaarungen wie Al-Cu (AMAG

2005; SAVOLAINEN ET AL. 2006b) oder Al-St (GEIGER ET AL. 2005b; WILDEN ET AL. 2007) sind möglich.

Während des Schweißprozesses wird das Material nicht aufgeschmolzen, sondern lediglich in einem plastifizierten Zustand durchmischt. Dadurch wird insbesondere beim Schweißen von Aluminium eine Porenbildung des im Werkstoff gelösten Wasserstoffes vermieden, was bei schmelzschweißenden Verfahren während der Wiedererstarrung auftreten kann (DILTHEY 2005, S. 235 ff.). Des Weiteren fällt der Schweißverzug nur relativ gering aus. Die Durchmischung des Werkstoffes im Schweißbereich gleicht einem Extrusionsprozess ähnlich dem Strangpressen, wodurch im Nugget besonders hohe Nahtqualitäten erzeugt werden können. Der kornfeinende Effekt kann überdies auch gezielt zur Verbesserung lokaler Werkstoffeigenschaften ausgenutzt werden (SAVOLAINEN ET AL. 2006a).

Üblicherweise wird der Rührreibschweißprozess ohne Schutzgas (bei Aluminiumwerkstoffen) und auch ohne das Zuführen von Schweißzusatzwerkstoffen geführt. Auch eine Absaugung von Rauch, Stäuben oder Gasen ist nicht notwendig, da sie im Prozess nicht entstehen. Weitere Vorteile ergeben sich dadurch, dass keine besonderen Schutzeinrichtungen erforderlich sind, wie dies bei Lichtbogen- oder Laserschweißverfahren zwingend notwendig ist. Eine hohe Reproduzierbarkeit des Verfahrens ergibt sich aus der Tatsache, dass der Prozess maschinengeführt und gut automatisierbar ist. Folglich entfällt auch die Notwendigkeit speziell ausgebildeten Schweißfachpersonals.

Das Rührreibschweißverfahren wird üblicherweise zum Verbinden von Stumpfstößen angewendet, jedoch kann es auch zum Erzeugen von Überlapp- oder T-Stößen eingesetzt werden.

2.2.5 Nachteile des Verfahrens

Den zahlreichen Vorteilen stehen einige Nachteile und Randbedingungen gegenüber. Das Werkzeug muss mit hoher axialer Kraft auf die Fügepartner gepresst werden. Je nach zu schweißendem Werkstoff und Dicke befinden sich die erforderlichen Kräfte in einem Bereich von wenigen kN bis hin zu 100 kN und darüber. Ein Beispiel hierfür bieten COLLIGAN ET AL. (2001) mit einer Prozesskraft von 60 kN bei einer Einschweißtiefe von 44 mm in eine Al-Cu-Legierung. Dies macht zum einen die Bereitstellung dieser Prozesskräfte durch eine entsprechend steif ausgelegte Schweißmaschine erforderlich. Zum anderen müssen die Fügepartner in einer entsprechend massiven Spannvorrichtung fixiert werden, um

ein Ausweichen bzw. plastisches Wegfließen der Fügepartner im Verbindungsbereich zu vermeiden. Dies kann unter Umständen die Anwendbarkeit des Verfahrens für bestimmte Bauteilgeometrien empfindlich einschränken.

Obwohl die Nahtigenschaften beim FSW im Allgemeinen besser als die alternativer Schweißverfahren sind, ist oftmals die Schweißgeschwindigkeit sehr viel geringer im Vergleich zu diesen (z. B. verglichen mit Laserschweißverfahren, siehe VAN HAVER ET AL. 2006). Dies verringert die Effizienz des Prozesses und macht ihn oft nur für die Anwendung schwer schweißbarer Werkstoffe attraktiv.

Das Werkzeug hinterlässt am Nahtende einen Abdruck, der oftmals unerwünscht ist. Falls das Werkzeug nicht in eine Auslaufzone geführt werden kann, die bei Bedarf anschließend entfernt wird, muss das Endloch durch andere auftragende Verfahren mit konventionellen Methoden gefüllt werden. Eine andere Abhilfe bietet ein spezielles Werkzeug, dessen Pin gesondert aus dem Schweißbereich zurückgezogen werden kann, ohne dass gleichzeitig die Werkzeugschulter angehoben werden muss. Dadurch kann der Endkrater bis zu einem gewissen Grad aufgefüllt werden. Diese Lösung erfordert jedoch eine aufwändige Kinematik im Schweißkopf, die zudem patentrechtlich geschützt ist (SCHUTZRECHT US6758382).

Das Rührreißschweißverfahren selbst wurde, wie bereits erwähnt, 1991 erfunden und ist seitdem patentrechtlich geschützt. Eine geschätzte Zahl von etwa weiteren 2100 Patenten (TWI 2009; viele davon sind doppelt in unterschiedlichen Ländern angemeldet) können für einen potentiellen Anwender des Verfahrens hohe Lizenzgebühren nach sich ziehen.

2.3 Prüfung von Schweißverbindungen

Zur Bewertung von Schweißverbindungen können unterschiedliche Kriterien herangezogen werden. Diese reichen von einer einfachen optischen Begutachtung der Schweißnahtoberfläche bis hin zu zerstörenden Prüfmethoden. Im Folgenden werden vier der zerstörenden Prüfverfahren, die im Rahmen dieser Arbeit zum Einsatz gekommen sind, näher beschrieben.

2.3.1 Zugversuch

Der Zugversuch ist ein genormtes Prüfverfahren (DIN EN 10002-1) und stellt eine weit verbreitete und bewährte Möglichkeit dar, um Werkstoffe hinsichtlich ihrer Belastbarkeit zu prüfen. Dabei werden aus diesen Werkstoffen Proben mit

bestimmter Geometrie entnommen und mit Hilfe einer Zugprüfmaschine bis zum Bruch gezogen. Die Probenform ist dabei so gewählt, dass sich in der Probe während der Belastung ein einachsiger Spannungszustand in Zugrichtung einstellt. Ein Ergebnis der Zugprüfung ist ein Diagramm, in welchem die Zugspannung über der relativen Dehnung der Probe aufgetragen ist. Die gemessene Spannung ist dabei stets der Quotient aus Prüfkraft und Ausgangsquerschnitt der Probe.

Je nach Werkstück erlaubt die Norm unterschiedliche Probengeometrien in Form von Flach- oder Rundproben. Insbesondere bei Proben, welche um die Längsachse gebogen sind (beispielsweise Längsstreifenproben aus einem Rohr), ist darauf zu achten, dass die Probe so eingespannt wird, dass sich bei Belastung eine reine Zugspannung einstellt.

Eine Zugbelastung metallischer Probekörper kann in einzelne Phasen unterteilt werden: Zu Beginn findet eine rein elastische Verformung der Probe statt. Wird die Probe in dieser Phase wieder entlastet, nimmt sie die ursprüngliche Form wieder ein. Der sich dabei einstellende Quotient aus Spannung und Dehnung bildet den Elastizitätsmodul E (kurz: E-Modul), welcher eine physikalische Größe ist und für eine Legierung konstant ist, unabhängig von deren Wärmebehandlungszustand. Bei weiterer Zugbelastung wird schließlich die Streckgrenze erreicht. Diese Grenze ist eine Spannung und markiert den Beginn einer plastischen Verformung der Probe. Bei weiterer Dehnung und anschließender Entlastung der Probe würde sich eine bleibende Verformung in Form einer Längenänderung einstellen. Meist wird im Versuch die Dehngrenze $R_{p0,2}$ ermittelt, bei der sich eine Längenänderung von 0,2 % nach Entlastung der Probe ergibt. Bei weiterer Belastung beginnt die Probe sich lokal einzuschnüren, wodurch sie sich in diesem Bereich weiter dehnt. Bezogen auf den Ausgangsquerschnitt jedoch fällt die ermittelte Spannung bei fortschreitender Dehnung der Probe wieder ab. Der Punkt höchster Spannung wird dann als Zugfestigkeit R_m bezeichnet. Der Zugversuch endet schließlich mit dem vollständigen Bruch der Probe. Die dabei ermittelte Dehnung wird als Bruchdehnung A angegeben (DIN EN 10002-1).

Auch geschweißte Proben können einer solchen Zugprüfung beispielsweise in Form eines Querzugversuches unterzogen werden (Abbildung 7). Eine solche Prüfung ist in DIN EN 895 ebenfalls genormt und beschreibt über DIN EN 10002-1 hinaus vor allem geometrische Randbedingungen zur Entnahme der Proben.

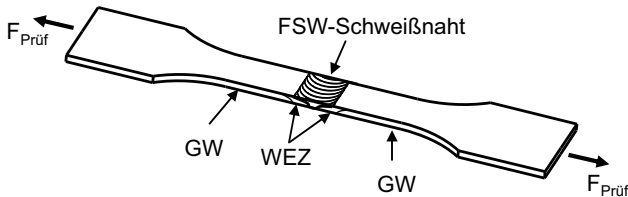


Abbildung 7: Zugprüfung einer Schweißnaht (Querzugversuch)

Bei der Zugprüfung geschweißter Proben sind jedoch Einschränkungen hinsichtlich der ermittelten Kenngrößen zu beachten. Wie Abbildung 7 zeigt, findet die Belastung der geschweißten Probe über mehrere Zonen bei einer durch die Probenform definierten Prüflänge statt. Bei rührreibgeschweißten Proben bedeutet dies eine Belastung über den Grundwerkstoff (GW), die thermisch und thermomechanisch beeinflussten Zonen (TMZ/WEZ) sowie das Schweißgut selbst. In der Konsequenz daraus wird die Probe in den verschiedenen Schweißnahtzonen unterschiedlich gedehnt. Dies hat zur Folge, dass bei Verwendung einfacher Längenänderungsaufnehmer die Werte der Dehngrenze $R_{p0,2}$ und der Bruchdehnung A verfälscht werden und nicht mehr mit dem Grundwerkstoff verglichen werden können. Auch der Zugversuch zweier identischer, geschweißter Proben mit unterschiedlichen Anfangsmesslängen würde aus diesem Grund unterschiedliche Ergebnisse hervorbringen. Der einzig belastbare Wert einer geschweißten Verbindung ist in diesem Fall deren Zugfestigkeit R_m , welche auch mit dem Grundwerkstoff sinnvoll verglichen werden kann. Bei gleichen Probenabmessungen und Schweißnahtbreiten können zumindest auch die Dehngrenze und die Bruchdehnung untereinander qualitativ verglichen werden. Lokale Dehnungen während des Zugversuches können über die gesamte Probe mit speziellen optischen Systemen wie beispielsweise Laserextensometern bestimmt werden.

Die allgemeine Norm DIN EN 10002-1 erlaubt für Flacherzeugnisse mit einer Dicke zwischen 0,1 und 3 mm auch einfache Streifenproben ohne Kopf. Zwar ist dadurch nicht grundsätzlich ausgeschlossen, dass die Probe aufgrund einer ungünstigen Einspannung vorzeitig versagt. Diese Probenform ist in DIN EN 895 im Hinblick auf die Prüfung von Schweißverbindungen nicht erwähnt. Dennoch können auch an geschweißten Streifenproben gültige Zugversuche durchgeführt werden. Dies ist dann der Fall, wenn sichergestellt ist, dass das Material im Schweißbereich oder in der Wärmeeinflusszone geringere Festigkeiten aufweist als der umgebende Grundwerkstoff. Die Probe versagt dann unter Belastung im

schwächsten Bereich und nicht im Grundwerkstoff oder im Bereich der Einspannstellen. Voraussetzung ist allerdings, dass sich die Wärmeeinflusszone nicht bis zu den Einspannstellen erstreckt.

2.3.2 Biegeprüfung

Durch den so genannten Dreipunkt-Biegeversuch können geschweißte Verbindungen sehr schnell und aufwandsarm geprüft werden. Die geometrischen Maße von Prüfling und Prüfeinrichtung sowie der Ablauf der Prüfung sind in DIN EN 910 festgelegt. Dabei wird zunächst aus der geschweißten Verbindung ein rechteckiges Prüfstück entnommen und so in die Prüfeinrichtung gelegt, dass sich die Längsachse der Schweißnaht parallel zwischen zwei Auflagern befindet. Mit Hilfe eines Prüfdornes, der senkrecht nach unten bewegt wird, wird dann eine allmähliche und kontinuierliche plastische Verformung der Probe herbeigeführt (Abbildung 8). Im Gegensatz zu einer Zugprüfung stellt sich dabei ein mehrachsiger Spannungszustand in der Probe ein. Der Versuch ist dann beendet, wenn die Probe einen Biegewinkel der entsprechenden Anwendungsnorm erreicht hat bzw. unter dem Biegewinkel α_B versagt. Der Biegeversuch kann sowohl als nahtoberseitige als auch als wurzelseitige Prüfung ausgeführt werden.

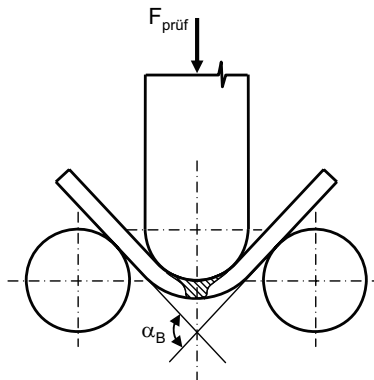


Abbildung 8: Biegeprüfung nach DIN EN 910

Aufgrund der Tatsache, dass eine FSW-Verbindung duktile Eigenschaften besitzt, können diese Proben je nach Legierung häufig bis zur Parallelität ($\alpha_B = 180^\circ$) gebogen werden. In Anlehnung an den Normentwurf DIN EN 2002-6, welcher für

die Prüfung metallischer Werkstoffe in der Luft- und Raumfahrt gedacht ist, können die Proben nach Erreichen der Parallelität mit Hilfe eines Schraubstockes noch weiter bis hin zur Berührung der Biegeschenkel gebogen werden. Dieser Normentwurf gilt zwar lediglich für Werkstoffe, die nicht geschweißt wurden, dennoch kann er durchaus zur quantitativen Bewertung geschweißter Verbindungen herangezogen werden.

2.3.3 Schweißnahtmerkmale

Außer durch mechanische Prüfverfahren können Schweißverbindungen auch optisch anhand von Schliffbildern bewertet werden. Am häufigsten wird dabei ein Querschliff der Naht angefertigt, wie er beispielsweise in Abbildung 6 zu sehen ist. Ein Schliffbild erlaubt die Bewertung der Schweißnahtstruktur und damit eine Charakterisierung hinsichtlich geometrischer Merkmale wie Einschweißtiefe, Korngrößen oder Breite der Schweißnahtzonen sowie eine Bewertung hinsichtlich verschiedener Fehler und Merkmale, die während des Schweißprozesses entstehen können. Einige Fehler/Merkmale, die insbesondere bei Stumpfstoßverbindungen auftreten können, werden im Folgenden näher erläutert:

Erhöhter Schweißgrat (Merkmal)

Die Bildung eines erhöhten Schweißgrates kann schon während des Schweißprozesses selbst beobachtet werden. Er entsteht auf der Nahtoberseite, wenn das Werkzeug aufgrund einer zu hohen Drehzahl oder einer hohen Schweißkraft zu viel Wärme in die Schweißnaht einbringt. Folglich wird ein Teil des Werkstoffes aus der Schweißzone nach außen gequetscht und lagert sich in Form eines Grates am Rand der Schweißnaht ab. Dieser kann zu einer unerwünschten Kerbwirkung beitragen und muss daher gegebenenfalls entfernt werden, wenn er durch die Variation der Prozessparameter beim Schweißen nicht vermieden werden kann.

Tunnelfehler (Fehler)

Der am leichtesten erkennbare innere Fehler einer Rührreibschweißnaht ist ein so genannter Tunnelfehler (engl.: *worm hole*), der über der ganzen Schweißnahtlänge oder über längere Abschnitte entsteht. Die synonym gebräuchliche Bezeichnung „Schlauchpore“ ist streng genommen irreführend, da eine Pore grundsätzlich ein Erstarrungsphänomen ist und als Begriff aus dem Bereich schmelzschweißend entstandener Nahtfehler übernommen wurde. Der Tunnelfehler beim Rührreibschweißen hingegen wird durch die Anwendung falscher Prozessparameter (KIM ET AL. 2006, S. 252: „Insufficient heat input“) verursacht und zieht sich meist über größere Distanzen oder sogar über die gesamte Nahtlänge hinweg. Er entsteht,

wenn bei ungenügender Prozesskraft die Werkzeugschulter das Material nicht ausreichend in der Naht verdichtet oder wenn durch eine zu geringe Werkzeugdrehzahl das Schweißgut nicht genügend plastifiziert und damit unzureichend durchmischt wird.

Schweißnahteinschnürung (Merkmal)

Ähnliche Nahtmerkmale können sich auch durch eine zu hohe Werkzeugdrehzahl bilden. Dabei findet keine einheitliche Durchmischung der Werkstoffe mehr statt, die sich aufgrund unterschiedlicher Temperaturen an der Werkzeugschulter im Vergleich zum Pin einstellt (KIM ET AL. 2006, S. 252). In der Konsequenz ist die Werkstoffdurchmischung durch den Pin abgetrennt von der der Werkzeugschulter, was im Schliffbild an einer Einschnürung des Nuggets auf der Advancing Side zu erkennen ist (engl.: *nugget collapse*). Tunnelfehler treten dann vorwiegend im Bereich der Nahtoberseite auf.

Unzureichende Durchschweißung (Fehler)

Die Verwendung eines zu kurzen Pins führt zu einer ungenügenden Einschweißtiefe (engl.: *lack of penetration*). Im Schliffbild zeigt sich dieser Fehler als ein von der Nahtwurzel kommender, senkrechter Riss, der dann infolge einer plastischen Verformung während des Schweißprozesses waagrecht in das Nugget mündet. Ein solcher Schweißnahtfehler kann durch eine wurzelseitige Biegeprüfung ebenfalls erkannt werden.

Ungenügende Durchschweißung durch Werkzeugversatz (Fehler)

Ein dem *lack of penetration* ähnlicher Fehler resultiert aus einer Fehlpositionierung des Werkzeuges. Der Schweißstift erfasst in diesem Fall die Fügepartner nicht im Stoß, sondern seitlich versetzt, so dass im Nahtwurzelbereich eine ungenügende Durchschweißung zurückbleibt.

Flaw (Merkmal)

Aluminium bildet an der Atmosphäre stets eine Oxidschicht (KAMMER 2002, S. 428). Wenn diese vor dem Schweißprozess im Bereich der Schweißnaht nicht genügend entfernt wird (v. a. an den Stoßkanten), wird diese Schicht durch den während des Schweißens stattfindenden Materialfluss in die Schweißnahtzone gerührt und kann im Querschliff dann als Al_2O_3 -Phase in Form von vertikal geschwungenen Linien wieder gefunden werden (PALM ET AL. 2003). Diese Linien werden als *flaw* bezeichnet und stellen häufig lediglich nur ein Merkmal und keinen Fehler dar. Die Auswirkungen der Schicht auf die mechanischen Eigenschaften der Verbindung können unterschiedlich sein. Es finden sich in der Literatur Beispiele

ohne Einfluss (BLACH & SENNE 2002), aber auch Schwächungen der Zugfestigkeit um bis zu 10 % am Beispiel einer AW-5454 Legierung (JENE ET AL. 2006). Eine schlechte Anbindung, die aufgrund einer dicken Oxidschicht und zu geringer Prozesswärme während des Schweißens entsteht, wird auch als „Kissing Bond“ bezeichnet.

Decklagenfehler (Merkmal)

Die Kombination einer hohen Werkzeugdrehzahl mit einer relativ geringen Prozesskraft kann theoretisch ebenso viel Prozesswärme erzeugen wie eine geringere Drehzahl mit höherer Anpresskraft des Werkzeuges. In ersterem Fall jedoch besteht die Gefahr, dass der Werkstoff direkt unterhalb der Werkzeugschulter vom übrigen Schweißgut stark abgeschernt wird und vom Werkzeug nicht mehr genügend verdichtet (verschmiedet) werden kann. In Konsequenz entsteht unterhalb der Nahtoberfläche ein Decklagenfehler, der im Englischen auch als *surface galling* bezeichnet wird. Im Gegensatz zum Tunnelfehler bildet dieses Merkmal jedoch keine Fehlstelle über die gesamte Nahtlänge aus.

Eine Zusammenfassung der genannten Fehler und Merkmale ist in Abbildung 9 zu sehen. Diese stellen jedoch nur einen Auszug dar. Eine umfassendere Merkmalsbeschreibung kann in MISHRA & MAHONEY (2007, S. 289 ff.) nachgeschlagen werden.

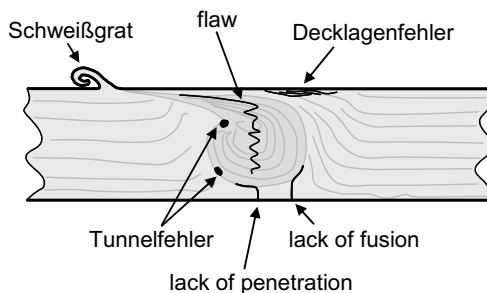


Abbildung 9: Mögliche Merkmale und Fehler bei FSW-Nähten

2.3.4 Härtemessung

Wie in Abschnitt 2.2.1 bereits erläutert wurde, werden während des FSW-Prozesses Wärme- und Verformungsenergie in die Fügepartner eingebracht. Für die einzelnen

Schweißnahtzonen hat dies im Allgemeinen eine Änderung der Härte im beeinflussten Bereich zur Folge. Diese kann durch geeignete Messverfahren nachgewiesen werden. Um die Härte einer Schweißnaht flächig erfassen zu können, bietet sich eine Härtemessung nach Vickers gemäß DIN EN ISO 6507-1 an. Bei dieser Messmethode wird ein Diamant-Eindringkörper mit bestimmter Geometrie über eine festgelegte Zeit mit einer definierten Kraft in das zu messende Material eingedrückt. Das Maß der Härte ergibt sich dann aus einer Konstante, multipliziert mit dem Quotienten aus der Prüfkraft und der Oberfläche des Eindrucks, den der Eindringkörper hinterlassen hat. Die Härte wird schließlich nach folgendem Schema (Abbildung 10) angegeben:

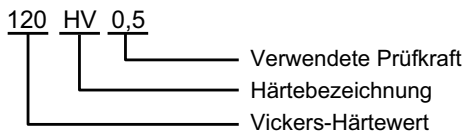


Abbildung 10: Bezeichnung der Vickershärte HV

Der angegebene Wert der Prüfkraft wird in der physikalischen Einheit *kgf* (engl.: *kilogram-force*) angegeben. 1 *kgf* entspricht also etwa 9,81 N.

Bei Anwendung einer entsprechend kleinen Prüfkraft (Kleinkraft- bzw. Mikrohärt; etwa HV 1 und darunter) kann ein detaillierter Härteverlauf über dem Querschliff der Schweißnaht gemessen werden. Die Mindestabstände der einzelnen Härteeindrücke sind dabei ebenfalls in DIN EN ISO 6507-1 festgelegt. Bei einer sehr kleinen Prüfkraft können demnach die Abstände sehr klein gewählt werden, jedoch steigt damit die Streuung der ermittelten Werte aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Vermessung des kleinen Prüfkörpereindrucks sowie der zunehmenden Härtemessung einzelner Körner im Werkstoff. Die Erfahrung zeigt letztendlich für Aluminiumlegierungen bei Prüfkraften von HV 0,2 bis HV 1 brauchbare Ergebnisse.

2.4 Industrieroboter

Robotersysteme sind in unterschiedlichster Weise definiert: Gemäß dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI) ist ein Roboter definiert als „ein universell einsetzbarer Bewegungsautomat mit mehreren Achsen, dessen Bewegungen hinsichtlich Folge

und Wegen bzw. Winkeln frei programmierbar und ggf. sensorgeführt sind“ (VDI RICHTLINIE 2860). Nach einer deutschen Norm ist ein Industrieroboter ein „automatisch gesteuerter, frei programmierbarer Mehrzweck-Manipulator, der in drei oder mehr Achsen programmierbar ist und zur Verwendung in der Automatisierungstechnik entweder an einem festen Ort oder beweglich angeordnet sein kann“ (DIN EN ISO 8373). Beide Definitionen sind sehr weitläufig und umfassen die Kombination beliebig vieler und verschiedener Achsen zu einem beweglichen System. Die Bezeichnung „Industrieroboter“ bzw. „Knickarmroboter“ bezieht sich in dieser Arbeit jedoch stets auf Sechs-Achsen-Knickarmroboter, welche über sechs Freiheitsgrade verfügen.

Im Folgenden werden grundlegende Eigenschaften von Industrierobotern sowie deren Steuerungen erläutert, die für diese Arbeit von Bedeutung sind.

2.4.1 Aufbau

Knickarmroboter besitzen in ihrer Standard-Bauform sechs voneinander unabhängige Drehachsen. Diese werden der Reihenfolge nach von der Basis bis zum Handflansch hin durchnummeriert. Die Achsen A1 bis A3 werden dabei unter der Bezeichnung „Grundachsen“ zusammengefasst und dienen in erster Linie der Translation des Werkzeugbezugspunktes (engl.: *tool center point* – TCP) im Sinne einer groben Vorpositionierung. Die restlichen Achsen A4 bis A6 werden als „Handachsen“ bezeichnet und sind hauptsächlich für die Orientierung des TCP im Raum zuständig. Die genaue Positionierung und Orientierung des TCP im Raum erfordert jedoch das Zusammenspiel aller sechs Achsen.

Auch die Strukturelemente des Roboters besitzen zum Teil von den Herstellern festgelegte, spezielle Bezeichnungen (siehe Abbildung 11): Die Achse 1 bildet das Grundgestell des Roboters, auf dem das Karussell mit der Achse 2 aufgesetzt ist. An dieser ist die Schwinge befestigt, welche in Achse 3 endet. Die Komponente zwischen Achse A3 und A4 wird als Arm bezeichnet, der restliche Teil als Hand des Roboters.

Üblicherweise befindet sich an der Roboterbasis ein Gewichtsausgleichssystem, welches die Schwinge stets in Richtung der vertikalen Position zieht (Befestigung des Roboters am Boden vorausgesetzt). Dieser Gewichtsausgleich dient einer Entlastung des Motors der Achse 2, der sonst stets der Gewichtskraft von Schwinge, Arm und Hand entgegenwirken müsste.

Industrieroboter besitzen neben weiteren frei festlegbaren Koordinatensystemen stets ein so genanntes Weltkoordinatensystem. Dieses ist relativ zum Roboter ortsfest und hat üblicherweise – koaxial zum Grundgestell – auf Höhe der Roboterbasis seinen Ursprung.

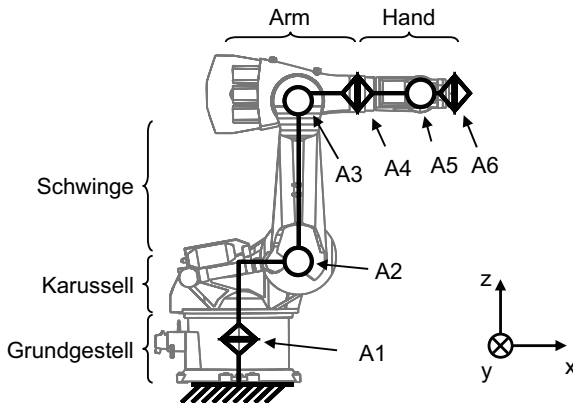


Abbildung 11: Schematischer Aufbau eines Industrieroboters und Weltkoordinatensystem, welches sich im Grundgestell des Roboters befindet

2.4.2 Bewegungsplanung eines Roboters

Die Bewegungsplanung bildet das Herzstück einer Robotersteuerung. Durch sie werden im Programm definierte Stützpunkte in Verfahrbewegungen des Roboters umgewandelt, für die in der Regel alle sechs Achsen gleichzeitig angesteuert werden müssen.

Bewegungsarten

Ein Roboterprogramm besteht neben den Befehlen für die Interaktionen mit der Umgebung im Wesentlichen aus mehreren Punkten, die nacheinander angefahren werden. Die meisten Robotersteuerungen stellen wenigstens drei grundsätzliche Bewegungsarten zur Verfügung. Die einfachste Möglichkeit ist dabei eine PTP-Bewegung (*Point-to-Point*), bei der alle Achsen des Roboters gleichzeitig und mit ähnlichen Fahrprofilen angesteuert werden. Die Bahn des TCP ist bei dieser Bewegungsart nicht vorgegeben, weshalb sie für eine exakte Werkzeugführung ungeeignet ist. Bei einer LIN-Bewegung des Roboters führt der TCP eine geradlinige Bewegung mit definiertem Beschleunigungs- und Abbremsverhalten

zwischen dem Start- und dem Endpunkt aus. Für eine Kreis- oder Zirkularbewegung (CIRC) wird neben dem Start- und Endpunkt noch ein weiterer Stützpunkt benötigt, durch den eine Kreisbahn eindeutig definiert ist. Der TCP folgt dann dieser Kreisbahn ebenfalls mit vorgegebenen Beschleunigungs- und Abbremswerten.

Interpolation

In einem Roboterprogramm wird üblicherweise eine Abfolge dieser Bewegungsarten durch Stützpunkte definiert. Mit Hilfe von Interpolationsalgorithmen können von der Robotersteuerung Zwischenpunkte berechnet werden, die innerhalb vorgegebener Zeitintervalle angefahren werden. Die Zwischenpunkte sind dabei als Raumpunkte mit zugehöriger Orientierung, also durch sechs Variablen, festgelegt. Somit entsteht eine Reihe diskreter Punkte, die durch den Roboter angefahren werden.

Inverse Kinematik

Da die programmierten Raumpunkte normalerweise in Form von kartesischen Koordinaten angegeben sind, müssen diese mit Hilfe einer „inversen Kinematik“ transformiert werden. Dabei handelt es sich um ein mathematisches Modell des Roboters, durch das die kartesischen Raumpunkte in Achswinkel des Roboters umgerechnet werden.

Bahnplanung

Die von der inversen Kinematik ermittelten Achsstellungen werden schließlich von der Bahnplanung in Fahrprofile für die sechs Achsen umgewandelt. Dadurch entsteht eine gleichförmige Bewegung des Roboters nach den gewünschten Vorgaben durch die Stützpunkte und in den angegebenen Bewegungsarten.

Überschleifen von Bewegungen

Normalerweise sieht eine Robotersteuerung für jeden Fahrbefehl durch PTP, LIN oder CIRC eine Beschleunigung aus dem Stillstand am Startpunkt sowie eine negative Beschleunigung bis zum Stillstand am Zielpunkt vor. Häufig jedoch müssen Werkzeuge mit einer festgelegten Geschwindigkeit über ein Bauteil geführt werden, um einen stationären Prozess, beispielsweise einen Schweißprozess, ausführen zu können. Da die Verfahrrichtung des Werkzeuges an den Stützpunkten nicht mit unendlich hoher Beschleunigung geändert werden kann (siehe Abbildung 12 im Punkt P2), wird die Möglichkeit des Überschleifens benötigt. Das Werkzeug kann nach dadurch festgelegten Kriterien, beispielsweise bei einer vorgegebenen Überschleifdistanz d_{ii} , die programmierte Bahn tangenstenstetig verlassen, um in den

nachfolgenden Bewegungssatz ebenfalls tangential übergeführt zu werden. Diese Strategie erlaubt die Einhaltung vorgegebener Bahngeschwindigkeiten, jedoch kann die Bahn selbst nicht mehr exakt abgefahren werden, wie Abbildung 12 am Beispiel einer LIN-Bewegung mit anschließender CIRC-Bewegung verdeutlicht. Auch das Verhalten des TCP kann bei Überschleifbewegungen vom Anwender nicht mehr genau festgelegt werden.

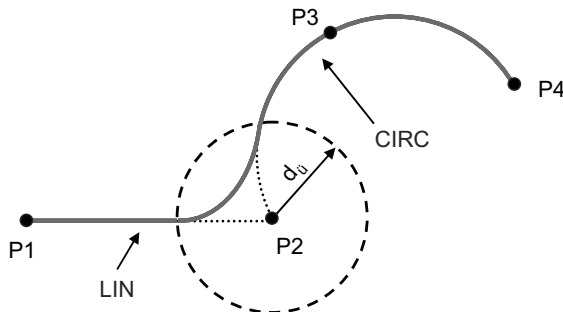


Abbildung 12: Überschleifbewegungen zwischen zwei Fahrbefehlen

2.4.3 Steifigkeiten im Raum

Grundsätzlich setzt sich die Gesamtnachgiebigkeit eines Systems aus den Einzelnachgiebigkeiten der Komponenten in Verbindung mit deren relativer Anordnung zusammen. Im Falle eines seriellkinematischen Industrieroboters bedeutet dies eine Reihenschaltung der Strukturteile von der Basis bis zum Handflansch, die über die einzelnen Gelenke miteinander verbunden sind.

WEIGOLD (2008, S. 63 ff.) untersucht die Gesamtnachgiebigkeit eines Industrieroboters mit einer Handhabungskapazität von 130 kg. Hierzu werden Kräfte aus unterschiedlichen Richtungen in verschiedenen Posen des Roboters auf den Flansch aufgebracht und die Verschiebungen der Einzelkomponenten gemessen. Es wird gezeigt, dass bei einem sehr geringen Abstand des TCP von der Roboterbasis die Strukturverformung in der Hauptsache für die Gesamtnachgiebigkeit des Systems verantwortlich ist. Befindet sich jedoch der TCP weit von der Roboterbasis entfernt, tragen die Nachgiebigkeiten der Getriebe den größten Teil zur Gesamtverlagerung des TCP bei. Daraus lässt sich folgern, dass Industrieroboter in Abhängigkeit von Pose und Belastungsrichtung extrem unterschiedliche Steifigkeiten aufweisen, infolge derer sich das Gesamtsystem bei

Belastung in sehr unterschiedlicher Weise elastisch verformt. Dies wird insbesondere dadurch deutlich, dass Robotergetriebe in den Gelenken über sehr viel höhere Kippsteifigkeiten als Drehsteifigkeiten verfügen. Im Falle von Schwerlastrobotern ist anzunehmen, dass die Gesamtnachgiebigkeit stärker von den Getrieben abhängig ist, da die Strukturteile sehr viel massiver dimensioniert sind als bei einem Roboter mit mittlerer Handhabungskapazität.

3 Stand der Technik

3.1 Allgemeines

Im diesem Kapitel wird der Stand von Forschung und Technik unter verschiedenen Aspekten betrachtet, die sich auf die Themen der Robotik und/oder des Rührreibschweißens beziehen. Neben der FSW-tauglichen Anlagentechnik werden demnach speziell auch Entwicklungen beschrieben, welche das Rührreibschweißen mit Robotern ermöglichen bzw. deren Anwendungsbereich erweitern.

3.2 FSW-Anlagen

Wie in Kapitel 1 erwähnt, wurde das Rührreibschweißverfahren 1991 erfunden. Seitdem wurden zur Anwendung des Prozesses unterschiedliche Anlagen benutzt. Diese bestanden teils aus Standard-Werkzeugmaschinen, für spezielle Zwecke werden häufig jedoch besondere Anlagen aufgebaut, die den jeweiligen Anforderungen hinsichtlich des Prozesses und der Schweißaufgabe gerecht werden. Aufgrund hoher Investitionskosten, die für diese Anlagen erforderlich sind, werden auch Robotersysteme mit entsprechend geringerem finanziellem Aufwand für das Rührreibschweißen untersucht und eingesetzt. Somit lässt sich eine breite Palette an Anlagen ableiten, die sich hinsichtlich ihrer Steifigkeit und Investitionskosten qualitativ wie folgt einteilen lassen (Abbildung 13):

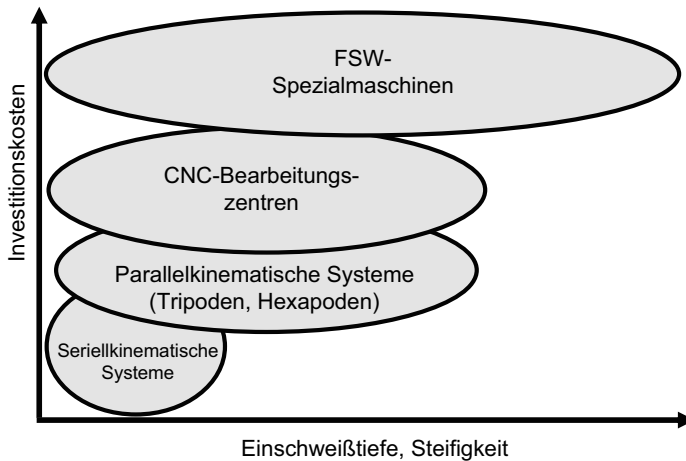


Abbildung 13: Klassifizierung von FSW-fähigen Anlagen

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal stellt die Flexibilität der Schweißanlage dar. Diese kann bei CNC-Bearbeitungszentren je nach Anzahl der beweglichen Achsen von „gering“ für einfache geradlinige Nähte bis „sehr hoch“ für dreidimensionale Schweißnahtverläufe reichen. Robotersysteme bieten hingegen aufgrund ihrer bauartbedingten Mehrachsigkeit stets eine hohe Flexibilität.

3.2.1 Spezialanlagen

Die ersten Anwendungen des Rührreibschweißens waren meist mit relativ einfachen Nahtgeometrien verbunden. Bei dem eingangs erwähnten Beispiel aus dem Schiffbau beträgt die Einschweißtiefe zum Verschweißen von Werkstücken entlang gerader Stoßkanten zwar lediglich einige Millimeter, eine Nahtlänge von 16 m erlaubt aber nicht den Einsatz konventioneller Werkzeugmaschinen. Zudem können in die aufgebaute Spezialanlage mehrere Schweißköpfe integriert werden, die jeweils in der Mitte der Fügelinie starten und nach außen bis zum Rand hin schweißen (KALLEE ET AL. 2002, S. 7). Dadurch konnte die Produktivität der Anlage gegenüber einem Aufbau mit nur einem Schweißkopf signifikant gesteigert werden.

Ein weiteres Beispiel für einfache Nahtgeometrien sind große Orbitalnähte, wie sie zum Verschweißen von Treibstofftanks in der Raumfahrtindustrie erforderlich sind. Üblicherweise wird zum Schweißen dieser Nähte das Werkzeug in einer raumfesten

Position gehalten, während die zylindrischen Fügepartner rotieren (ESAB 2005, S. 1; KALLEE ET AL. 2003, S. 6, 8 f.; GTC 2004). Auch die Ausführung mit einem rotierenden Schweißkopf wurde realisiert (GOTO ET AL. 2005, S. 3). In beiden Fällen wurden Spezialanlagen aufgebaut, die an die zu verschweißenden Durchmesser von meist mehreren Metern optimal angepasst sind.

Hohe Einschweißtiefen erfordern entsprechend hohe Anpresskräfte des Werkzeuges. Auch für diese Anwendungen werden üblicherweise Schweißanlagen aufgebaut, die diese Kräfte aufbringen können. Ein Beispiel hierfür bietet eine Anlage, mit der Behälter für Nuklearabfälle fehlerfrei und „einlagig“ verschweißt werden können. Dabei sind eine Einschweißtiefe von 50 mm in Kupfer und Anpresskräfte des Werkzeuges von 70 bis 100 kN (CEDERQVIST 2004, S. 2) erforderlich. Abbildung 14 zeigt die Schweißanlage, bei der die Fügepartner feststehen und der Schweißkopf bewegt wird.



*Abbildung 14: Anlage zum Rührreibschweißen von Behältern für Nuklearabfall
(CEDERQVIST 2006)*

Die erwähnten Anlagentypen sind stets für eine spezielle Schweißaufgabe ausgelegt. Zu Forschungs- und Entwicklungszwecken wurden auch Anlagen aufgebaut, deren Leistungsfähigkeit noch höher ist. Meist dienen diese Anlagen lediglich Laborzwecken und sind daher in ihren Freiheitsgraden auf einfache Nahtgeometrien beschränkt. Eine Ausnahme stellt eine Versuchsanlage dar, die 2005 am TWI in Yorkshire in Betrieb gegangen ist. Dabei handelt es sich um eine „PowerStir“-Anlage der Firma Crawford Swift, welche über einen Verfahrbereich von 6 m x 3 m verfügt. Mit Hilfe von zwei Schweißköpfen kann dabei eine Einschweißtiefe von 100 mm in einem Durchgang von zwei Seiten her erreicht

werden, wobei zwölf programmierbare Achsen für eine ausreichende Bewegungsflexibilität sorgen. Insgesamt können mit dieser Anlage Prozesskräfte von bis zu 150 kN aufgebracht werden (TWI 2008). Mit Hilfe einer solchen Anlage kann der Prozess hinsichtlich hoher Einschweißiefen und der Prozessfähigkeit für Materialien mit Bedarf an hohen Anpresskräften, wie beispielsweise Stahl, untersucht werden.

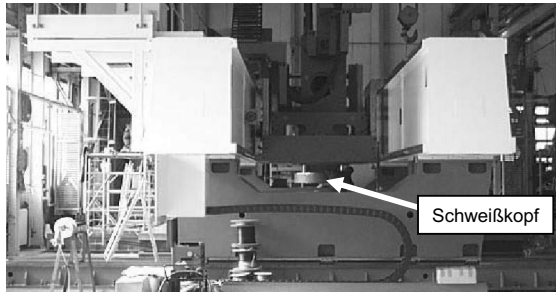


Abbildung 15: FSW-Versuchsanlage am TWI (KALLEE & WAYNE 2005)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Spezialanlagen für unterschiedliche Zwecke aufgebaut werden: Eine Gruppe wird für spezielle Schweißaufgaben gebaut, bei denen die Fügepartner entweder besondere Abmessungen besitzen oder bei denen der Prozess mit Hilfe mehrerer Schweißköpfe hinsichtlich der Bearbeitungsgeschwindigkeit optimiert ist, um die Fügeteile effizient bearbeiten zu können. Die andere Gruppe besteht aus Laboranlagen, die über extreme Leistungskennndaten verfügen. Mit diesen Maschinen und entsprechend angebrachter Sensortechnik kann der Prozess untersucht werden, um das Verfahren weiter zu verstehen und es auf andere Materialien und Einschweißiefen übertragen zu können. Diese Sonderanlagen sind daher nicht durch Robotersysteme ersetzbar, da diese die bestehenden Anforderungen nicht bzw. nur mit zusätzlichen Bewegungsachsen erfüllen können.

3.2.2 CNC-Maschinen

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, besteht der FSW-Prozess darin, dass ein rotierendes Werkzeug mit einer axialen Anpresskraft über eine vorgegebene Kontur geführt wird. Diese Anforderungen können im Grunde auch herkömmliche Fräsmaschinen und CNC-gesteuerte Bearbeitungszentren erfüllen (EIREINER 2004;

FRATINI & PIACENTINI 2006; MERKLEIN ET AL. 2005). Diese besitzen je nach Bedarf bis zu fünf Achsen, wodurch der FSW-Prozess dreidimensional geführt werden kann. Durch die Möglichkeit einer spanenden Vor- und Nachbearbeitung können die Fügeteile theoretisch in einer Aufspannung fertig bearbeitet werden. Diese Maschinen sind jedoch meist mit einer Standardsteuerung ausgerüstet, für das Zerspanen von Metall ausgelegt und besitzen daher in der Regel auch keine Möglichkeit eines kraftgesteuerten (Schweiß-)Betriebes. Dadurch kann für die anstehenden Schweißaufgaben lediglich ein positionsgesteuerter Betrieb realisiert werden, weswegen die Fügepartner extrem genau eingespannt werden müssen, um eine zu hohe oder zu tiefe Werkzeugposition zu vermeiden. Forschungsseitig wird daher versucht, eine Kraftregelung anhand interner Prozessgrößen zu implementieren (GEBHARD & ZAEH 2008), wodurch dieser Nachteil umgangen werden soll.

FRATINI & PIACENTINI (2006) untersuchten das Schweißen von Rohrstücken unter Zuhilfenahme einer positionsgesteuerten 4-Achsen-CNC-Maschine. Als Untersuchungsobjekte standen unter anderem Rohrabschnitte der Legierung AW-6016-T4 mit einem Außendurchmesser von 80 mm und einer Wandstärke von 3 mm zur Verfügung. Die Versuche umfassten dabei sowohl geradlinige Schweißnähte parallel zur Längsachse der Werkstücke als auch 3D-Schweißungen auf der Mantelfläche mit s-förmigem Verlauf. Um innere Nahtfehler während des Schweißens zu vermeiden, wurde eine sehr hohe Eintauchtiefe des Werkzeuges mit etwa 0,35 mm gewählt. Für Festigkeitsuntersuchungen wurden kurze Rohrabschnitte der geschweißten Proben mit einem Konus gespreizt. Die Festigkeiten der erzeugten Schweißnähte lagen bei lediglich 35 % im Vergleich zum Grundwerkstoff, wofür eine unzureichende Spannvorrichtung verantwortlich gemacht wurde. Zufriedenstellende Ergebnisse konnten im Rahmen der Untersuchungen jedoch nicht erreicht werden. Auch die hohe Einschweißtiefe dürfte für diese Ergebnisse verantwortlich sein, da der Verbindungsquerschnitt dadurch signifikant reduziert wird.

Ein anderes Beispiel für das Fügen von Rohren mittels FSW ist in SHINODA ET AL. (2001, S. 4) vorgestellt. Diese Arbeit zeigt eine geschweißte Aufhängung aus dem PKW-Bereich, bei der ein Endstück an ein zylindrisches Rohr geschweißt wird. Das Rohr besitzt dabei einen Durchmesser zwischen 20 und 30 mm und wird während des Schweißvorganges am Werkzeug vorbeirotiert. Die Vorschubbewegung geschieht in diesem Falle also über das Werkstück, während das Werkzeug ortsfest bleibt. Angaben zu den verwendeten Werkzeugen oder Prozessparametern werden von den Autoren nicht zur Verfügung gestellt. Ein weiteres Beispiel für das Fügen

von Rohren mit einem Durchmesser von etwa 100 mm und identischer Kinematik ist in DUBOURG ET AL. (2008) zu finden.

Das Schweißen dreidimensionaler Konturen mit Hilfe einer Werkzeugmaschine wurde von HIRANO ET AL. (2001) gezeigt. Die verwendete Bettfräsmaschine ist dabei in Kreuztischbauweise ausgeführt. Eine Modifikation zur Integration einer Kraftregelung ist hier nicht erwähnt. Anhand fünf charakteristischer Beispielgeometrien wurde dokumentiert, dass die Anlage fähig ist, Aluminiumbauteile weich- bis mittelfester Legierungen in einem Dickenbereich zwischen 1 und 10 mm zu verschweißen. Eine dieser Schweißaufgaben ist durch eine konvex-konkav gebogene Blechkontur gegeben, bei der die Radien 95 mm im konvexen Teil und 105 mm im konkaven Teil der Bleche betragen. Die Schweißebene wird dabei bis auf einen Maximalwert von 45° im Vergleich zur Horizontalen gekippt. Dieser Winkel stellt maschinenbedingt zugleich die maximale Verkippung der Werkzeugspindel in dieser Richtung dar. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde gezeigt, dass mit der verwendeten Maschine fehlerfreie Rührreischweißnähte erzeugt werden können. Kleinere Radien als die erwähnten wurden dabei jedoch nicht untersucht.

3.2.3 Tripoden

Unter den Robotersystemen kann neben so genannten pick-and-place-Robotern zwischen seriellkinematischen und parallelkinematischen Systemen („Tripoden“) unterschieden werden, welche bei ausreichender Traglast für den FSW-Prozess geeignet sind. Bei Tripoden wird die grobe Translation des TCP nicht über drei serielle Grundachsen realisiert, sondern über drei Linearachsen, die sich in paralleler Anordnung zueinander befinden. Dadurch wird eine erhöhte Grundsteifigkeit des Systems sowie eine höhere Bahntreue unter äußerer Belastung erreicht.

Grundsätzlich besitzen Tripoden wie auch Industrieroboter eine Bewegungsfähigkeit in sechs Freiheitsgraden, wodurch sie für Schweißaufgaben im dreidimensionalen Raum geeignet sind. Die Vorteile dieser Maschinen gegenüber Knickarmrobotern werden dabei in zahlreichen Arbeiten herausgestellt. Zwei Beispiele hierfür sind in SHEIKHI & DOS SANTOS (2006, S. 19) und STROMBECK ET AL. (2000, S. 3) gegeben. Der kraftgeregelter Betrieb kann je nach Steuerung der Anlage mit oder ohne Zusatzachse erfolgen (WULFSBERG ET AL. 2004a, S. 5 f.; ZHAO ET AL. 2007). Die Praxistauglichkeit dieser Maschinen wird darüber hinaus auch in STROMBECK ET AL. (2000, S. 19) unter Beweis gestellt, wo die 3D-FSW-

Schweißung einer Automobil-Strukturkomponente aus Mg-Guss gezeigt wird. Eine weitere Anwendung aus dem Automobilbau ist in MEYER & SCHILLING (2007) zu finden. Hier werden Tailored Blanks für einen deutschen Sportwagen beschrieben, die mittels eines Tripoden rührreibgeschweißt wurden.

Je nach Bedarf und Anwendungsfall existieren unterschiedliche Handhabungsklassen, also Baugrößen von Tripoden. Kleinere Modelle besitzen dabei Handhabungskapazitäten von ca. 100 kg, wobei sie Prozesskräfte von bis zu 10 bis 15 kN erzeugen können (COOK ET AL. 2004; STROMBECK ET AL. 2000, S. 3; ZHAO ET AL. 2007, S. 5553). Größere Modelle können dagegen Prozesskräfte in Richtung der drei parallelen Linearachsen von bis zu 45 kN aufbringen (STROMBECK ET AL. 2000, S. 3). Seit etwa 2005 existiert ein weiterer Parallelkinematik-Roboter der spanischen Firma PKM Tricept. Der so genannte Tricept 9000 besitzt gegenüber seinen Vorgängern einen vergrößerten Arbeitsraum und wurde ursprünglich zur 5-Achs-Zerspanung von Stahl- und Titanwerkstoffen entwickelt (PKM 2008). Auf seine Fähigkeiten zum Rührreibschweißen wird durch MEYER & SCHILLING (2007) hingewiesen. Über das Schweißen dünnwandiger Tailored Blanks hinaus ist dieses Modell für Einschweißtiefen von bis zu 20 mm an Bauteilen mit maximalen Abmaßen von bis zu 3,5 m x 5,0 m x 0,9 m (Breite x Höhe x Tiefe) geeignet (RIFTEC 2008).

Trotz einer scheinbar hohen Fähigkeit zur 3D-Bearbeitung existieren für diese Roboter zwei Nachteile: Die erwähnten maximalen Prozesskräfte können lediglich in der Hauptrichtung der drei parallelen Linearachsen aufgebracht werden. Bei einer anderen Orientierung des Werkzeuges sinken demnach diese Obergrenzen wieder signifikant. Wie bei WULFSBERG ET AL. (2004b, S. 463) beschrieben, variiert damit auch die Steifigkeit des Systems in Abhängigkeit der Orientierung bis zu einem Faktor von 15. Der zweite Nachteil von Tripoden bezieht sich auf deren Arbeitsraum, der bauartbedingt einem schüsselförmigen Bereich ähnelt (STROMBECK ET AL. 2000, S. 4). Dadurch ist sowohl die bearbeitbare Bauteilhöhe wie oben beschrieben stark eingegrenzt als auch die 3D-Fähigkeit dieser Systeme nur eingeschränkt gegeben.

3.2.4 Knickarmroboter

Aufgrund ihrer relativ geringen Steifigkeit im Vergleich zu FSW-Anlagen oder parallelkinematischen Systemen ist der Anwendungsbereich für Knickarmroboter zum FSW stark eingeschränkt. Dennoch machen sie eine hohe Flexibilität sowie geringere Anschaffungskosten gegenüber anderen 3D-fähigen Systemen (SHEIKHI &

DOS SANTOS 2006, S. 19) zu einer attraktiven Alternative. Auch die Größe der zu bearbeitenden Bauteile kann prinzipiell beliebig hoch sein, solange die Schweißstellen für den Roboter erreichbar sind. Industrieroboter besitzen standardmäßig keine Schutzumhausung, wie dies bei CNC-Bearbeitungszentren aufgrund der Spanbildung während der üblichen Fräsprozesse erforderlich ist. Stattdessen werden an den Roboter und die Bearbeitungsaufgabe angepasste Schutzzäune oder andere Schutzeinrichtungen aufgestellt. Zudem gibt es bei Knickarmrobotern bauartbedingt keine erheblichen Einschränkungen in der Bewegungsfreiheit einer Achse, was hingegen auf Tripoden zutreffen kann. Dennoch ist zu erwähnen, dass die geringen Steifigkeiten eine Kraftregelung in Axialrichtung des Werkzeuges zwingend erforderlich machen (SMITH 2000). Zudem ist im allgemeinen Fall auch eine Abweichung des Werkzeuges von der programmierten Position in der Schweißebene zu erwarten (VOELLNER ET AL. 2006, S. 7). Während dies in Richtung des Vorschubes bei einfachen, ebenen Schweißnähten unproblematisch ist, können diese Abweichungen in der dazu normalen (seitlichen) Richtung zu gravierenden Nahtfehlern aufgrund mangelnder Durchschweißung führen (VOELLNER ET AL. 2007, S. 350).

In den vergangenen Jahren konnten die Handhabungskapazitäten für Industrieroboter weiter erhöht werden. Somit ist eine Kapazität von 500 kg bereits Standard bei vielen Roboterherstellern mit hohem Marktanteil wie der Firma ABB AG oder der Firma KUKA Roboter GmbH. Die derzeitige Obergrenze für einen kommerziellen 6-Achsen-Knickarmroboter liegt mit dem KR1000 der Firma KUKA Roboter GmbH bei 1000 kg. Dieser ist für das Handling ganzer Karosserieteile oder schwerer Gussstücke ausgelegt. Die in den Handhabungskapazitäten angegebenen Massen können dabei mit voller Beschleunigung bewegt werden. Unter der Berücksichtigung, dass der Rührreibschweißprozess von einer relativ geringen Bewegungsdynamik des rotierenden Werkzeuges gekennzeichnet ist, bedeutet dies, dass diese Schwerlastroboter während des Schweißens mit Anpresskräften arbeiten können, die über der entsprechenden Obergrenze der Handhabungskapazität liegen. So wird in VOELLNER ET AL. (2006) gezeigt, dass ein in den Grundachsen modifizierter Schwerlast-Knickarmroboter bei mittlerer Entfernung des TCP von der Roboterbasis Kräfte von bis zu 10 kN in jede kartesische Richtung aufbringen kann. Unter gewissen Voraussetzungen sind Standard-Industrieroboter sogar in der Lage, Prozesskräfte jenseits von 10 kN zu erzeugen (SMITH & HINRICHS 2006, S. 3 ff.). Damit konnte eine Einschweißtiefe von 25,4 mm in einer AW-6061-T6-Legierung erreicht werden. Diese Ergebnisse gelten jedoch ausschließlich unter Anwendung

eines speziell ausgelegten Werkzeuges und Prozessparametern mit sehr hoher Wärmeeinbringung (hohe Werkzeugdrehzahl, niedriger Vorschub) sowie einer Schweißposition, welche sehr nahe an der Roboterbasis ist. Die Werkzeugorientierung muss dabei so gewählt werden, dass die Hebelarme des Werkzeuges bezogen auf die Robotergrundachsen ein möglichst geringes Drehmoment und damit eine entsprechend geringe Belastung in diesen verursachen.

3.3 Werkzeugentwicklung für Roboter

Wie bereits erwähnt, stellt die Prozesskraft, mit der das Werkzeug auf die Fügestelle gepresst werden kann, für Robotersysteme den kritischsten und damit limitierenden Faktor dar. Deshalb wurden (nicht nur) für Roboter Werkzeugkonzepte entwickelt, die eine Verringerung der Anpresskräfte durch die das Werkzeug führende Anlage erlauben. Die geringe Steifigkeit des Roboters bewirkt zudem ein eventuell instabiles Schwingungsverhalten des Roboters, der durch den Schweißprozess selbst angeregt wird.

Bobbin Tool

Eine Möglichkeit, axiale Prozesskräfte von der Schweißanlage fernzuhalten, liegt darin, die wirkenden Prozesskräfte im Werkzeug selbst zu halten. So wurde durch die Idee, die sonst erforderliche Spanntechnik zu eliminieren, ein Werkzeug mit einer Doppelschulter entwickelt (SCHUTZRECHT WO0002699). Dabei besitzt dieses so genannte „Bobbin Tool“ neben den in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Charakteristika eine zweite Schulter, die mit dem Werkzeug mitgeführt wird und auf der Unterseite der Fügestelle ebenfalls unter Rotation gegen die oben liegende Schulter gezogen wird (Abbildung 16). Um das wirkende Reibmoment zu kompensieren, können die beiden Schultern gegenläufig rotieren. Damit muss die Schweißanlage selbst beinahe nur noch die Prozesskräfte normal zur Werkzeugachse sowie die eventuell noch vorhandenen Reibmomente aufbringen. Dadurch ist dieses Werkzeugkonzept grundsätzlich auch für Roboter geeignet (WULFSBERG ET AL. 2004b). Ein weiterer Vorteil liegt in der sicheren Vermeidung eines *lack of penetration*. Das Bobbin Tool findet bereits Anwendung beim Schweißen der in Kapitel 1 erwähnten Raketentanks (GOTO ET AL. 2005). Vergleichende Untersuchungen zu konventionellen Werkzeugen zeigen, dass die Anwendung des Bobbin Tools je nach geschweißter Legierung bzw. Wärmebehandlungszustand durchaus Festigkeitswerte hervorbringt, die auch mit den konventionellen Rührreischweißverbindungen erreicht werden (MARIE ET AL. 2004). Tendenziell jedoch scheinen diese Werkzeuge eher geringere

Festigkeitswerte zu erzeugen (LAFLY ET AL. 2006). Der Grund hierfür dürfte im Werkzeugkonzept selbst liegen: Der Schweißpin muss beim Bobbin Tool neben den reinen Prozesskräften auch die gesamte Anpresskraft der rückseitigen Werkzeugschulter aufbringen. Dadurch ist dieser mit einem entsprechend höheren Durchmesser ausulegen, was wiederum eine breitere Fügezone zur Folge hat. Zudem wird durch die nun zwei Werkzeugschultern mehr Wärme in den zu schweißenden Werkstoff eingebracht, wodurch die Wärmeeinflusszone der Schweißnaht weiter vergrößert wird. Eine höhere Schweißgeschwindigkeit kann im Vergleich zu konventionellen Werkzeugen ebenfalls nicht realisiert werden, da sonst die Gefahr des Pinbruchs infolge der erhöhten Belastungen bestehen würde (MARIE ET AL. 2004, S. 8). Weiter gestaltet sich der Beginn eines Schweißvorganges häufig schwierig, da das Werkzeug zunächst in einen passenden vorgebohrten Durchbruch eingeführt werden muss, ehe die Gegenschulter montiert werden kann.

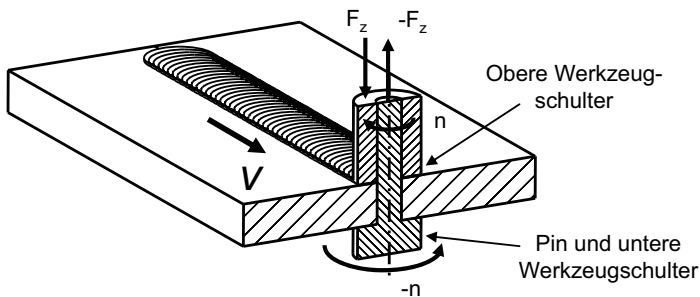
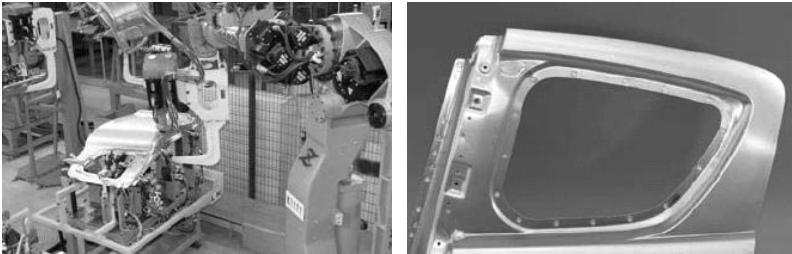


Abbildung 16: Bobbin Tool mit gegenläufig rotierenden Schultern

Punktschweißzange

In Anlehnung an das weit verbreitete Widerstands-Punktschweißverfahren wurde auch für das Rührreibschweißen eine entsprechende Zange entwickelt (SCHUTZRECHT EP1415753), teilweise sogar explizit für die Handhabung durch Roboter (SCHUTZRECHT EP1437193). Eine entsprechende robotergeführte Anwendung hierzu findet sich bei der Produktion eines japanischen Automobils, siehe Abbildung 17 (KALLEE & WAYNE 2005, S. 2; MACHINE DESIGN 2004). Das Gegenlager zum rotierenden Werkzeug wird hierbei über eine stabile C-Rahmen-Konstruktion dargestellt. Diese Technologie konnte später weiterentwickelt werden, indem das vom Werkzeugpin verdrängte Material durch eine vertikale Schulterbewegung zunächst aufgefangen und beim Zurückziehen des Schweißpins

wieder in das Endloch zurückgedrückt wird (SCHUTZRECHT EP1690628). Limitierend bei diesem Werkzeug ist jedoch die Erreichbarkeit der Fügestelle. Diese darf nicht weiter vom Bauteilrand entfernt sein als die Kraglänge des Werkzeugrahmens. Zudem können mit diesem Werkzeug lediglich Punktschweißungen ausgeführt werden.



*Abbildung 17: Links: Roboterassistiertes Rührreib-Punktschweißen;
rechts: geschweißtes Bauteil (KALLEE & WAYNE 2005)*

Werkzeugweiterentwicklungen mit konventionellen Charakteristika

Eine weitere Möglichkeit, den FSW-Prozess auf Knickarmroboter zu übertragen, bietet sich in der Weiterentwicklung konventioneller einschultriger Werkzeuge. In SHEIKHI & DOS SANTOS (2006) wird daher vorgeschlagen, die Werkzeuge zu verkleinern, um die Prozesskräfte reduzieren zu können. Die erforderliche Prozesswärme, die aus der verkleinerten Werkzeugschulter sowie der geringeren Anpresskraft resultiert, kann mit höheren Werkzeugdrehzahlen kompensiert werden. So konnte anhand von Schweißversuchen an einer 1,5 mm dicken Aluminiumlegierung gezeigt werden, dass die sonst üblichen Prozesskräfte von 5 kN auf etwa 1 bis 2 kN reduziert werden können. Dieser Ansatz birgt jedoch auch Risiken, welche die Anwendbarkeit dieser Werkzeuge mit Industrierobotern wiederum einschränken. Bei verkleinerten Schulterdurchmessern muss auch der Werkzeugpin entsprechend kleiner gestaltet werden, um für die Schulter eine ausreichende Reibfläche bereitstellen zu können. Infolge des kleinen Pindurchmessers muss der Prozess umso genauer geführt werden, damit das Werkzeug den vollen Fügestoß erfassen kann (Risiko eines *lack of fusion*). Eine entsprechend genaue Programmierung des Roboters ist jedoch sehr aufwändig, zumal das Werkzeug stets durch die wirkenden Prozesskräfte aus seiner programmierten Position ausweicht. Eine zweite Folge des verringerten Werkzeugpindurchmessers ist eine reduzierte maximale Einschweißtiefe, denn es

muss eine zu hohe Biegebeanspruchung des Pinwerkstoffes während des Schweißprozesses vermieden werden. Damit ist der oben genannte Vorschlag zwar sehr effizient, die Anwendbarkeit auf reale Schweißaufgaben erscheint im Hinblick auf den Einsatz von Knickarmrobotern aber sehr fragwürdig.

FSW mit Industrierobotern

Eine Schweißanlage, die auf einem Industrieroboter basiert, wurde erstmals im Jahr 2000 vorgestellt (SMITH 2000). Benutzt wurde damals ein Standardsystem mit einer Handhabungskapazität von 200 kg zur Untersuchung der Anwendbarkeit einer solchen Anlage für das FSW. Eine provisorische Kraftregelung wurde unter Zuhilfenahme der Motorströme realisiert, durch die Rückschlüsse auf die axiale Anpresskraft des Werkzeuges gezogen werden konnten. Es konnte gezeigt werden, dass Industrieroboter prinzipiell zum Rührreibschweißen genutzt werden können, allerdings mit folgenden Einschränkungen:

- Es konnten nur spezielle Schweißpositionen realisiert werden, ansonsten bestand die Gefahr der Anregung des Roboters zu Eigenschwingungen.
- Die Prozesskräfte führen zu großen Abweichungen des TCP von der programmierten Sollposition.
- Die Schweißgeschwindigkeit muss auf maximal 600 mm/min begrenzt werden, da ansonsten die Maximalbelastung der Getriebe überschritten worden wäre.
- Die Anwendung des Roboters bei einer AW-6061-T6-Legierung ist bis zu einer Einschweißtiefe von maximal 3 mm möglich.

Zusammenfassend sind die Ergebnisse dieser Studie als sehr innovativ zu bewerten, da FSW-Nähte erfolgreich und reproduzierbar mit einem Knickarmroboter hergestellt werden konnten. Die oben genannten Bedingungen erlauben die Anwendung von Industrierobotern allerdings nur in einem sehr eingeschränkten Bereich. Um diesen zu erweitern, wurde in den folgenden Jahren ein Roboter mit einer höheren Handhabungskapazität von 500 kg verwendet (SMITH ET AL. 2003a; SMITH ET AL. 2003b). Hier wurde im Rahmen einer Anwendungsstudie die Bearbeitung eines PKW-Strukturteiles untersucht, bei dem an ein Strangpressprofil mit rechteckigem Querschnitt (Werkstoff: AW-6063-T4) diverse Anschlussbleche aus einer AW-6061-T6 Legierung geschweißt werden. Die Schweißnähte sind hier überwiegend als Überlappverbindungen mit einer Einschweißtiefe von drei bis vier Millimetern in Form von kurzen Steppnähten ausgeführt. Mit derartigen

Schweißverbindungen rückt eine exakte Positionierung des Werkzeuges auf den Fügepartnern in den Hintergrund, da die Positionierungstoleranz bei Überlappnähten weit unkritischer ist als bei Stumpfstoßverbindungen. Weitere Angaben zu den Schweißbedingungen sowie der Last auf den Roboter wurden nicht zur Verfügung gestellt, es wurde lediglich eine Prozesskraft von etwa 6 kN genannt (SMITH ET AL. 2003a, S. 7). Eine anschließende Kostenrechnung zeigt, dass insbesondere das robotergestützte Rührreischweißen eine günstige Alternative zu Schutzgasschweißverfahren und FSW mit CNC-Anlagen darstellt. Eine weiterführende Anwendung von Robotern zum Rührreischweißen im industriellen Maßstab ist bislang nicht bekannt. Mögliche Gründe hierfür können zum einen die nach wie vor geringe Erfahrung mit dem Einsatz von Industrierobotern und folglich auch die Unkenntnis über deren Potentiale sein. Zum anderen existieren auch noch keine tiefer gehenden Untersuchungen zum Verhalten und der Anlagenfähigkeit von Robotern beim kraftgeregelten Schweißen dreidimensionaler Konturen, was wiederum den Einsatzbereich von Industrierobotern zum FSW einschränkt.

Dennoch sind in den letzten Jahren einige FSW-Anlagen entwickelt worden, die teils auch kommerziell verfügbar sind. So wurde von der Firma Hitachi Ltd. bereits eine roboterbasierte Anlage entwickelt (HITACHI 2005), welche zusammen mit einem Bearbeitungstisch auf einer Grundplatte befestigt ist. Die Werkzeugspindel ist elektrisch angetrieben und befindet sich in einer 90°-Anordnung zum Handflansch des Roboters. Über die Fähigkeiten und Traglasten des Roboters oder dessen Einsatzbereiche gibt es jedoch keine näheren Informationen. Auch der Roboterhersteller ABB entwickelte zusammen mit der Firma ESAB AB einen speziellen FSW-Roboter, der auf einem Standardroboter mit einer Handhabungskapazität von 500 kg basiert (SORON & KALAYKOV 2006). Hier wurden die Roboterteile ab der Achse 5 durch eine eigene Schweißspindel ersetzt, wodurch der TCP an eine Position nahe der Roboterstruktur gebracht werden kann. Die Kraftregelung wurde unter Verwendung eines 6D-Kraftsensors realisiert. Diese Studie stellt die Anwendung des Roboters mit axialen Prozesskräften bis 3 kN vor, es wurden jedoch auch Experimente mit Prozesskräften bis 9 kN durchgeführt (SORON 2007, S. 101 ff.). Es fehlen jedoch auch hier Angaben zur Schweißposition und eine Charakterisierung der geschweißten Verbindungen. Der Fokus dieser Arbeit liegt verstärkt auf der FSW-Bahnplanung im Sinne einer komfortablen Programmiermöglichkeit für das Robotersystem.

Ein weiterer großer Anwendungsbereich könnte sich für Knickarmroboter auch zum Rührreischweißen von Thermoplasten eröffnen. Bei diesen Materialien kann mit sehr geringer Anpresskraft des Schweißwerkzeuges gearbeitet werden, da diese in

der Regel im Vergleich zu metallischen Werkstoffen wie Aluminium einen deutlich niedrigeren Schmelzpunkt sowie geringere mechanische Festigkeitswerte besitzen (SAECHTLING ET AL. 2004, S. 485). Versuche hierzu wurden beispielsweise an einem unverstärkten Werkstoff PA66 sowie zwei kurzfaserverstärkten Werkstoffen auf einer Fräsmaschine durchgeführt (WILDEN ET AL. 2006). Diese Studie brachte hervor, dass eine zusätzliche Wärmequelle notwendig ist, um den Werkstoff zu plastifizieren. Wird jedoch damit zu viel Wärme in die Fügepartner eingebracht, besteht die Gefahr, dass der zu fügende Werkstoff aus der Fügezone herausgeschleudert wird. Deshalb wird eine Optimierung des Werkzeuges vorgeschlagen, bei welcher der Pin unabhängig von der Werkzeugschulter vorgewärmt werden kann, wodurch die Schulter nur noch die Aufgabe besitzen würde, das erweichte Material vollständig in der Fügezone zu halten. Damit würde sich die Anpresskraft des Werkzeuges auf ein Minimum beschränken, was für die Anwendung von Industrierobotern sehr vorteilhaft wäre. Ein ähnlicher Weg wird von MATTAPPELLI ET AL. (2007) mit der Verwendung eines separaten Gleitschuhs beschritten, welcher relativ zum rotierenden Pin stillsteht und damit das Schweißgut lediglich in der Fügezone hält. Geschweißte Polypropylen-Platten erreichten dabei Festigkeiten von bis zu 90 % des Grundmaterials, womit das Verfahren auch für eine industrielle Anwendung interessant ist. Die Versuche wurden ebenfalls mit einer handelsüblichen Fräsmaschine durchgeführt. Die Werkzeugkomponenten (stillstehender Gleitschuh sowie rotierender Pin) könnten theoretisch auch robotergestützt gehandhabt werden. Veröffentlichungen im Zusammenhang mit einem Roboter als die das Werkzeug führende Einheit existieren jedoch bislang nicht.

3.4 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Abschließend kann festgestellt werden, dass für den Rührreibschweißprozess unterschiedliche Anlagentypen existieren, welche die für die jeweilige Anwendung erforderlichen Prozesskräfte aufbringen und das Werkzeug geeignet führen können. Durch ihre unterschiedlichen Fähigkeiten besitzen alle Anlagentypen von der Spezialmaschine bis hin zu Robotersystemen eigene Alleinstellungsmerkmale. Seit seiner Erfindung wird der Prozess überwiegend mit speziellen bzw. Laboranlagen ausgeführt. An diesen Anlagen wurde deshalb auch ein Großteil des allgemeinen Prozesswissens generiert. Anhand einzelner Veröffentlichungen und Arbeiten konnte gezeigt werden, dass der Schweißprozess auch mit Hilfe von Knickarmrobotern geführt werden kann. Dennoch bleibt in den meisten Fällen

unklar, unter welchen Umständen diese Ergebnisse erzielt wurden und ob sie nur in einer speziellen Schweißposition erreicht werden können. Neben der Frage der Flexibilität für den FSW-Prozess stellt sich zudem die Frage nach der mittels des Roboters erreichbaren Qualität der Schweißergebnisse. Aufgrund stark unterschiedlicher Steifigkeitsverhältnisse zwischen Robotern und FSW-Maschinen könnte die Anwendung identischer Prozessparameter durchaus in unterschiedlichen Nahtqualitäten resultieren.

Einen zweiten Aspekt der Flexibilität stellt das Prozesswissen über das Schweißen enger Radien dar. Während dieser Aspekt für das Fügen großflächiger Bauteile beispielsweise im Luft- und Raumfahrtbereich zweitrangig ist, bedeutet er für komplexe Schweißaufgaben beispielsweise aus der Automobilindustrie ein zentrales Kriterium. Knickarmroboter bieten im Vergleich zu anderen FSW-fähigen Maschinen das höchste Maß an Beweglichkeit, was das Fügen theoretisch nahezu beliebiger Konturen erlauben würde. Die meisten roboterbasierten FSW-Anwendungen beschränken sich jedoch auf relativ einfache, gerade Schweißnähte oder Konturen mit vergleichsweise großen Radien. Um die Anwendbarkeit des kraftgeregelten, robotergestützten Rührreibschweißens zu erweitern, müssen Grundkenntnisse über das Fügen enger Radien gewonnen sowie der Einfluss des Roboters und seiner Steuerung festgestellt werden.

Damit ergibt sich für diese Arbeit ein Handlungsbedarf, der sich aus zwei Teilen zusammensetzt: Im ersten Teil soll der Einfluss der untersuchten Schweißanlage sowie der Schweißposition auf die erreichte Schweißnahtqualität in Relation zu konventionellen FSW-Anlagen untersucht werden. Der Fokus richtet sich dabei auf Anwendungen im Dickenbereich weniger Millimeter, für den Knickarmroboter die erforderlichen Anpresskräfte des Werkzeuges auf den Fügepartnern bereitstellen können. Der zweite Teil schließlich beschäftigt sich mit der Prozessführung über enge, konvexe Geometrien. Derartige Konturen stellen für den FSW-Prozess den weitaus interessanteren Fall dar als enge konkave Konturen. Bei diesen besteht meist ohnehin die Gefahr der Kollision des Werkzeuges/Schweißkopfes mit den Fügepartnern oder der Spannvorrichtung, weswegen diese in dieser Arbeit nicht explizit betrachtet werden.

4 Experimenteller Aufbau

4.1 Allgemeines

Im Folgenden wird auf den zugrunde liegenden Versuchsaufbau der robotergestützten FSW-Anlage eingegangen, der für die beiden Schwerpunkte dieser Arbeit von Bedeutung ist. Neben dem Roboter umfasst dieser die Schweißspindel, verwendete Zusatzhard- und -software sowie das unmittelbare Umfeld. Abschließend werden die verwendeten Werkzeuge näher beschrieben.

4.2 Schwerlastroboter

Zur Durchführung der Untersuchungen wurde ein Schwerlastroboter der Firma KUKA Roboter GmbH mit der Bezeichnung „KR500-MT“ verwendet (Abbildung 18). Der strukturelle Aufbau entspricht dem eines Standardroboters mit 500 kg Handhabungskapazität. Im Unterschied zur Standardversion des Roboters ist dieses Derivat mit Zusatzgetrieben in den drei Grundachsen ausgestattet. Dadurch ist zwar die maximale Bewegungsgeschwindigkeit dieser Achsen reduziert, infolge der veränderten Übersetzungen können jedoch getriebeabtriebsseitig höhere Drehmomente erzeugt werden. FSW-übliche Schweißgeschwindigkeiten können dennoch problemlos erreicht werden, da der Schweißprozess eine relativ geringe Dynamik im Vergleich zu den konventionellen Handhabungsaufgaben des Roboters erfordert.

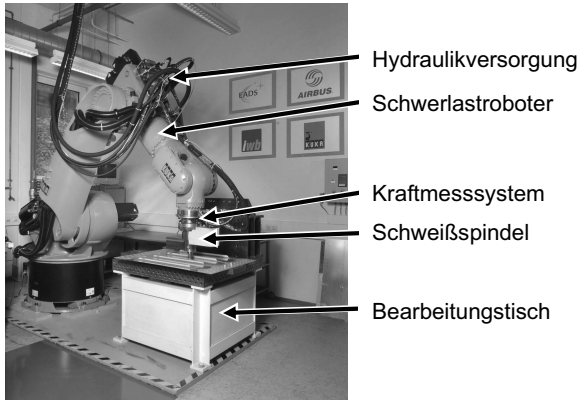


Abbildung 18: Versuchsanlage zum Herstellen Rührreibschweißverbindungen mit dem Roboter

Die statischen Belastbarkeiten des Roboters erreichen je nach Orientierung und Position des Werkzeuges im Raum Größenordnungen im zweistelligen kN-Bereich. Ein mathematisches Modell, welches unter Zuhilfenahme der Daten des Herstellers aufgebaut wurde, verdeutlicht dies in Abbildung 19 für zwei Orientierungen des Flansches in der xy-Ebene des Roboters. Die Maximalbelastungen wurden in diesem Beispiel auf die Belastungsgrenzen der Getriebe unter Berücksichtigung der massebehafteten Roboterstruktur und des Gewichtsausgleiches berechnet. In der Orientierung, in welcher der Handflansch senkrecht nach unten zeigt, ist die Belastungsgrenze der Achse A2 im größten Teil des Arbeitsraumes ausschlaggebend. In der alternativen Flanschorientierung (rechtes Teilbild) wird die Grenze hauptsächlich in Achse A1 erreicht.

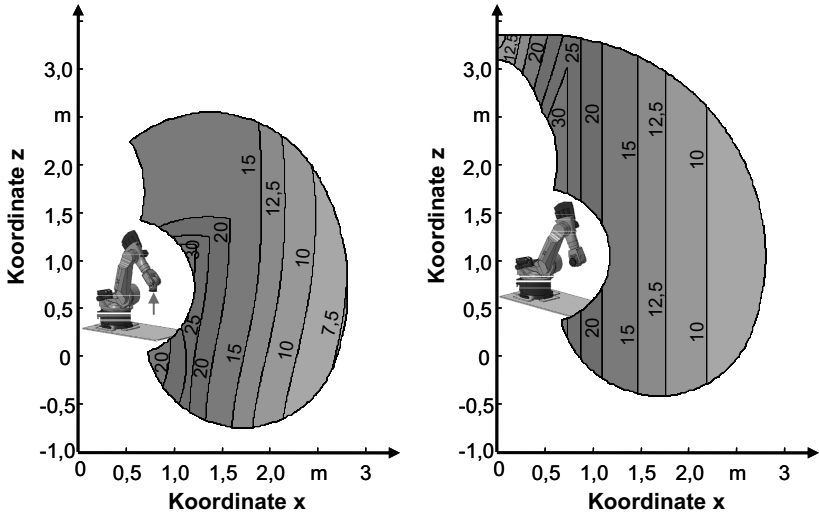


Abbildung 19: Maximale statische Belastungen des Roboters in der xz-Ebene;
 links: Orientierung des Flansches senkrecht nach unten;
 rechts: Orientierung des Flansches horizontal nach -y im
 Weltkoordinatensystem des Roboters; Belastbarkeiten in kN

Im Realfall liegen die maximal darstellbaren Prozesskräfte jedoch unterhalb dieser gezeigten Grenzen. Aufgrund der Beschleunigungen der Massen des Roboters entstehen während der Roboterbewegung, also auch während des Schweißprozesses, zusätzliche Drehmomente, die von den Motoren und in den Getrieben bereitgestellt werden müssen. Die Getriebereibungen sowie die Umrechnung auf entsprechende Motorlasten sind hier ebenfalls nicht berücksichtigt. Dennoch ist das System in der Lage, Prozesskräfte in jeder Grundbelastungsrichtung von bis zu 10 kN und darüber aufzubringen (VOELLNER ET AL. 2006). Dieser Wert gilt für eine mittlere Entfernung des Handflansches von etwa 1,8 m zur Roboterbasis, wobei die Belastungsgrenze entsprechend der obigen Berechnungen in der Querlage des Roboters erreicht wird (entspricht einer Belastung in der Richtung, die in Abbildung 19 rechts dargestellt ist).

4.3 Spindel

Die für die Untersuchungen eingesetzte Werkzeugspindel besitzt als Antrieb einen hydraulisch angetriebenen Axialkolben-Konstantmotor. Die Spindel kann mit Hilfe eines Drehgebers durch eine Steuerung elektronisch geregelt werden, wobei die Drehzahl durch den Roboter vorgegeben werden kann. Abtriebsseitig erlaubt die Spindel Werkzeugdrehzahlen von bis zu 3.000 min^{-1} in beiden Drehrichtungen. Bauartbedingt muss jedoch eine Mindestdrehzahl von etwa 1300 min^{-1} eingehalten werden, um im laufenden Betrieb ein für den FSW-Prozess ausreichendes Drehmoment erzeugen zu können.

Die Spindel ist in ihrem Aufbau so gestaltet, dass die Werkzeugrotationsachse coaxial zum Befestigungsflansch des Roboters verläuft. Dadurch zeigt der Vektor der Prozesskraft F_w durch die Achsen 5 und 6 des Roboters, wodurch sich deren Belastungen während des Rührreibschweißens auf ein Minimum beschränken.

Um die Gesamtlänge der Spindel vom Befestigungsflansch bis zur Werkzeugaufnahme möglichst gering zu halten, sind deren Lager fettgeschmiert und verfügen über keine Kühlmechanismen. Sie ist somit lediglich für den Laborbetrieb vorgesehen, weshalb darauf zu achten ist, dass die Spindel durch den Schweißbetrieb nicht überhitzt wird.

4.4 Kraftregelung

SMITH (2000) zeigt, dass aufgrund einer geringen Robotersteifigkeit ein Regelsystem für die Anpresskraft des Werkzeuges zwingend notwendig ist, um mit Robotern reproduzierbare und qualitativ hochwertige Rührreibschweißnähte herstellen zu können. Aus diesem Grund ist die eingesetzte Anlage ebenfalls mit einer Kraftregelung ausgestattet. Die Hardware zur Messung der Prozesskraft ist eine Sonderanfertigung und befindet sich zwischen dem Roboterflansch und der FSW-Spindel. Sie besteht aus drei DMS-basierten Wägezellen, die symmetrisch um die Werkzeugrotationsachse angeordnet sind. Eine Zentriereinheit verhindert die Übertragung von Querkraften sowie von Kippmomenten über die Kraftsensoren. Anschlussflansche verbinden schließlich das Messsystem mit dem Roboter und der FSW-Spindel. Die Gesamtlänge vom Roboterflansch über das Messsystem bis zur Werkzeugaufnahme beträgt insgesamt 296 mm. Der Aufbau ist damit relativ einfach gehalten und erlaubt nur die Messung der axialen Kräfte. Diese reichen jedoch für eine Prozesskraftregelung beim Rührreibschweißen vollkommen aus. Aus den Messsignalen der Wägezellen wird roboterseitig eine resultierende

Prozesskraft berechnet und der Regelung als Messgröße zugeführt. Um die vorgegebene Anpresskraft des Werkzeuges zu erreichen, wird in Echtzeit ein raumfester Korrekturvektor erzeugt, der die Bahn des TCP in Werkzeugaxialrichtung entsprechend verschiebt. Dadurch kann die Prozesskraft ohne weitere Zusatzachsen durch eine korrigierte Bahnplanung des Roboters selbst geregelt werden.

4.5 Umgebung

Zur Befestigung von Spannvorrichtungen befindet sich vor dem beschriebenen Schweißroboter ein Bearbeitungstisch, der als teilweise ausgesteifte Schweißkonstruktion mit einer Graugussplatte ausgeführt ist (siehe Abbildung 18). Die Tischoberfläche befindet sich relativ zum Roboter in einer Mindestentfernung von ca. 1.300 mm mit einer Höhe von 724 mm. Die Grundfläche des Bearbeitungstisches beträgt 1 m x 1 m, wodurch der primäre Arbeitsraum des Roboters (WEIGOLD 2008, S. 50) gut abgedeckt ist. Der Roboter sowie der Bearbeitungstisch sind auf einer gemeinsamen Grundplatte aus Stahl befestigt.

Optional kann als zusätzliche Spannvorrichtung eine weitere Schweißkonstruktion verwendet werden, durch die Schweißpositionen in der Querlage des Roboters realisiert werden können. Diese Spannvorrichtung kann mit Schraubverbindungen am Bearbeitungstisch befestigt werden.

4.6 Verwendete Werkzeuge

Für die durchgeführten Versuche wurden zweiteilige Werkzeuge verwendet, bei denen die Pinlänge durch eine Stellschraube relativ zur Werkzeugschulter verändert werden kann. Die Kontur der Werkzeugschulter ist konkav mit einem Konizitätswinkel von 10° gestaltet. Durch insgesamt vier axialsymmetrische Rippen soll während des Schweißbetriebes zumindest eine Teilkühlung durch Konvektion herbeigeführt werden, um den Schweißkopf nicht zu überhitzen.

Je nach Werkzeug wurden zwei unterschiedliche Werkzeugpins verwendet: Pins mit einem Durchmesser größer oder gleich 5 mm wurden speziell angefertigt und besitzen an der Spitze ein Gewinde sowie drei seitliche Flanken. Die Pinform ist zudem konisch mit einem Öffnungswinkel von 10° . Bei Werkzeugen mit einem Pindurchmesser von kleiner 5 mm wurden handelsübliche Gewindeformer eingesetzt, deren Zentrierspitzen abgeschliffen wurden.

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurden größtenteils zwei Werkzeug-Pin-Kombinationen eingesetzt. Für Einschweißiefen bis 1 mm kam ein Werkzeug mit einem Schulterdurchmesser von 6 mm und einem Gewindeformer M3 zum Einsatz. Höhere Einschweißiefen wurden mit einem Werkzeug realisiert, dessen Schulterdurchmesser 13 mm und dessen Pindurchmesser 5 mm beträgt (Abbildung 20).

Technische Zeichnungen der eingesetzten Werkzeuge können im Anhang A1 (Werkzeuge „D6 GF3“ und „D13 DK5“) eingesehen werden.



Abbildung 20: Verwendete FSW-Werkzeuge

5 Einfluss der Anlagentechnik auf den Schweißprozess

5.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird der Einfluss der Schweißanlage auf den FSW-Prozess sowie die daraus entstehende Nahtqualität untersucht. Dieser Einfluss soll durch Stumpfstoß-Schweißversuche an unterschiedlichen Werkstoffen und Dicken ermittelt werden, wobei die Schweißnaht einen geraden, ebenen Verlauf besitzt. Diese Ergebnisse werden in Relation zu denen weiterer FSW-fähiger Maschinen gesetzt, die als Maßstab für den Roboter dienen. Ziel der Untersuchungen ist es, fehlerfreie Schweißnähte zu erzeugen und ein Bild des statischen und dynamischen Verhaltens des Roboters zu gewinnen. Eine Maximierung des Schweißfaktors (Zugfestigkeit der geschweißten Verbindung relativ zur Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes) auf jeder Schweißanlage wird nicht angestrebt, sondern vielmehr die Untersuchung und Sicherstellung der Anlagenfähigkeit.

5.2 Schweißen mit hohen Drehzahlen

Aufgrund der Limitierung der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Spindel wird im Folgenden das Schweißen bei Werkzeugdrehzahlen von mindestens 1.300 min^{-1} untersucht. Für diese Versuche wurden Legierungen ausgewählt, welche mit derartigen Drehzahlen gefügt werden können.

5.2.1 Versuchsbedingungen

Schweißanlagen

Durch den Einsatz zweier weiterer repräsentativer Referenzanlagen soll die Fähigkeit des Robotersystems nachgewiesen werden. Als Vertreter einer FSW-Maschine kam eine Maschine des Typs ESAB SuperStir™ zum Einsatz (Abbildung 21). Diese Anlage ist für Laborzwecke ausgelegt und verfügt über programmierbare Verfahrensmöglichkeiten in allen drei kartesischen Raumrichtungen ($x = 2.000 \text{ mm}$, $y = 400 \text{ mm}$, $z = 400 \text{ mm}$). Der Schweißkopf kann manuell um etwa $\pm 5^\circ$ um eine der horizontalen Achsen geschwenkt werden, so dass vor dem Schweißbetrieb ein fester Anstellwinkel des Werkzeuges eingestellt werden kann. Die axiale Prozesskraft F_w kann im geregelten Betrieb bis 50 kN vorgegeben werden.

Schweißnähte im Dickenbereich einiger Millimeter können, wie in Abschnitt 3.2.2 erläutert, auch mit konventionellen CNC-Bearbeitungszentren erzeugt werden. Für

Schweißversuche mit derartigen Anlagen wurde ein 4-Achsen-Horizontalfräs-Bearbeitungszentrum des Typs Heller MCH250 eingesetzt. Diese Maschine ist ursprünglich für die Schwerzerspanung von Gussbauteilen ausgelegt und kann axiale Prozesskräfte bis 20 kN bereitstellen. Die Maschine ist mit einer Steuerung vom Typ Siemens SINUMERIK 840D ausgestattet, welche standardmäßig nur einen positionsgeregelten Betrieb erlaubt. Eine Zusatzsoftware der Firma Geb. Heller Maschinenfabrik GmbH mit der Bezeichnung IPM („integrated process monitoring“) ermöglicht das Aufzeichnen der Kräfte in den kartesischen Richtungen, welche aus den Motorströmen indirekt gemessen bzw. berechnet werden können.

Für die Abdeckung eines möglichst breiten Anwendungsszenarios wurden mit dem Schwerlastroboter zwei Schweißpositionen realisiert. Schweißversuche in der Vertikalposition des Roboters sind in dieser Arbeit nach der für Schmelzschweißverfahren allgemein gültigen Norm DIN EN ISO 6947 als Wannenlage oder PA-Position bezeichnet. Die Querlage mit einer horizontalen Werkzeugposition wird folglich PC-Position genannt. Zur Realisierung der PC-Position wurde die in Abschnitt 4.5 erwähnte zusätzliche Spannvorrichtung verwendet. Die Schweißrichtung ist jeweils parallel zur raumfesten x-Achse des Roboters in Richtung der Basis, also zum Roboter hin, ausgerichtet. Tabelle 1 zeigt die jeweiligen Startpositionen der erzeugten Schweißnähte im Roboter-Koordinatensystem. Beim z-Wert der PA-Lage und beim y-Wert der PC-Lage muss zusätzlich die zu verschweißende Werkstückdicke addiert werden, um die Absolutposition der Werkzeugschulter am Schweißnahtbeginn zu erhalten. Für die beiden gewählten Schweißpositionen ist festzuhalten, dass der horizontale Abstand von etwa 2 m zur Roboterbasis 61% (in der PA-Lage) bzw. 73 % (in der PC-Lage) der maximalen Ausladung entspricht.

Tabelle 1: Startpositionen der Roboterschweißnähte sowie zum Vergleich die jeweils maximale Ausladung in x-Richtung

Lage	x	y	z	max. Ausladung (x)
PA	1.874 mm	384 mm	767 mm	3.076 mm
PC	2.002 mm	-86 mm	1.154 mm	2.747 mm

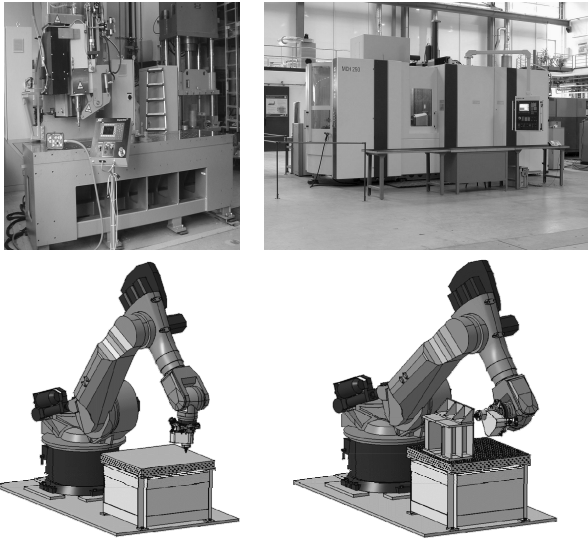


Abbildung 21: Eingesetzte Schweißanlagen: oben links: ESAB SuperStir™; oben rechts: Heller CNC-Bearbeitungszentrum MCH-250; unten links: KUKA KR500-MT in PA-Position; unten rechts: KUKA KR500-MT in PC-Position

Spannvorrichtung

Um eine hohe Vergleichbarkeit der Schweißanlagen zu gewährleisten, müssen für diese möglichst ähnliche Versuchsbedingungen geschaffen werden. Deshalb wurde für die Schweißversuche an sämtlichen Anlagen bzw. in beiden Schweißpositionen eine identische Spannvorrichtung verwendet. Sie besteht aus einer Stahlplatte als Unterlage, auf der zwei parallele Querjoche befestigt werden können. Diese wiederum drücken mit Madenschrauben auf Niederhalter und damit letztendlich auf die zu verschweißenden Werkstoffe, um diese gegen Verrutschen zu sichern. Zweck der Niederhalter ist es, die Fügepartner so nahe wie möglich an der Schweißstelle gegen die Unterlage zu drücken.

Werkstoffe

Für ein breites Spektrum an Versuchswerkstoffen wurden drei Aluminiumlegierungen mit unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften ausgewählt. Mehrere Dicken pro Legierung decken zudem einen großen Anwendungsbereich ab.

Als Vertreter einer gewalzten Knetlegierung wurde ein Werkstoff mit der Bezeichnung AW-5083-H111 (= AW-Al Mg_{4,5}Mn_{0,7}) gewählt. Dieser Werkstoff ist naturhart, da dessen mechanische Festigkeitseigenschaften aufgrund seiner Legierungszusammensetzung nicht durch eine Wärmebehandlung verändert werden können. Er wird unter anderem im Karosseriebereich des Automobilbaus, im Behälter- und Tankwagenbau (KAMMER ET AL. 2003, S. 362) sowie im Schienenfahrzeugbau eingesetzt (SKILLINGBERG 2007, S. 10). Der Werkstoff wurde in den Dicken 1 mm, 4 mm und 6 mm verschweißt.

Da die obige Legierung naturhart ist, kann eine Entfestigung des Werkstoffes in der Wärmeeinflusszone der FSW-Naht nicht stattfinden. Um Gefüge- und Festigkeitsänderungen feststellen zu können, wurde zusätzlich eine aushärtbare Strangpresslegierung mit der Normbezeichnung AW-6060-T66 (= AW-Al MgSi) gewählt, welche ebenfalls den Knetlegierungen zugeordnet ist. Diese Legierung kann in Form von so genannten Flachstangen bezogen werden und besitzt aufgrund sehr geringer Legierungszusätze relativ niedrige mechanische Festigkeitseigenschaften. Das Grundmaterial wurde im Wärmebehandlungszustand T66, also dem Zustand höchster Festigkeit, verschweißt. Dies bedeutet, dass jegliche weitere Wärmebehandlung zu einer Überalterung des Werkstoffes und damit zu einer Festigkeitsabnahme führt. Dadurch kann nach Durchführung der Schweißversuche eine eventuelle unterschiedliche Wärmeeinbringung anhand entsprechend unterschiedlicher Festigkeits- und Härtewerte in der Wärmeeinflusszone nachgewiesen werden. Dieses Material wurde in den Stärken 2 mm, 4 mm, 6 mm und 8 mm bereitgestellt, wobei die Platinenbreite mit abnehmender Dicke nach oben begrenzt ist. So kann beispielsweise das 2 mm dicke Material nur mit einer maximalen Breite von 60 mm hergestellt werden.

Durch die Zugabe von Silizium als Legierungselement kann die Gießbarkeit von Aluminium verbessert werden. Entsprechende Anwendungen von gegossenen Al-Legierungen finden sich beispielsweise im Fahrzeugbau, etwa in der Herstellung von Kolben, Gehäusen oder Motorenblöcken (KAMMER ET AL. 2003, S. 603 ff.). Für die Untersuchungen wurde deshalb die Druckguss-Standardlegierung AC-46000 (= AC-Al Si₉Cu₃) in Form von Druckgussplatten mit einer Dicke von 4 mm verwendet. Die Versuchsplatten lagen im Zustand F (wie gegossen) und vollständig kaltausgelagert vor.

Die chemischen Zusammensetzungen sind tabellarisch im Anhang A2 hinterlegt.

Messung der Prozesskräfte

Eine der wesentlichen Möglichkeiten zur Qualitätssicherung beim Rührreißschweißen ist die Kontrolle der Werkzeuganpresskraft F_w . Zusätzlich zu den Schweißversuchen wurden die Prozesskräfte beim Robotersystem sowie bei der ESAB FSW-Anlage unter Anwendung der selben Prozessparameter mit Hilfe eines Dynamometers der Fa. Kistler (Typenbezeichnung „9255B“) gemessen. Sämtliche Versuche zur Messung der Prozesskräfte wurden dabei mit einer Einschweißung ins Vollmaterial (Blindnaht) ausgeführt. Das Kistler-Messinstrument basiert auf der Piezo-Messtechnik und erlaubt die Messung von Kräften in allen drei Raumrichtungen. Um das Dynamometer vor Beschädigungen beim Schweißen zu schützen, wurden die Schweißversuche auf je einer dazwischen liegenden Epoxid- und einer Stahlplatte durchgeführt. Ein Verschrauben der beiden Sicherheitsplatten mit dem Dynamometer birgt die Gefahr des Verspannens während des Schweißens, bedingt durch deren Wärmeausdehnung, wodurch die Messergebnisse verfälscht werden können (KARG 2006, S. 56 f.). Deshalb wurden die Schutzplatten lediglich mit vier Gewindestiften auf dem Dynamometer befestigt. Diese Lösung stellt nur einen Kompromiss dar, denn dadurch sind die Sicherheitsplatten nicht exakt fixiert, wodurch das Gesamtsystem Schweißanlage – Prozess – Spannvorrichtung an der Stelle des Messsystems einen zusätzlichen Verlust an Steifigkeit aufweist. Zum Vergleich der Anlagen ist dieser Aufbau jedoch ausreichend.

Da das beschriebene Messsystem andere Abmaße aufweist als die weiter oben beschriebene Spannvorrichtung, wurden zur Durchführung der Kraftmessungen möglichst ähnliche Schweißpositionen gewählt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Die Abtastrate der Messsignale betrug während der Messungen 200 Hz, was die Auflösung der im Signal enthaltenen Frequenzen nach einer Fast Fourier Transformation (FFT) bis ca. 100 Hz erlaubt. Die Messdaten wurden überdies nicht gefiltert.

5.2.2 Versuchsdurchführung

Die Versuchslegierungen wurden an allen genannten Schweißanlagen und -positionen mit einer Nahtlänge von 270 mm im Stumpfstoß verschweißt. Zur statistischen Absicherung der Schweißergebnisse wurde jeder Versuch pro Schweißanlage, Material und Einschweißtiefe dreimal ausgeführt.

Prozessparameter

Sämtliche Schweißversuche wurden mit den in Abschnitt 4.6 beschriebenen Werkzeugen unter einem Anstellwinkel von 2° stechend durchgeführt. Die

Verweilzeit der Werkzeuge zwischen dem Eintauchen und dem Schweißprozess betrug je nach Legierung und Dicke zwischen 0,1 s und 1 s. Der Eintauchprozess selbst fand beim Robotersystem in einem kraftgeregelten Betrieb, bei den übrigen Anlagen im positionsgeregelten Betrieb statt. Folgende Tabelle 2 zeigt zusammenfassend die übrigen gewählten Schweißparameter Anpresskraft F_w , Werkzeugdrehzahl n und Schweißgeschwindigkeit v , die in den Versuchen mit dem Roboter angewendet wurden. Die Abkürzungen für Legierung/Dicke entsprechen den Werkstoffen AW-5083 (5), AW-6060 (6) und AC-46000 (G) in den dahinter spezifizierten Dicken.

Tabelle 2: Prozessparameter, die für die Schweißversuche verwendet wurden

Legierung-Nr./ Dicke in mm	Anpresskraft F_w	Werkzeug- drehzahl n	Schweiß- geschwindigkeit v
5-1	3,0 kN	1.300 min ⁻¹	400 mm/min
5-4	8,0 kN	1.600 min ⁻¹	300 mm/min
5-6	8,0 kN	2.000 min ⁻¹	300 mm/min
6-2	3,5 kN	1.500 min ⁻¹	600 mm/min
6-4	4,5 kN	1.500 min ⁻¹	600 mm/min
6-6	5,0 kN	1.800 min ⁻¹	600 mm/min
6-8	5,0 kN	2.200 min ⁻¹	600 mm/min
G-4	4,5 kN	1.400 min ⁻¹	400 mm/min

Die Übersicht enthält nur die Parameter des Roboters, die in PC-Lage identisch zu denen in PA-Lage waren. Die Schweißparameter auf der FSW-Anlage entsprachen alle denen des Roboters mit Ausnahme der Prozesskraft beim Schweißen des 1 mm dicken AW-5083-Materials. Bei diesem musste eine Anpresskraft F_w von 3,5 kN vorgegeben werden, um optisch fehlerfreie Nähte erzeugen zu können.

Vor der Festlegung eines Parametersatzes für die Stumpfstoßschweißungen und Auswertungen wurde eine Parametersuche durchgeführt. Diese erfolgte zunächst an der Roboteranlage in PA-Lage. Eine Schweißung galt als erfolgreich, sobald je eine

Biegeprobe um die Nahtwurzel sowie um die Oberseite nach dem in Abschnitt 2.3.2 erwähnten Vorgehen keine offensichtlichen Fehler aufwies und die Nahtoberfläche visuell ohne Makel war. Die dadurch ermittelten Schweißparameter wurden dann auf die anderen Schweißanlagen und -positionen übertragen.

Da bei der CNC-Anlage kein kraft geregelter Schweißbetrieb möglich ist, wurden die Versuche auf dieser Anlage rein positionsgeregelt durchgeführt. Die dadurch entfallende Regelgröße Kraft wurde durch die (theoretische) Eintauchtiefe der Werkzeugschulter im Versuchsmaterial ersetzt. Verformungsbedingten Abweichungen der vorgegebenen Eintauchtiefe, wie sie in EIREINER (2006, S. 87 ff.) erwähnt sind, wurde hier durch Anpassung des Schweißprogrammes entgegengewirkt. Die restlichen Parameter Werkzeugdrehzahl und Schweißgeschwindigkeit wurden im Vergleich zu den übrigen Schweißanlagen ausnahmslos übertragen.

Eine seitliche Abweichung der vorgegebenen Werkzeugposition kann insbesondere beim Robotersystem beobachtet werden (VOELLNER ET AL. 2006, S. 6 f.). Diese Abweichungen treten infolge der Prozessbelastungen auf, wodurch sich die Roboterstruktur elastisch verformt (siehe Abschnitt 2.4.3). Die festgestellten Abweichungen des TCP wurden durch eine geeignete Korrektur des Schweißprogrammes ausgeglichen, so dass das Werkzeug letztendlich die Fügepartner exakt im Stoß erfasste und verschweißte.

5.2.3 Auswertung der Versuche

Die Versuche wurden hinsichtlich der gemessenen Prozesskräfte, einer optischen Bewertung der Schweißnähte, Biegeproben um beide Seiten der Schweißnaht, Querschleifen sowie anhand von Zugversuchen ausgewertet. Die Proben für die zerstörenden Prüfungen wurden dabei stets nach dem gleichen Schema entnommen (Abbildung 22). Bei Werkstückdicken von größer oder gleich 2 mm wurden die Zugversuchsproben schweißnahtoberseitig um 0,3 mm abgefräst. Dadurch sollte ein vorzeitiges Versagen der Proben aufgrund von Kerbwirkungen am Schweißnahttrand verhindert werden. Das Entfernen von Nahtüberhöhungen ist in DIN EN 895 aus diesem Grund vorgesehen.

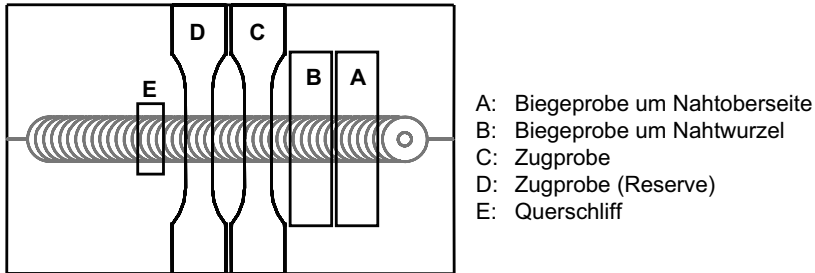


Abbildung 22: Entnahmeplan zur Bewertung der geschweißten Proben

5.2.3.1 Prozesskräfte

Abbildung 23 zeigt exemplarisch die Messung der Prozesskräfte einer Schweißnaht, die mit dem Roboter hergestellt wurde. Einer Eintauchphase bei einer vergleichsweise niedrigen Anpresskraft des Werkzeuges folgt eine kraftgeregelte Schweißphase bei einem Vorgabewert von 8 kN. Die Werkzeuganpresskraft folgt dabei einem konstanten Mittelwert. Neben der Vertikalkraft F_z sind zusätzlich auch die Prozesskraftkomponenten entgegen der Vorschubrichtung (F_x) und seitlich dazu (F_y) zu sehen. Darüber hinaus ist in diesem Diagramm auch die Messung der Werkzeuganpresskraft F_w durch das Messsystem der Spindel dargestellt, welches sowohl im Mittelwert als auch in der Amplitude ein anderes Verhalten zeigt als die entsprechende Prozesskraft, die vom (kalibrierten) Dynamometer aufgezeichnet worden ist.

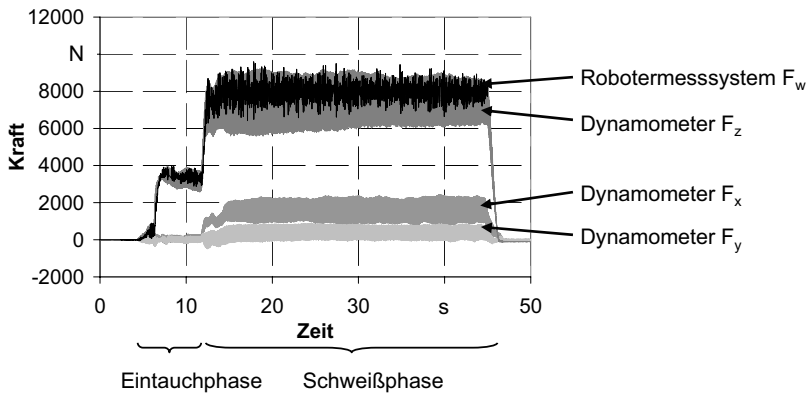


Abbildung 23: Messungen der Prozesskräfte am Beispiel der Schweißung von 6 mm dickem AW-5083 mit dem Roboter in PC-Lage (ungefiltert)

Während die Knetlegierungen im Schweißprozess einen gleichmäßigen Verlauf aufweisen, zeigen sich bei den Prozesskräften, die am Gusswerkstoff gemessen wurden, teils größere Schwankungen. Diese sind auf ein inhomogenes Ausgangsmaterial zurückzuführen, wodurch sich die Prozesskraftkomponenten F_x und F_y in Abhängigkeit des Poren- und Lunkergehaltes einstellen.

Mittlere Anpresskraft

Bei allen Messungen am Roboter, also in beiden Schweißlagen, kann beobachtet werden, dass die realen Prozesskräfte im Mittel etwa 5 % unter den in der Robotersteuerung vorgegebenen Werten liegen. Diese Abweichung liegt in Reibungsverlusten begründet, die an der Zentrierung des Roboter-Messsystems entstehen (KARG 2006, S. 44). Ein zweiter, stark sekundärer Faktor dürfte der Anstellwinkel des Werkzeuges um 2° sein, das im Vergleich zur probengebundenen Prozesskraftkomponente F_z um diesen Wert verkippt ist. Die FSW-Anlage zeigt im direkten Vergleich eine ähnliche Diskrepanz zwischen Vorgabe und Messwert. Auch die Schwankungen der Mittelwerte befinden sich auf einem vergleichbaren Niveau. Für die Kraftkomponenten F_x und F_y ergeben sich zwischen den verschiedenen Schweißanlagen und -positionen sehr gute Übereinstimmungen. Insbesondere die Vorschubkraft F_x steigt innerhalb gleicher Legierungen linear mit der Einschweißtiefe, was die Ergebnisse aus STAHL (2005) bestätigt. Auch bei der Prozesskraftkomponente seitlich zur Vorschubrichtung (F_y) sind ähnliche Tendenzen festzustellen.

Analyse der Kraftsignale

Wie Abbildung 23 veranschaulicht, sind die gemessenen und ungefilterten Kraftsignale mit Schwingungen überlagert, die sich auf das Gesamtsystem Schweißanlage – Prozess – Spannvorrichtung auswirken können. Abbildung 24 zeigt hierzu eine Übersicht zum Vergleich der benutzten Schweißanlagen hinsichtlich der Amplituden in den Kraftsignalen F_z . Während die Amplituden bei den Messungen auf der FSW-Anlage 450 N nicht überschreiten, können sie beim Roboter mehr als 1.500 N betragen. Eine Abhängigkeit dieser Amplituden von einem der Prozessparameter scheint nicht zu existieren. Die Amplituden in der PA-Lage des Roboters nehmen mit steigender Einschweißtiefe und damit mit steigender Werkzeugdrehzahl und -anpresskraft zwar zu, diese Beobachtung kann in der PC-Lage jedoch nicht bestätigt werden.

Speziell während des Versuches, bei dem 4 mm dickes AW-5083 mit dem Roboter in PC-Lage geschweißt wurde, konnten starke Vibrationen des gesamten Robotersystems beobachtet werden. Das Gesamtsystem beinhaltet dabei den Roboter und den Bearbeitungstisch sowie die darauf montierte Querspannvorrichtung. Die Wechselwirkungen des Schweißprozesses mit dieser Gesamtstruktur führen zu den gezeigten, hohen Amplituden im Kraftsignal. Dass solch extreme Amplituden aber nicht zwingend nur in der Querspannvorrichtung und deren Elastizität zu begründen sind, zeigt eine Messung mit einer noch höheren Amplitude von 1.659 N, die beim Schweißen in PA-Lage auftrat.

Im Vergleich hierzu verfügt die CNC-Anlage wie auch die FSW-Anlage über ein stabiles Maschinenbett sowie über eine robustere Kinematik. Dadurch verfügen diese Systeme enorm an Steifigkeit, womit derartige Schwingungen, wie sie bei den Roboterschweißungen beobachtet wurden, auszuschließen sind.

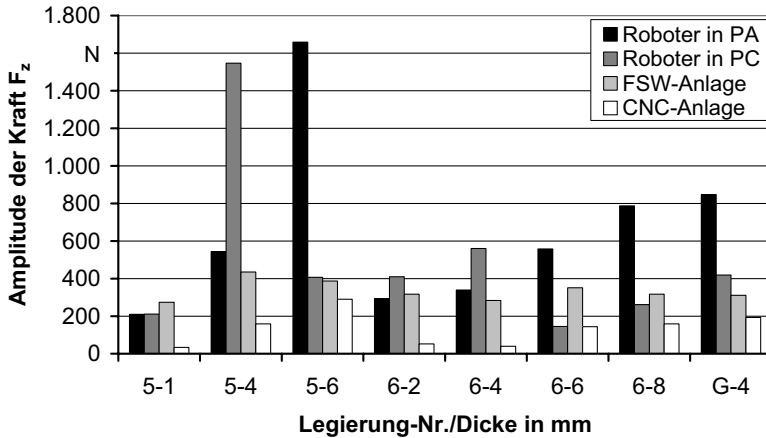


Abbildung 24: Amplituden der Kräfte F_z

Qualitativ gilt auch für die Amplituden der Kraftkomponenten F_x und F_y , dass diese bei der FSW-Anlage auf einem annähernd vergleichbaren Niveau liegen, während beim Roboter große Unterschiede feststellbar sind. Eine tabellarische Zusammenfassung der gemessenen Kräfte und Amplituden ist im Anhang A3 hinterlegt.

Eine FFT-Analyse der aufgezeichneten Signale gibt Aufschluss über die in den Kraftsignalen enthaltenen Frequenzen (Abbildung 25). Generell ist bei allen Messungen an der Roboteranlage festzustellen, dass die größte Anregung unabhängig von der Schweißlage oder anderen Prozessparametern stets mit der Werkzeugdrehzahl und deren Vielfachen erfolgt. Diese Schwingungen resultieren zum größten Teil aus der Anregung durch den verwendeten Hydraulikantrieb der Spindel, wie Vergleichsmessungen mit einem elektrischen Schweißkopf und der ansonsten gleichen Anlage beweisen. Diese Anregung ist in allen drei Kraftsignalen F_x , F_y und F_z enthalten. Im Falle des unten analysierten Schweißversuches entspricht dies bei einer Drehzahl von 1600 min^{-1} einer Frequenz von ca. 26,67 Hz. Durch leichte Unschärfen in der Drehzahlregelung des Hydraulikmotors verschiebt sich dieser Wert zu einer Frequenz von 26,86 Hz.

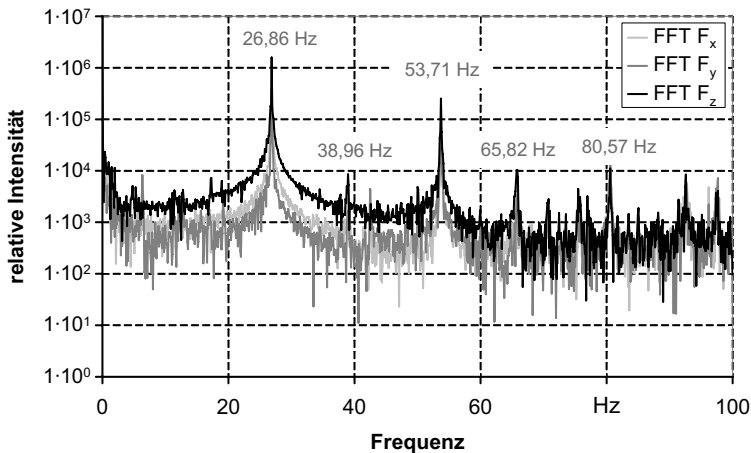


Abbildung 25: FFT-Analyse der Kraftaufzeichnungen eines Versuchs, bei dem mit dem Roboter in PC-Lage 4 mm dickes AW-5083 geschweißt wurde

Bei den FFT-Analysen der Messungen an der FSW-Anlage sind die Anregungsfrequenzen in den Kraftsignalen F_x und F_y , ebenfalls identisch zur Werkzeugdrehzahl und deren Vielfachen. Das Spektrum der anregenden Frequenzen ist im Signal der Vertikalkraft F_z im Gegensatz zu denen in F_x und F_y umfangreicher. Es beinhaltet auch Frequenzen ungleich der Werkzeugdrehzahl bzw. deren Vielfachen, die teilweise sogar etwas stärker ausgeprägt sein können als die der Drehzahl. Eine Hauptanregung in der Frequenz der Werkzeugdrehzahl ist bei FSW-Anlagen durchaus normal. Als Ursache hierfür wird ein nicht exakter Rundlauf des Werkzeuges vermutet, wodurch diese charakteristische Periodizität in den Prozessrückwirkungen entsteht (REYNOLDS 2008; YAN ET AL. 2007). Dadurch bedingt wird die Schweißanlage entsprechend zu Schwingungen angeregt (IMWF STUTTGART & FT ILMENAU 2007, S.30 f.).

5.2.3.2 Optische Bewertung

Die optische Bewertung der Schweißnähte ist auf zwei Merkmale fokussiert. Eines ist die Beschaffenheit der Nahtoberseite. Das andere Merkmal ist die Beschaffenheit des Endkraters, welchen das Werkzeug bei der Rückziehbewegung am Schweißnahtende hinterlässt.

Nahtoberflächen

Grundsätzlich ist bei allen durchgeführten Schweißversuchen festzuhalten, dass die Nähte einen exakten geradlinigen Verlauf ohne grobe oder ungewöhnliche Schwingungsbilder auf der Nahtoberseite besitzen. Dennoch können bei einzelnen Proben Unterschiede zwischen den genutzten Schweißanlagen festgestellt werden. So zeigt sich, dass infolge der Positionssteuerung der CNC-Anlage eine korrekte Werkzeugeintauchtiefe insbesondere bei geringen Einschweißtiefen sehr schwer einzustellen ist. Als weitere Schwierigkeit bei der Einstellung einer Werkzeugeintauchtiefe kommt die elastische Verformung der Spannvorrichtung und der Antriebsstränge hinzu (EIREINER 2006, S. 87 ff.).

Bei den mit dem Roboter durchgeführten Schweißversuchen mit den höchsten vorgegebenen Prozesskräften von 8 kN (AW-5083 in den Dicken 4 und 6 mm) fällt auf, dass die Schweißnähte mit zunehmender Länge einen wachsenden Auswurf auf der Retreating Side besitzen. Diese Erscheinung tritt nicht systematisch auf und ist beispielsweise in den PC-lagig geschweißten Proben nicht, tendenziell aber mit steigenden Versuchsnummern, zu finden. Derartige Auswürfe können bei den Schweißnähten der FSW-Anlage nicht festgestellt werden. Die Ursache für dieses Verhalten dürfte im Wärmehaushalt während des Schweißvorganges begründet sein. Dadurch, dass die Wärmekapazität der Roboterspindel im Gegensatz zu der der FSW-Anlage massebedingt viel geringer ist, wird der Schweißprozess im Verlauf der Naht zunehmend warm, was zur allmählichen Ausbildung des Auswurfes führt. Abbildung 26 zeigt exemplarisch Abschnitte der geschweißten, 6 mm dicken AW-5083-Proben.

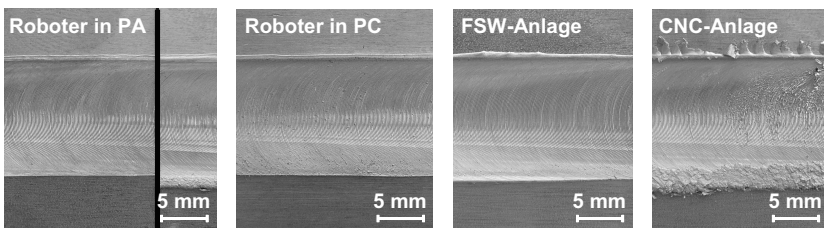


Abbildung 26: Nahtoberseiten geschweißter 6 mm dicker AW-5083-Proben; bei der in PA geschweißten Probe (links) ist ein Abschnitt vom Nahtanfang und -ende zu sehen; die Nahtoberfläche der mit der CNC-Anlage geschweißten Probe weist auf eine zu hohe Werkzeugeintauchtiefe hin.

Für die Versuche an den AW-6060-Proben können generell keine signifikanten Unterschiede zwischen den Schweißanlagen bzw. Positionen festgestellt werden. Die Schweißnahtoberflächen besitzen eine gleichmäßige Struktur ohne bemerkenswerten Materialauswurf (Abbildung 27).

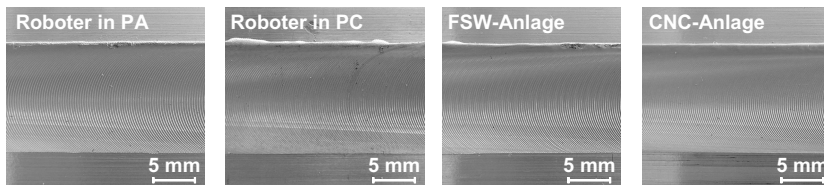


Abbildung 27: Gleichwertige Nahtoberseiten bei allen geschweißten 8 mm dicken AW-6060-Proben

Die geschweißten Gussproben zeigen teils größere Unterschiede. Bei der Parametersuche, die wie erwähnt mit dem Roboter in PA-Lage durchgeführt wurde, lag das Augenmerk neben den positiv ausfallenden Biegeproben auch auf einer gleichmäßigen Nahtoberfläche. Beim Übertrag der so gefundenen Prozessparameter auf die alternative PC-Schweißlage bzw. auf die übrigen Maschinen wurden die selben Prozessparameter vorgegeben. Das Nahtbild veränderte sich dabei im Vergleich zu den Ausgangsversuchen. Die Schweißnähte weisen bei vielen Proben an den Rändern einen unregelmäßigen Verlauf auf, und ihre Breite erreicht häufig nicht den Schulterdurchmesser von 13 mm. Sie erwecken eher den Eindruck einer zu niedrigen Prozesskraft, wie folgende Abbildung 28 veranschaulicht. Auch die Endkrater der Schweißnähte besitzen eine stark unvollständige Kontur. Sie sind im Vergleich der Anlagen jedoch annähernd gleichwertig. Eine mögliche Erklärung kann die Änderung des Werkzeuganstellwinkels durch die Belastungen des Roboters geben, siehe dazu Abschnitt 5.3.3.2.

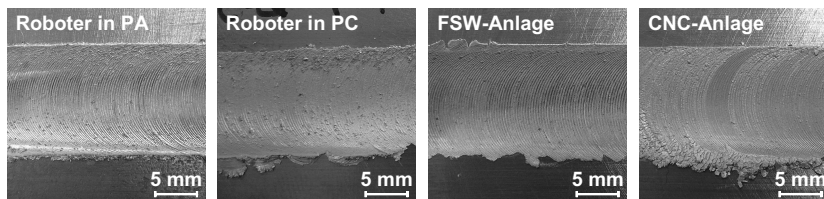


Abbildung 28: Nahtoberseiten geschweißter Gussproben

Endkrater

Insbesondere beim Material AW-5083, welches vergleichsweise hohe Prozesskräfte erfordert, ist ab der Einschweißtiefe von 4 mm eine Deformation der Endkrater bei den Schweißnähten, die mit dem Roboter hergestellt wurden, zu beobachten. Die Art der Deformation ist dabei unterschiedlich bezüglich der beiden untersuchten Schweißlagen. Sie entsteht beim Zurückziehen des Werkzeuges durch das schlagartige Abfallen der Prozesskraftkomponenten F_x und F_y , wodurch der TCP wieder in seine programmierte Position zurückwandert. Dabei streift das sich noch drehende Werkzeug den Endkrater und verformt diesen. Im Falle der in PA-Lage geschweißten Proben ist diese Deformation dabei erheblich größer als die der PC-lagig geschweißten, wie Abbildung 29 veranschaulicht. Diese Deformationen nehmen mit steigender Pinlänge bzw. Einschweißtiefe zu. Weiterhin fällt auf, dass bei den Roboterschweißnähten die Abdrücke des Werkzeuges am Nahtende nicht vollständig sind, verglichen mit denen der FSW- und der CNC-Anlage. Dort sind diese in allen Fällen makellos und ohne Verformungen. Sie entsprechen den Negativabdrücken der verwendeten Werkzeuge, was auf die zweifelsfrei höhere Steifigkeit gegenüber dem Roboter zurückzuführen ist.

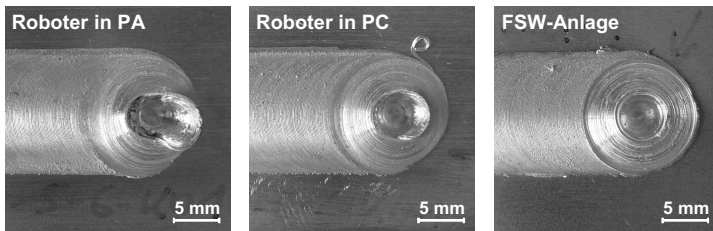


Abbildung 29: Endlöcher geschweißter 6 mm dicker AW-5083-Proben

Um den Einfluss der Prozesskräfte auf die Roboterbelastungen und damit auf die Abdrängung des TCP zu beschreiben, wurde mit Hilfe des PC-Programmes MATLAB (The MathWorks, Inc.) ein mathematisches Modell der Roboterstruktur erstellt. Das Modell ist als Starrkörpermodell mit rotatorisch beweglichen Gliedern an den jeweiligen Robotergelenken beschrieben. Die erforderlichen Abmaße des Roboters wurden der offiziellen Spezifikation entnommen (KUKA 2002, S. 60). Die Einflüsse der Schwerkraft und des Gewichtsausgleiches (GWA) sind bei diesen Berechnungen vernachlässigt. Mit Hilfe des Modells können somit die Kräfte und Drehmomente, die durch den FSW-Prozess induziert werden, in jeweils drei

Raumrichtungen relativ zu den jeweiligen gelenkfesten Koordinatensystemen berechnet werden.

Um eine Vergleichbarkeit der Berechnungsergebnisse für die beiden untersuchten Schweißlagen zu gewährleisten, wurden die mit dem Dynamometer gemessenen Belastungen der PA-Lage des Roboters ($F_x = -2.686 \text{ N}$; $F_y = 1.063 \text{ N}$, $F_z = 7.518 \text{ N}$) herangezogen, wobei das zugrunde liegende Koordinatensystem im FSW-Werkzeug liegt, die z-Achse entgegen der Stoßrichtung des Werkzeuges und die x-Achse in dessen Vorschubrichtung zeigt. Diese Belastungen wurden für die untersuchten Schweißlagen PA und PC (Startpositionen der Schweißnaht siehe Tabelle 1) jeweils am Nahtende berechnet. Abbildung 30 zeigt die beiden untersuchten Schweißlagen mit den auf das Werkzeug wirkenden Kräften sowie die in den Gelenken resultierenden Drehmomente, die in dieser Abbildung in positiver (Dreh-)Richtung dargestellt sind.

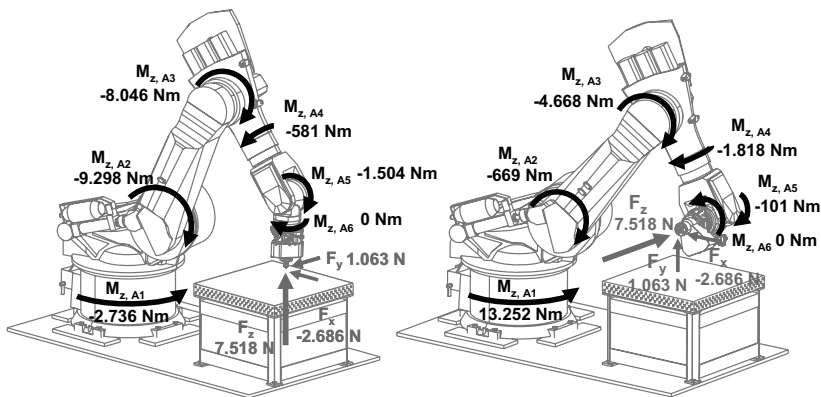


Abbildung 30: Positiv drehend angetragene Momente in Drehrichtung der Gelenke des Roboters, die aus den Prozesskräften F_x , F_y und F_z in den Schweißlagen PA (links) und PC (rechts) resultieren

Die Berechnungen verdeutlichen, dass in der Schweißlage PA sehr hohe Drehmomente in den Achsen A2 und A3 induziert werden. Als Folge einer begrenzten Getriebe- und Struktursteifigkeit wird der Zweischlag, bestehend aus Schwinde und Arm/Hand des Roboters, aufgeweitet. Durch die Kraftregelung wird das Werkzeug dennoch weiterhin in das Werkstück gedrückt. Ein hohes Kippmoment im Gestell des Roboters führt wahrscheinlich zu keiner

nennenswerten Verformung, da angenommen werden darf, dass die Kippsteifigkeiten der Gelenke höher sind als die Verdrehsteifigkeiten.

In der PC-Lage hingegen zeigt sich, dass durch die Prozesskräfte insbesondere in Achse A1 ein hohes Drehmoment erzeugt wird. Durch den langen Hebelarm von dieser Achse zum Werkzeug resultiert aus dieser Verdrehung jedoch eher eine Verschiebung des TCP in axialer Richtung, welche durch die Kraftregelung wieder kompensiert wird.

Die Belastungen der Handachsen dagegen sind in beiden Schweißlagen als unkritisch anzusehen. Durch die günstige Anordnung der Spindel und damit des Werkzeuges zum Roboterflansch entstehen in den Achsen A4 bis A6 keine Drehmomente infolge der hohen Prozesskraftkomponente F_z , sondern höchstens durch die Komponenten in x- und y-Richtung. Andere Anordnungen, wie sie beispielsweise in SMITH ET AL. (2003a, S. 4) gezeigt sind, dürften weit höhere Belastungen in den Handachsen erzeugen. Selbst das berechnete Drehmoment in Achse A5 von 1.504 Nm (Schweißlage PA) beträgt weniger als die Hälfte des zulässigen Getriebedauermomentes.

Die Berechnungen wurden unter Vernachlässigung eines Reibmomentes, welches durch die rotierende Schulter auf den Fügepartnern erzeugt wird, durchgeführt. Angesichts der hohen Belastungen durch die Prozesskräfte können diese auch keinen signifikanten Einfluss auf die Belastungen der Gelenke oder die Abweichung des TCP besitzen, wenn man bei den verwendeten Werkzeugdrehzahlen von einer realistischen Größenordnung des Reibmomentes von weniger als 50 Nm ausgeht (LONG ET AL. 2007). Auch eine elastische Verformung der Roboterglieder selbst wurde in diesem Modell nicht berücksichtigt. Der Einfluss dieser Verformungen dürfte relativ gering sein, wie es in Abschnitt 2.4.3 erläutert ist.

Eine Übersicht über die Gelenkpositionen im Raum sowie die resultierenden Kräfte und Momente in den einzelnen Gelenken bei den untersuchten Positionen kann im Anhang A5 nachgeschlagen werden.

Eine Abweichung des TCP ist damit durch zwei Effekte zu begründen: Der erste Effekt ist eine direkte Abdrängung des TCP infolge der Prozesskraftkomponente F_y . Der zweite Effekt der TCP-Verschiebung basiert auf einer Strukturverformung des Roboters durch die Prozesskraftkomponente F_z . Diese kann den TCP in gewissen Schweißpositionen und -richtungen durchaus auch seitlich aus der programmierten Bahn drücken. Ein Extrembeispiel hierzu wäre eine Schweißlage wie die Lage PA,

deren Schweißrichtung jedoch tangential zur Drehrichtung der Achse A1 verläuft. Eine Kompensation der Abweichungen des TCP alleine durch die Messung der Prozesskraftkomponente F_y , wie sie von SORON (2007, S. 127 ff.) vorgeschlagen wird, kann nicht zufriedenstellend realisiert werden. Eine solche Regelstrategie kann das Abweichungsverhalten in vielen Fällen mildern, ausregeln lässt es sich dadurch jedoch nicht. Im ungünstigsten Fall kann diese Regelstrategie sogar zu einer Verschlechterung des Schweißergebnisses führen. Eine Ausregelung kann daher nur mit einem entsprechend genauen Steifigkeits- bzw. Verformungsmodell des Roboters, welches alle wirkenden Kräfte und Momente berücksichtigt, oder mit direkten Messverfahren geschehen.

Im Unterschied zu den oben gezeigten Deformationen sind diese bei den AW-6060-Legierungen selbst bei einer Einschweißtiefe von 8 mm kaum feststellbar. Grund hierfür dürften die geringeren Prozesskräfte sein, die sich durch das vergleichsweise weiche Ausgangsmaterial während des Prozesses einstellen.

5.2.3.3 Biegeproben

Da die Biegeproben mitunter zur Suche der Prozessparameter herangezogen wurden, zeigen sie im Allgemeinen positive Resultate. Bis auf wenige Ausnahmen konnten alle Proben der geschweißten Knetlegierungen beidseitig fehlerfrei um 180° gebogen werden. Vereinzelte Ausreißer bei den AW-6060-Werkstoffen sind auf unterschiedliche Ausbildungen der Oxidschichten (*flaws*) im Wurzelbereich der Schweißnaht zurückzuführen. Diese entstehen durch die manuelle Vorbereitung der Stoßkanten der Fügepartner vor dem Schweißen und können besonders stark bei Legierungen der Serie 6xxx ausgeprägt sein (PALM ET AL. 2003).

Verglichen mit obigen Knetlegierungen erreichten die Proben des Gusswerkstoffes im Grundzustand sehr viel geringere Biegewinkel von 13° bis 15°. Durch den FSW-Prozess wurde das Gefüge im Nahtbereich in ein Schmiedegefüge umgewandelt, was zu einem lokal duktileren Verhalten der geschweißten Proben und damit allgemein höheren Biegewinkeln führte. So wurden hier bei Biegung um die Nahtwurzel Winkel von 15° bis 23° erreicht, oberseitig sogar 16° bis 25°. Die Proben versagten dabei stets schlagartig im Bereich der größten Verformung. Die Biegewinkel streuen dabei bei allen Schweißanlagen gleichermaßen. Während die Risslinien bei den oberseitig gebogenen Proben gezackte Verläufe aufweisen, versagten insgesamt fünf der zwölf wurzelseitigen Proben unmittelbar neben der Schweißzone auf der Advancing Side mit einem geradlinigen Bruchverlauf. Da diese fünf Proben von allen drei Schweißanlagen bzw. aus beiden

Schweißpositionen des Roboters stammen, kann eine Abhängigkeit dieser Ergebnisse von der Schweißanlage und -position nicht festgestellt werden.

5.2.3.4 Querschliffe

Der Vergleich der Querschliffe aller geschweißten Knetlegierungen zeigt keine nennenswerten Unterschiede. Bei den mit der CNC-Anlage hergestellten Schweißproben, bei denen visuell bereits eine zu hohe Werkzeugeintauchtiefe festgestellt wurde, kann diese auch in den Makroschliffen aufgezeigt werden.

Die Querschliffe der geschweißten AW-5083-Proben weisen über alle Schweißanlagen gleichwertige Schweißnähte auf. Sämtliche Nähte waren fehlerfrei, wenn auch die 6 mm dicken Proben zu einem *nugget collapse* (vgl. Abschnitt 2.3.3) tendieren. Dieser ist bedingt durch die hohe Werkzeugdrehzahl von 2000 min^{-1} . Als weiteres Merkmal kann teils *surface galling* beobachtet werden. Alle Merkmale sind jedoch in einem unkritischen Bereich, wie die zuvor erwähnten gleichwertigen Biegeproben zeigen. Exemplarisch für die AW-5083-Legierungen sind in Abbildung 31 die Nuggets geschweißter 6 mm-Bleche im Vergleich zwischen den Schweißanlagen zu sehen.

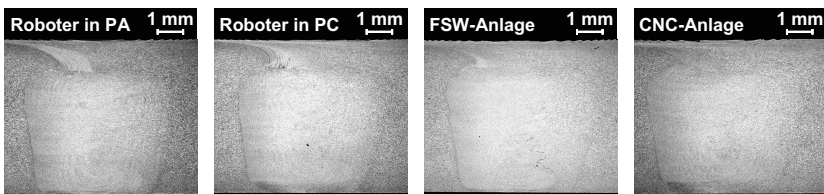


Abbildung 31: Makroschliffe vom Nugget geschweißter 6 mm dicker AW-5083-Proben

Auch die Gefüge der geschweißten AW-6060-Proben sind im Vergleich zwischen den Schweißanlagen als identisch anzusehen, wie in Abbildung 32 zu erkennen ist. In den Schweißzonen treten verstärkt *flaws* auf, die sich durch das Nugget ziehen. Dabei handelt es sich wie auch bei den oben beschriebenen AW-5083-Materialien um Oxide, die sich bei Aluminium selbständig auf der Materialoberfläche bilden (DILTHEY 2005, S. 217) und beim Rührreißschweißen in die Schweißzone transportiert werden (PALM ET AL. 2003, S. 9 ff.). Die Abbildungen zeigen zudem, dass diese Oxideinspülungen auch die selbe Gestalt besitzen, was auf gleiche

Materialflussbedingungen beim Schweißprozess schließen lässt. Auch die Querschliffe der übrigen Proben in den Dicken 2 mm, 6 mm und 8 mm sind als gleichwertig anzusehen.

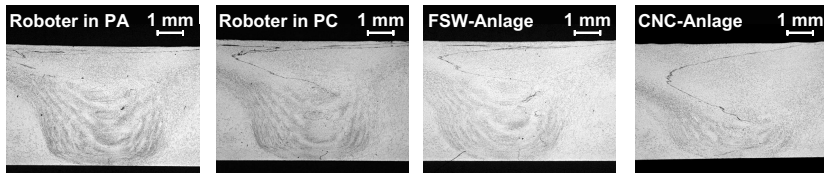


Abbildung 32: Makroschliffe geschweißter 4 mm dicker AW-6060-Proben mit sichtbaren flaws

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen Ergebnissen für die Knetlegierungen weisen die geschweißten Gussproben größere Unterschiede hinsichtlich der genutzten Schweißanlagen auf. In den Querschliffen (Abbildung 33) sind sowohl im Grundwerkstoff als auch teilweise an den Rändern und innerhalb der Nuggets Fehlstellen enthalten. Diese Querschliffe lassen darauf schließen, dass mit den gewählten Prozessparametern insgesamt eine sehr geringe Wärmemenge in die Fügepartner eingebracht wurde (KIM ET AL. 2006). Die Lunker im Grundwerkstoff können einen Durchmesser von 3 mm und mehr besitzen, was ein fehlerfreies Verschweißen generell erschwert. Fehlstellen im Nahtbereich wurden bei den Schweißnähten der CNC-Anlage im Rahmen der angefertigten Schliffe nicht gefunden. Die Querschliffe der beiden kraftgesteuerten Anlagen zeigen zudem eine scharf zum umgebenden Grundwerkstoff abgegrenzte Schweißzone, während die von der CNC-Anlage erzeugte Schweißnaht eine größere Übergangszone aufweist.

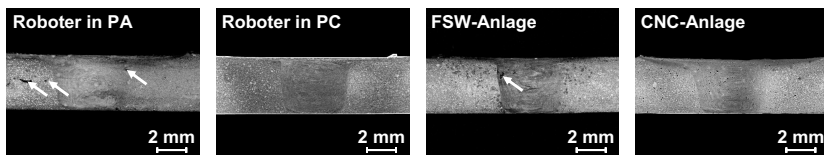


Abbildung 33: Makroschliffe geschweißter 4 mm dicker AC-46000-Proben; Fehlstellen in der Schweißzone und im Grundwerkstoff durch Pfeile markiert

5.2.3.5 Zugversuche

Die Zugproben wurden so weit wie möglich nach den in DIN EN 895 vorgegebenen Abmaßen gefertigt. Die Legierung AW-6060 ist jedoch nur in begrenzten Breiten erhältlich, was die Anfertigung normgerechter Proben für die Probendicke von 2 mm ausschließt. Deshalb wurde dieser Werkstoff lediglich in Form von einfachen Streifenproben geprüft, nachdem sichergestellt werden konnte, dass die geschweißten Proben nicht im Grundwerkstoff, sondern in der Wärmeeinflusszone der FSW-Naht versagen. Dadurch kann anhand dieser Streifenproben ebenfalls ein gültiger Wert für die Zugfestigkeit ermittelt werden. Sämtliche geschweißten Proben wurden mit einer Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min gezogen.

Die Grundwerkstoffproben konnten ebenfalls nur zum Teil normgerecht nach DIN EN 10002-1 angefertigt werden. Die Probengeometrien der AW-6060-Werkstoffe wurden aufgrund ihrer begrenzten maximal erhältlichen Breite deshalb zumindest an diese Norm angelehnt.

Werkstoff AW-5083

Da die Walzlegierung AW-5083 zu den naturharten Werkstoffen zählt und in dem eingestellten Zustand H111 (geglüht und geringfügig kaltverfestigt, z. B. durch Recken oder Richten) verschweißt wurde, können die mechanischen Eigenschaften durch die Wärmeeinbringung beim Rührreibschweißen im Gegensatz zu stärker kaltverfestigten Materialien nicht negativ beeinflusst werden. Korrekt geschweißte Verbindungen sollten daher beim Zugversuch im Grundwerkstoff versagen (MISHRA & MAHONEY 2007, S. 80 ff.). Die Auswertung der geprüften Zugproben ergibt, dass alle Schweißverbindungen des Roboters in beiden Schweißlagen sowie der FSW-Anlage wie angenommen und ausnahmslos dort versagen. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 34 dargestellt. Die Schweißfaktoren liegen bei Werten von meist $\geq 98\%$. Eine negative Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften der geschweißten Verbindungen infolge der Oxideinspülungen, wie sie in den Querschliffen beobachtet werden können, kann im Gegensatz zu JENE ET AL. (2006) an diesem Werkstoff nicht bestätigt werden. Dort wird eine Schwächung von bis zu 10 % erwähnt.

Allein die Zugproben der mit der CNC-Anlage geschweißten Verbindungen versagen bei der Probendicke von 1 mm im Nahtbereich. Hier wurde optisch schon ein vergleichsweise tiefes Eindringen des Werkzeuges in den Werkstoff mit einer entsprechend höheren Nahtbreite festgestellt. Daraus kann abgeleitet werden, dass diese Proben einen verringerten Nahtquerschnitt aufweisen und infolge dessen

wegen einer höheren Spannung im Nahtbereich versagen, was zu vergleichsweise geringeren Zugfestigkeiten führt. Dennoch liegen diese mit einem Schweißfaktor von ebenfalls durchschnittlich 98 % nur marginal unter der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes. Bei den übrigen Dicken kann dieser Effekt aufgrund des spanenden Abtrages der Nahtoberseite nicht nachvollzogen werden.

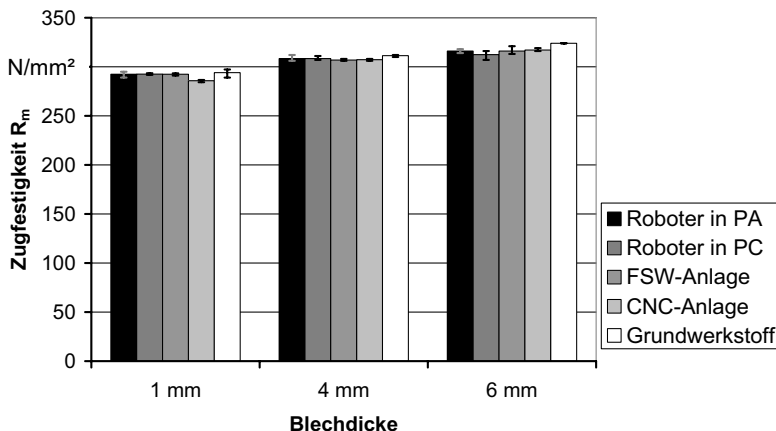


Abbildung 34: Zugfestigkeiten der geschweißten AW-5083-Werkstoffe im Vergleich zum Grundwerkstoff

Werkstoff AW-6060

Die Legierung AW-6060 wurde im Wärmebehandlungszustand T66 geschweißt und nach dem Fügen auch nicht weiter wärmebehandelt. Im Zugversuch müssen die Proben damit in der Wärmeeinflusszone versagen, sofern die mechanischen Festigkeitseigenschaften der Schweißzone nicht noch geringer sind. Bei einem Versagen in der WEZ würde sich eine unterschiedlich große Wärmebringung durch die verschiedenen Schweißanlagen dann in Form entsprechend unterschiedlicher Zugfestigkeiten bemerkbar machen.

Nach der Auswertung der 2 mm-Proben ist zunächst festzustellen, dass die Zugfestigkeiten der geschweißten Proben über alle Schweißanlagen in einem engen Bereich von 152 N/mm^2 bis 159 N/mm^2 liegen. Diese Werte entsprechen einem allgemein guten Schweißfaktor von 76 % bis 78 %. Auffällig bei dieser Serie sind jedoch die Bruchlagen: Während die mit der FSW-Anlage geschweißten Proben ausnahmslos auf der Advancing Side in der WEZ versagen, liegen die Bruchlagen

bei allen anderen Proben mit einer Ausnahme direkt in der Schweißzone. Alleine die Tatsache, dass alle Proben unabhängig von der Bruchlage gleichwertige Ergebnisse zeigen, spricht für eine zufällige Verteilung dieser Ergebnisse.

Im Gegensatz zu den 2 mm-Proben versagen alle 4 mm-Proben in den Wärmeeinflusszonen der Schweißnähte. Auffällig ist, dass alle sechs geprüften Zugproben aus der FSW-Anlage auf der Advancing Side brechen. Bei den Proben der anderen Anlagen existieren keine Vorzugsseiten, nicht einmal innerhalb zweier Zugproben einer einzigen Schweißprobe. Die Proben erreichen über alle Anlagen bzw. Schweißpositionen trotzdem gleichwertige Zugfestigkeiten im Bereich von 166 N/mm^2 bis 178 N/mm^2 , während der Grundwerkstoff Werte von 237 N/mm^2 zeigt. Die vom Roboter in PC-Lage geschweißten Proben weisen im Vergleich der Anlagen mit Zugfestigkeiten von mindestens 174 N/mm^2 die höchsten Werte auf.

Ein sehr vergleichbares Bild liefern die geschweißten Proben des 6 mm dicken Materials. Die Zugfestigkeiten liegen über alle Anlagen in einem sehr engen Bereich von 195 N/mm^2 bis 203 N/mm^2 . Die Streuungen sind beim Roboter in PC-Lage und bei der FSW-Anlage geringfügig größer, im Mittel ist jedoch kein Einfluss der Schweißanlage auf die Qualität der Verbindung zu erkennen.

Infolge eines Lieferantenfehlers wurden von den 8 mm dicken Proben nur insgesamt vier Proben vom Roboter in PA-Lage, der FSW-Anlage sowie der CNC-Anlage im Wärmebehandlungszustand T66 artgleich verschweißt. Bei den übrigen Proben liegen „Mischverbindungen“ mit einem anderen Zustand des Ausgangsmaterials vor, weshalb die Ergebnisse dieser Zugversuche verworfen wurden. Dennoch zeigen zumindest die vier korrekt geschweißten Proben identische Zugeigenschaften und bestätigen damit die Ergebnisse aus den geringeren Einschweißtiefen.

Das Diagramm in Abbildung 35 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der geprüften Schweißverbindungen der AW-6060-Werkstoffe im Vergleich zwischen den Schweißanlagen. Bemerkenswert sind die insgesamt nahezu gleichwertigen Ergebnisse mit den relativ geringen Streuungen, was auf eine identische Wärmeeinbringung während des Schweißprozesses durch die unterschiedlichen Schweißanlagen hinweist.

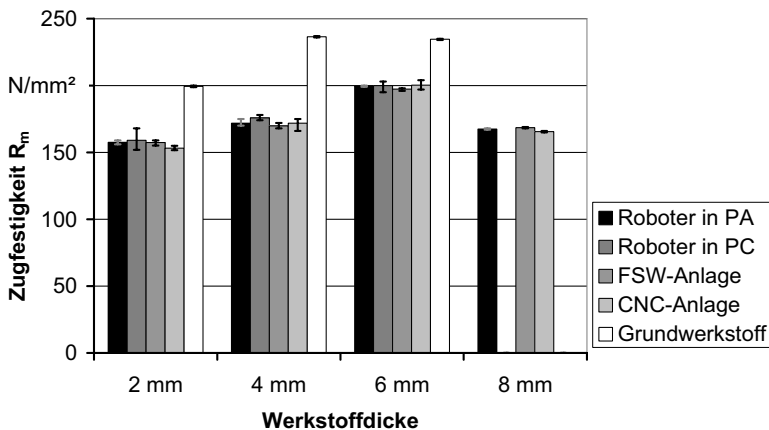


Abbildung 35: Zugfestigkeiten der geschweißten AW-6060-Werkstoffe im Vergleich zum Grundwerkstoff; bei der Dicke von 8 mm konnten teilweise keine gültigen Werte ermittelt werden (s. S. 73).

Werkstoff AC-46000

Obwohl einige der Biegeproben der geschweißten AC-46000-Proben über die Nahtwurzel jeweils einen geradlinigen Riss aufweisen, korrelieren diese nicht mit minderwertigen Zugfestigkeiten. Bei insgesamt 24 Zugversuchen aus den zwölf geschweißten Proben versagten lediglich acht im Bereich der Schweißnaht. Diese Ausreißer zeigen dabei im Vergleich weder besonders niedrige Prüfkraften noch sind sie nur einer Schweißanlage zuzuordnen. Vielmehr ist zu erwähnen, dass unter den insgesamt zwölf Roboterproben lediglich eine in der Schweißnahtzone versagte. Diese Ergebnisse bestätigen bereits die visuellen Bewertungen, nach denen der geschweißte Werkstoff bereits im Grundzustand viele Poren und Lunker aufweist. Dadurch ergeben sich stark unterschiedliche Zugfestigkeiten, die eine objektive Bewertung des Anlageneinflusses erheblich einschränken. Folgende Abbildung 36 veranschaulicht dies anhand der vergleichsweise hohen Streuungen. Somit können keine Rückschlüsse auf den Einfluss der Schweißanlage gezogen werden, auch wenn in dieser Grafik die robotergeschweißten Nähte scheinbar ein schlechteres Verhalten suggerieren. Dass dem nicht so ist, zeigt die erwähnte hohe Anzahl der Versagensorte im Grundwerkstoff.

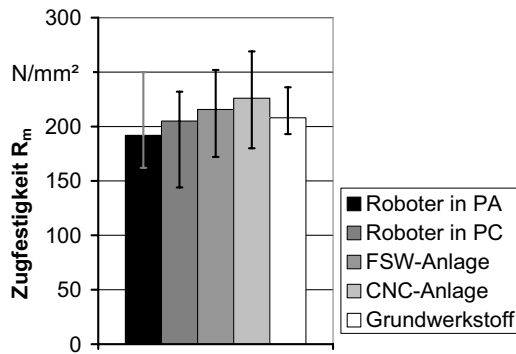


Abbildung 36: Zugfestigkeiten der geprüften AC-46000-Proben (je sechs gezogene Proben) im Vergleich zum Grundwerkstoff (drei Proben)

Eine komplette Übersicht der Ergebnisse aus den Zugversuchen kann im Anhang A4 nachgeschlagen werden.

5.2.3.6 Härtemessungen

Bei insgesamt vier Legierungs- und Dickenkombinationen der geschweißten Platinen wurden exemplarisch Härtemessungen durchgeführt, wobei die Proben stets von allen drei Anlagen bzw. beiden Roboterschweißpositionen stammen. Die Messungen wurden in der Mitte des Querschliffes in einem horizontalen geradlinigen Verlauf angefertigt.

Die Härtemessungen an den geschweißten, 6 mm dicken AW-5083-Proben (Abbildung 37) spiegeln die identischen optischen Charakteristika aus Abbildung 31 wider. Im Grundwerkstoff beträgt die Härte ca. 80 HV 1, im Bereich der Schweißnaht erreicht sie bei allen Anlagen gleichermaßen auf einer Gesamtbreite von ca. 8 mm leicht höhere Werte bis 88 HV 1. Diese Erhöhung der Härte ist das Ergebnis einer Festigkeitssteigerung durch Kornfeinung (GOTTSTEIN 2001, S. 246), die durch die Rekristallisation während des FSW-Prozesses stattfindet (MISHRA & MAHONEY 2007, S. 80f). Bemerkenswert ist, dass der Härteverlauf über alle Anlagen identisch ist, sowohl was die Absolutwerte der Härte als auch was die Breite der Schweißzone betrifft.

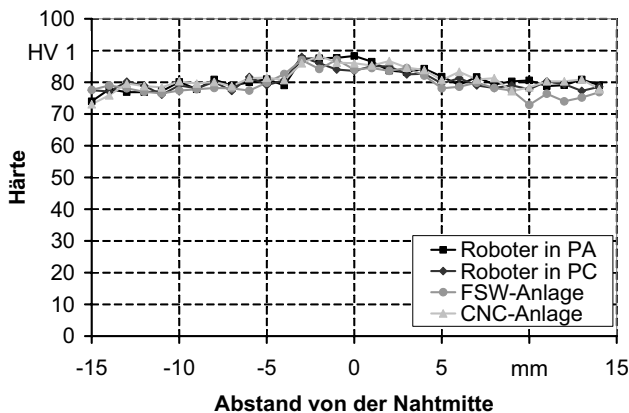


Abbildung 37: Härteverläufe geschweißter 6 mm dicker AW-5083-Proben

Infolge des Wärmeeintrages, der während des Schweißprozesses stattfindet, sinkt in der Wärmeeinflusszone der geschweißten AW-6060-T66-Proben die Härte aufgrund einer Überalterung des Werkstoffes (GOTTSTEIN 2001, S. 381 ff.). Im Gegensatz zu den oben erwähnten AW-5083-Proben sind die Wärmeeinflusszonen bei den geschweißten 4 mm dicken AW-6060-Proben unterschiedlich breit (Abbildung 38). Sie variieren in einem Bereich von 16 mm bei beiden Roboterproben bis mehr als 20 mm bei der von der CNC-Anlage geschweißten Probe. Die Härte innerhalb der Schweißzone beträgt bei allen Proben jedoch einheitlich zwischen 50 HV 1 und 58 HV 1, während die Schwankungen im Grundwerkstoff bei einem Abstand von ≥ 11 mm von der Schweißnahtmitte wesentlich größer sind. Die Unterschiede in den Schweißnahtbreiten können auf leicht variierende Wärmeeinträge während der Schweißprozesse zurückgeführt werden, die demnach bei der CNC-Anlage am größten gewesen sein müssen.

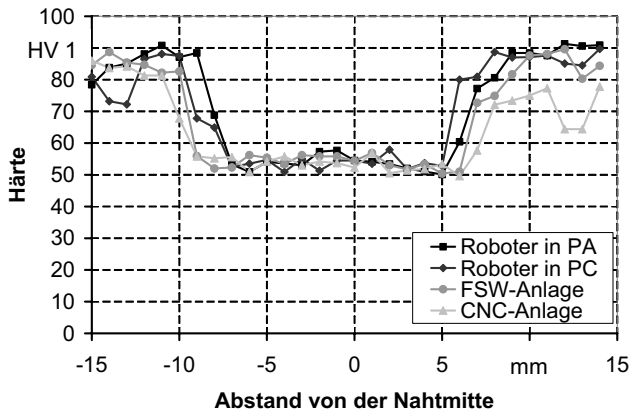


Abbildung 38: Härteverläufe geschweißter 4 mm dicker AW-6060-Proben

Aufgrund des porösen Gussmaterials im Grundwerkstoff und der Schweißnahtfehler, die bereits die Querschliffe zeigen, war eine Härtemessung an den geschweißten Gusswerkstoffen nur bedingt möglich. Ausreißer wurden durch Ersatzmessungen in einem geforderten Mindestabstand vom eigentlichen Messpunkt korrigiert (DIN EN ISO 6507-1). Aus den Messungen an den Gussproben geht hervor, dass die Härte bei allen Proben gleichermaßen zwischen 76 HV 0,5 und 111 HV 0,5 schwankt, einzelne Ausreißer liegen dabei immer noch außerhalb dieser Grenzen. Der Wärmeeintrag während des Schweißens sollte im Normalfall bei dieser Legierung zu einem Anstieg der mechanischen Eigenschaften und auch der Härte führen (ROCKENSCHAUB ET AL. 2006, S. 30 f.). Im Bereich der Schweißnaht ergeben sich jedoch keine Unterschiede im Vergleich zum Grundwerkstoff, womit auch kein Einfluss der Schweißanlage identifiziert werden kann. Die Schwankungen der Härte sind dort jedoch etwas geringer als im Grundwerkstoff. Damit ist zu vermuten, dass der kurzzeitige Wärmeeintrag beim Schweißen keinen Einfluss auf das Gefüge und dessen Eigenschaften genommen hat. Die Aussagekraft dieser Messungen ist jedoch aufgrund der starken Streuungen eingeschränkt.

Zusammenfassend für den Abschnitt 5.3 können keine nennenswerten Unterschiede in den Schweißnahtqualitäten festgestellt werden. Die vom Roboter in beiden Schweißlagen erzeugten Verbindungen sind denen der FSW-Anlage unter Verwendung gleicher Prozessparameter ebenbürtig. Die festgestellten Unterschiede

in den Prozesskraftkomponenten haben zumindest keinen Einfluss auf die sich ausbildende Nahtqualität.

5.3 Schweißen mit niedrigen Drehzahlen

5.3.1 Vorbemerkung

Wie die durchgeführten Versuche anhand der Prozesskraftanalysen zeigen, wird die Schweißanlage durch den FSW-Prozess mit der Frequenz der Werkzeugdrehzahl zu Schwingungen angeregt. Bei den oben realisierten Parametern befinden sich die Drehzahlen im Bereich von 1.300 min^{-1} bis 2.200 min^{-1} , was einer Anregung im Frequenzbereich von 21,7 Hz bis 36,7 Hz entspricht. Die Eigenfrequenzen des verwendeten Schwerlastroboters liegen nach Angaben des Herstellers deutlich unterhalb dieser Grenzen. Damit lassen die Versuche noch keine Rückschlüsse auf das Systemverhalten mit Drehzahlen zu, die den Roboter zu Eigenschwingungen anregen können. Niedrige Drehzahlen werden zum Rührreibschweißen einiger mittel- und hochfester Luft- und Raumfahrtlegierungen der Serien 2xxx und 7xxx benötigt (SHINODA 2003, S. 19).

In Zusammenarbeit mit dem Aerospace Manufacturing Technology Centre (AMTC) des National Research Council (NRC) in Montreal/Kanada wurde deshalb eine Studie durchgeführt, welche grundlegende Untersuchungen zu dieser Fragestellung zum Ziel hatte. Dort ist eine ähnliche Anlage aufgebaut, welche aus einem identischen Roboter, einer Spindel sowie einem Bearbeitungstisch besteht. Die Spindel selbst ist elektrisch angetrieben und erlaubt auch geringe Werkzeugdrehzahlen. Die Werkzeugachse ist analog zu dem in Kapitel 4 beschriebenen Versuchsaufbau koaxial zur Achse des Handflansches ausgerichtet.

5.3.2 Versuchsplanung

Um das Strukturverhalten des Roboters unter Prozesslast in Abhängigkeit der Werkzeugdrehzahl zu untersuchen, wurde die in der Luftfahrt gebräuchliche Aluminiumlegierung AW-2024-T3 der Dicke 2,3 mm ausgewählt, deren chemische Zusammensetzung in Anhang A2 hinterlegt ist. Für diese Legierung wurden zunächst auf einer FSW-Anlage ISTIR PDS der Fa. MTS Systems Corp. Prozessparameter gesucht, mit denen die Legierung ohne offenkundige Nahtfehler verschweißt werden kann. Es kam ein ähnliches Werkzeug zum Einsatz, wie es bereits in den bisher beschriebenen Versuchen verwendet worden war. Der

Schulterdurchmesser betrug 12,7 mm, der des Pins 6,4 mm. Die Geometrie des Pins bestand lediglich aus einem auf den Grundkörper aufgeschnittenen Gewindegang mit einem oberhalb davon gelegenen Freistich. Folgende Tabelle zeigt Prozessparameter, die auf der FSW-Anlage empirisch ermittelt wurden. Der Anstellwinkel des Werkzeuges wurde analog zu den eingangs beschriebenen Versuchen mit konstant 2° vorgegeben.

Tabelle 3: Prozessparameter zum Fügen der AW-2024-T3-Legierung

Anpresskraft F_w	Werkzeug- drehzahl n	Schweiß- geschwindigkeit v
8,0 kN	900 min ⁻¹	500 mm/min
9,0 kN	700 min ⁻¹	500 mm/min
10,0 kN	600 min ⁻¹	360 mm/min
12,0 kN	500 min ⁻¹	300 mm/min
10,0 kN	400 min ⁻¹	240 mm/min

Im Anschluss daran wurden die identifizierten Prozessparameter auf die Roboterschweißanlage übertragen, wobei das identische Werkzeug verwendet wurde. Damit können die Schweißnähte, die von beiden Anlagen erzeugt werden, qualitativ wie quantitativ gut miteinander verglichen werden. Als Schweißlage für den Roboter wurde eine Position gewählt, die der in den obigen Abschnitten beschriebenen PA-Position sehr ähnlich ist. Die Schweißrichtung war jedoch im Gegensatz zu den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Versuchen entgegengesetzt, also von der Roboterbasis weg gerichtet. Zusätzlich zu den niedrigen Drehzahlen zeigt die Tabelle auch Prozesskräfte, die mit 12 kN um bis zu 50 % höher als die in obigen Abschnitten beschriebenen liegen. Das Strukturverhalten des Roboters konnte während des Schweißens mit zwei optischen Messsystemen (Leica LTD800 Lasertracker und NDI Optotrak Certus) von außen beobachtet werden. Entsprechende Marker für das Optotrak System und Reflektoren für den Lasertracker wurden zu diesem Zweck am Roboter bzw. an der Spindel befestigt, siehe Abbildung 39.

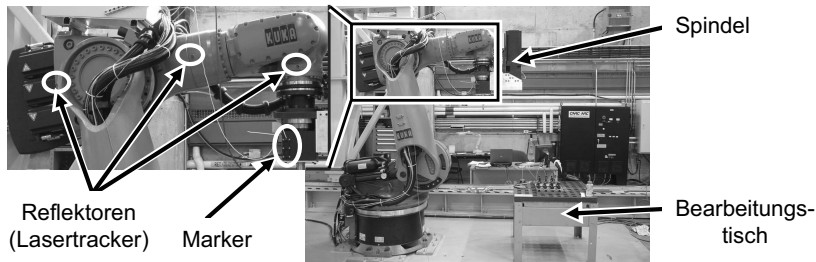


Abbildung 39: Roboter-Rührreißschweißanlage mit elektrischer Spindel sowie Reflektoren und Markern

5.3.3 Ergebnisse

5.3.3.1 Dynamisches Verhalten des Roboters

Die am Robotersystem durchgeführten Versuche zeigen, dass der Schweißprozess bei allen in Tabelle 3 gezeigten Parametersätzen stabil und ohne erkennbare Schwingungen des Werkzeuges verläuft. Der Eintauchprozess des Werkzeuges am Nahtanfang jedoch ist durch Vibrationen des Systems gekennzeichnet. Er erfolgt unter sehr ungünstigen Bedingungen, die diese Schwingungen hervorrufen. Der Abstand des TCP vom Roboterflansch ist mit etwa 558 mm etwa 60 % höher als bei den mit der hydraulischen Spindel durchgeführten Versuchen, wodurch sich die Hebelarme auf die Roboterelkenke entsprechend verändern. Das Programm zum Eintauchen ist außerdem so gestaltet, dass das rotierende Werkzeug mit einer Geschwindigkeit von 0,3 mm/s extrem langsam unter einem Anstellwinkel von 2° in die Fügepartner eingedrückt wird.

Insgesamt wurden bei allen in Tabelle 3 hinterlegten Prozessparametern die Bewegungen von drei Punkten des Roboterarmes bzw. der Hand mit dem Lasertracker aufgezeichnet. Deren Positionen sind Abbildung 39 zu entnehmen. Da für das Tracking eines jeden Punktes ein eigener Schweißversuch notwendig war, kann aus den Messdaten nicht auf die Gesamtbewegung der Struktur geschlossen werden. Die Messungen mit dem Optotrak-System zeigen, dass selbst bei identischen Prozessparametern ein unterschiedliches Schwingungsverhalten auftreten kann. Dennoch kann festgestellt werden, dass die Roboterstruktur, wie auch schon in den Kraftmessdaten in Abschnitt 5.2.3.1 beschrieben, zu Schwingungen mit der Frequenz der Werkzeugdrehzahl angeregt wird. Das Gelenk der Achse A3 wird vorwiegend in y-Richtung (seitlich) ausgelenkt. Die Amplitude

der Schwingungen aller Messpunkte hängt dabei nicht nur von den Prozessparametern ab, sondern auch vom Zustand des Werkzeuges selbst. Materialreste eines vorhergehenden Schweißdurchganges können das Schwingungsverhalten des nächsten Versuches signifikant beeinflussen. Die geringsten Amplituden waren unter Verwendung der höchsten Werkzeugdrehzahl von 900 min^{-1} zu messen. Die höchste Amplitude eines Reflektors betrug ca. 1 mm (Abbildung 40). Eine Abhängigkeit der Amplituden von der eingestellten Werkzeugdrehzahl oder der vermessenen Position lässt sich jedoch nicht feststellen. Schwingungen dieser Größenordnung sind aber für den Roboter als unkritisch anzusehen.

Anhand der in Abbildung 40 dargestellten Messung kann der Verlauf des Eintauchens sehr genau rekonstruiert werden. Gezeigt sind hier die Schwingungen des zur Spindel nächsten Reflektors an Achse A5 bei einer Werkzeugdrehzahl von 400 min^{-1} . Im unteren Teil der Abbildung sind die dabei gemessenen Prozesskraftkomponenten dargestellt. Die Positionswerte wurden zum besseren Verständnis auf die Lage des Werkzeugpins relativ zum Eintauchpunkt umgerechnet. Nach dem Vorpositionieren des Werkzeuges 1 mm über dem Blech startet der positionsgesteuerte Eintauchbetrieb mit einer Geschwindigkeit von 0,3 mm/s (1). Durch vorhandene Materialreste, die sich auf dem Werkzeugpin aus dem vorangegangenen Schweißversuch befinden, und durch die Anstellung des Werkzeuges um 2° zur Blechnormalen kommt es zu einem ersten Kontakt des Werkzeuges auf den Fügepartnern, wodurch das System zu geringen Schwingungen angeregt wird. Position (2) markiert den theoretischen Zeitpunkt, ab dem der Werkzeugpin die Blechoberfläche berührt, wodurch die reale Eintauchphase (I) beginnt. Zu diesem Zeitpunkt sind die Amplituden der Schwingungen noch sehr klein (3), da durch die fortschreitende Eintauchbewegung das System verspannt wird und diverse Getriebe- und Lagerspiele ausgeglichen bzw. überwunden werden. Die Eintauchgeschwindigkeit des Messpunktes sinkt jedoch etwas ab. Durch die fortschreitende Verspannung des Roboters wird dieser selbst zu Schwingungen angeregt, wodurch die Amplituden stark ansteigen (4). Die Schwingungen treten jedoch nur in der Ebene der Blechoberfläche auf, da Vibrationen vertikal dazu durch den harten Kontakt des Werkzeuges auf dem Blech verhindert werden. Mit weiter zunehmender Verspannung sinken die Amplituden der Vibration wieder ab. Das auf dem Blech hin und her gleitende Werkzeug bewirkt teilweise durch den Werkzeugpin als Schneide einen spanenden Abtrag und taucht langsam in das Werkstück ein (5). Mit Beginn der Verweilzeit (6, Phase II) wird die maximale Eintauchkraft von 12 kN erreicht. Ab diesem Zeitpunkt sinken gleichzeitig sowohl

die Amplituden der xy-Schwingung als auch die Eintauchgeschwindigkeit des Werkzeuges in z-Richtung ab. Sobald die Werkzeugschulter einen ersten Kontakt zu den Fügeteilen hat (7), wird schlagartig mehr Wärme erzeugt als dies der Werkzeugpin alleine bewerkstelligen kann. Dadurch sinkt die Anpresskraft des Werkzeuges weiter ab und das Werkzeug taucht wieder schneller in das Werkstück ein. Gleichzeitig erzeugt das rotierende Werkzeug aufgrund der unsymmetrischen Belastung eine Kraft (8), die es auf die Retreating Side, also nach -y drückt (9). Mit Beginn der zunächst positionsgesteuerten Schweißphase (10, Phase III) setzt schließlich die Vorschubbewegung ein. Dadurch wirkt materialflussbedingt eine Kraft, die das Werkzeug zurück auf die Advancing Side drückt (siehe beispielsweise Messwerte in Anhang A3) und so die vorherige Abdrängung mehr als kompensiert. Gleichzeitig wird das Werkzeug in Richtung der Materialoberfläche gedrückt, wodurch sich deren vertikale Position wieder etwas nach oben verschiebt (11). Dass der vertikale Extremwert des gemessenen Punktes bei -2,8 mm liegt, scheint zunächst widersprüchlich zur Blechdicke von nur 2,3 mm zu sein. Da jedoch die Eintauchphase 1 mm über der Blechoberfläche liegt (1) und die Vertikalposition darüber referenziert ist, ist dieser Fehler mit den diversen Lagerspielen bzw. anderen elastischen Elementen zu erklären, die sich zwischen dem Messpunkt und dem Werkzeug befinden. Speziell bei diesem Versuch kollidierte das Werkzeug am Nahtanfang mit der Unterlage, bei den übrigen Versuchen betrug der minimale Wert im Mittel etwa -2,5 mm. Der Schweißprozess selbst läuft im Vergleich zur Eintauchphase relativ vibrationsarm ab (12). Nach einigen Millimetern wird vom positionsgesteuerten in den kraftgeregelten Schweißbetrieb umgeschaltet (13), wodurch sich in diesem Fall eine Kraft von 10 kN einstellen wird.

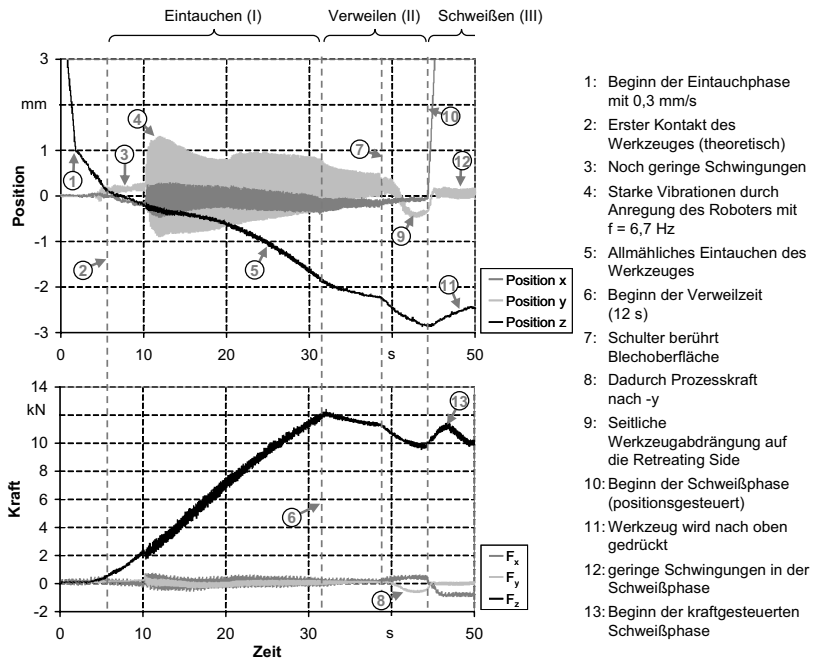


Abbildung 40: Schwingungen, gemessen am werkzeugnächsten Reflektor, beim Eintauchen mit einer Werkzeugdrehzahl von 400 min^{-1} (oben) sowie dazugehörige Prozesskräfte (unten); die Positionen wurden dabei auf den Werkzeugpin relativ zum Werkstück umgerechnet; Die Phasen I bis II entsprechen den programmierten Roboterbewegungen

Aus der Tatsache, dass der Schweißprozess selbst nahezu vibrationsfrei erfolgt, kann geschlossen werden, dass der FSW-Prozess eine extrem hohe Dämpfung verursacht, durch die das Werkzeug während des Schweißens stabilisiert wird. Diese Stabilisierung ist während der Eintauchphase noch nicht gegeben, als Folge hiervon sind die Anregungen des Roboters beobachtbar. Unterstützt wird diese Feststellung auch durch Beobachtungen des Prozesses an der MTS-Schweißanlage: Da das Werkzeug eine Länge von etwa 80 mm besitzt, bewirkt eine nicht exakte Ausrichtung des Werkzeuges in der Werkzeugaufnahme eine entsprechend hohe Ungenauigkeit im Rundlauf der Werkzeugschulter. Die Aufnahme des Werkzeuges ist durch einen Zylinder realisiert, der durch zwei radiale Fixierschrauben gegen Verdrehung gesichert ist. Beim Eintauchen des Werkzeuges, welches ebenfalls

unter einem Anstellwinkel von 2° erfolgt, können Taumelbewegungen des Werkzeuges beobachtet werden, die nach dem vollständigen Eintauchen wieder abklingen. Diese Taumelbewegungen können auch anhand der Prozesskräfte verifiziert werden, die während des gesamten Eintauch- und Schweißprozesses aufgezeichnet werden. Der Schweißprozess verläuft dagegen analog zu den Versuchen an der Roboteranlage stabil.

Im Umkehrschluss zu diesen Beobachtungen kann dies für das robotergestützte Rührreischweißen bedeuten, dass unter bestimmten Voraussetzungen durchaus ein instabiler Schweißprozess entstehen kann. Falls das Werkzeug, vor allem der Werkzeugpin, sehr klein ist, fehlt die stabilisierende Wirkung durch den FSW-Prozess. Auch Prozessparameter, unter denen das Material aufgrund eines hohen Wärmeeintrages extrem entfestigt wird, können eine unzureichende Stabilisierung bewirken. Dass dies jedoch nicht zwingend der Fall ist, zeigen erfolgreiche Schweißversuche mit dem in Kapitel 4 beschriebenen Roboter, bei denen zwei 0,3 mm dünne AW-2024 Aluminiumbleche im Stumpfstoß und in unterschiedlichen Schweißpositionen gefügt werden konnten. Die Pinlänge betrug dabei lediglich etwa 0,2 mm.

Eine weitere Besonderheit des Eintauchvorganges ist, dass dieser mit 32 s bei den gewählten Drehzahlen und dem vergleichsweise großen Pindurchmesser sehr lange dauert, wie dies aus Abbildung 40 ebenfalls hervorgeht. Der Grund hierfür ist, dass das sich drehende Werkzeug auf dem Blech nur noch wenig Wärme generiert, während es zudem wie oben beschrieben mit Vibrationen überlagert auf der Blechoberfläche hin und her gleitet. Im Laufe des positionsgesteuerten Eintauchens musste das Werkzeug theoretisch um bis zu 8 mm unter die Werkstückoberfläche geführt werden, wodurch sich eine Anpresskraft des Werkzeugpins auf die Fügepartner von ca. 13 kN aufbaute. Durch eine weitere, sehr lange Verweilzeit von bis zu 12 s gelingt es, das Werkzeug soweit einzudrücken, dass die Schulter mit den Fügepartnern in Berührung kommt. Danach setzt, wie beschrieben, der kraftgesteuerte Schweißbetrieb ohne Auffälligkeiten ein.

Im Unterschied dazu kann das Werkzeug bei Verwendung der wesentlich steiferen FSW-Anlage mit einer definierten Geschwindigkeit in die Fügepartner eingedrückt werden. Dabei bildet sich kurzzeitig eine Anpresskraft aus, die etwa 20 kN beträgt. Eine solch hohe Prozesskraft kann der Roboter in den meisten Schweißpositionen nicht realisieren, weshalb der Eintauchvorgang dort wesentlich länger dauert.

5.3.3.2 Statisches Verhalten des Roboters

Um die Änderung der Werkzeugorientierung während des Eintauchens und auch des Schweißens messen zu können, wurde der Anstellwinkel mit Hilfe der Marker des Optotrak-Messsystems am Schweißkopf während der Versuche aufgezeichnet. Wie erwartet, ändert sich der programmierte Anstellwinkel von 2° durch die wirkenden Prozesskräfte. Es zeigt sich, dass sich der Anstellwinkel bei der gewählten Schweißrichtung während der Eintauchphase sukzessive um bis zu $0,4^\circ$ erhöht (Abbildung 41 links, Phase I). Dies ist, wie bereits in Abschnitt 5.2.3.2 beschrieben, auf hohe Lastmomente in den Gelenken der Achsen A2 und A3 zurückzuführen, hervorgerufen durch eine Vertikalkraft F_z von bis zu 13,6 kN. Alleine durch den Hebelarm vom Gelenk A2 zum TCP und der programmierten Eintauchtiefe von ca. 8 mm ergibt sich eine theoretische Verdrehung dieser Achse um ca. $0,3^\circ$. Nach der Verweilzeit (Phase II), in der sich das Werkzeug bis zur Schulter ins Material eindrückt, wirkt mit Beginn der Schweißphase (III) auf den Roboter zusätzlich die Prozesskraft F_x . Diese erzeugt in den Achsen A3 und A5 ein Drehmoment und verringert den Anstellwinkel wieder geringfügig, so dass sich während der Schweißphase ein konstanter Anstellwinkel ausbildet. In Achse A3 übertrifft der Einfluss der Vertikalkraft den der Vorschubkraft, wie ebenfalls in Abschnitt 5.2.3.2 gezeigt wurde. Sobald das Werkzeug aus der Schweißnaht angehoben wird, stellt sich aufgrund der Entlastung der Gelenke wieder der programmierte Anstellwinkel ein. Anhand dieser Messung ist festzustellen, dass der Einfluss der Werkzeuganpresskraft auf die Änderung des programmierten Anstellwinkels im Vergleich zu dem der Vorschubkraft stark überwiegt. Unter Anwendung der Prozessparameter mit Drehzahlen von 600 min^{-1} bis 400 min^{-1} wurden letztendlich Anstellwinkel von $2,25^\circ$, $2,27^\circ$ und $2,20^\circ$ gemessen. Die Reproduzierbarkeit des Anstellwinkels ist für gleiche Versuchsbedingungen sehr hoch. Die Messsignale zeigen lediglich ein unterschiedliches Rauschverhalten, welches mit der Menge des anhaftenden Aluminiums aus dem jeweils vorherigen Versuch zu begründen ist.

Bei Umkehrung der Schweißrichtung (also zum Roboter hin, Abbildung 41 rechts) ist ein ähnliches Verhalten des Werkzeuganstellwinkels zu beobachten. Die Verdrehung der Achsen A2 und A3 in gleicher Richtung wie oben führt hier jedoch konsequenterweise zu einer Verringerung des Anstellwinkels. Die Prozesskraftkomponente F_x wirkt wiederum entgegen der Schweißrichtung, damit also nun verstärkend in Achse A3 und in umgekehrter Drehrichtung in Achse A5, und verringert damit den Anstellwinkel weiter. Die größeren Schwankungen zu

Beginn der Schweißphase (III) können hier dadurch erklärt werden, dass das Werkzeug am Ende der Verweilzeit (Phase II) noch nicht vollständig ins Material eingetaucht war, sondern erst 25 mm (6,5 s) nach Beginn der Schweißphase. Die Abweichung vom theoretischen Anstellwinkel (2°) im unbelasteten Zustand ist auf Ungenauigkeiten bei der Programmierung des Roboters zurückzuführen.

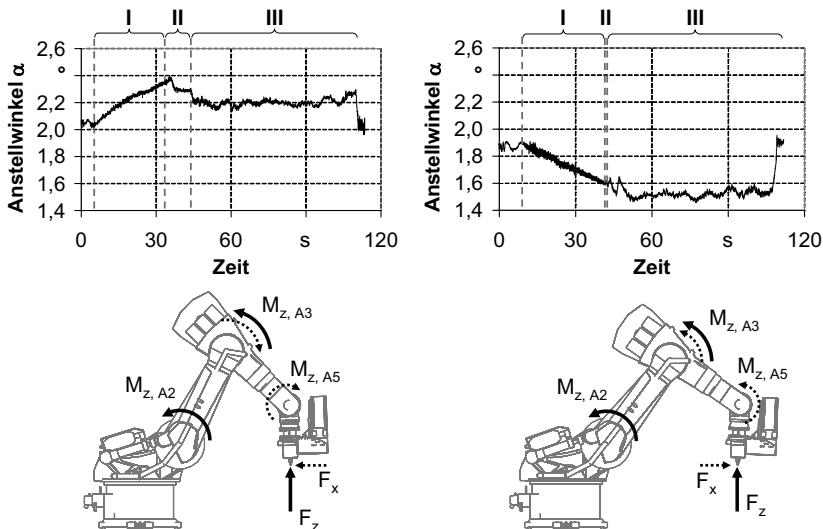


Abbildung 41: Verlauf des Werkzeuganstellwinkels beim Schweißen vom Roboter weg (links) und zum Roboter hin (rechts); gut erkennbar sind die Veränderungen während des Eintauchens (Phase I), gefolgt von einem stabilen Endwert während des Schweißens (Phase III); die Kräfte und Drehmomente am Roboter sind jeweils in Wirkrichtung angetragen.

Obige Beispiele geben einen guten Einblick in die Abhängigkeit des sich einstellenden Anstellwinkels von der Werkzeuganpress- und der Vorschubkraft. Es ist jedoch anzumerken, dass die Ergebnisse zunächst nur für die erwähnten Schweißlagen und -positionen gültig sind. Die Veränderung eines dieser Parameter bedeutet im Allgemeinen ein sich änderndes Belastungsprofil der Robotergelenke und damit des sich unter dieser Last real einstellenden Werkzeuganstellwinkels. Da der Roboter in den gezeigten Fällen aber relativ nahe an den Belastungsgrenzen

betrieben wurde, ist auch für andere Schweißpositionen mit Abweichungen des Anstellwinkels von insgesamt etwa $0,5^\circ$ zu rechnen.

Mit diesen Ergebnissen lassen sich möglicherweise auch die unterschiedlichen Nahtbilder erklären, die beim Schweißen des Gussmaterials in Abschnitt 5.2 beschrieben wurden. In der PA-Lage wurde der Werkzeuganstellwinkel durch die Roboterbelastungen soweit reduziert (Schweißrichtung zum Roboter hin), dass eine visuell gute Schweißnaht erzeugt werden konnte. Im Gegensatz dazu hat sich der Anstellwinkel des Werkzeuges in der PC-Lage weniger und bei der FSW-Anlage gar nicht verändert, was dort zu einer minderwertigen Schweißnaht mit unregelmäßiger Oberfläche (Abbildung 28) führte. Dass der gefundene Prozessparametersatz bereits an der Grenze des Parameterfensters liegt, belegen die Tunnelfehler, die sich in beiden Roboterschweißlagen ausbildeten (Abbildung 33).

Die Messdaten des Optotrak-Systems erlauben neben der Bestimmung des Werkzeuganstellwinkels auch eine Analyse des seitlichen Kippwinkels während des Schweißens. Dieser zeigt Schwankungen von maximal $0,2^\circ$ um den Nullwert. Interessanterweise schwankt der Kippwinkel auch bei einer Trockenfahrt ohne Schweißprozess, also ohne Belastung des Roboters, und ist beim Schweißen nur durch ein konstantes Offset verschoben. Eine Abhängigkeit dieser Schwankungen von den FSW-Prozessparametern kann damit ausgeschlossen werden. Die Ursache der Schwankungen ist daher in der Roboterstruktur bzw. der Bahnplanung zu vermuten. Ein Einfluss dieser geringen Schwankungen auf die Qualität der Schweißnaht ist nicht zu erwarten (OKI ET AL. 2006).

5.3.3.3 Schweißnahtqualitäten

Die Qualitäten der Schweißverbindungen beider Anlagen wurden anhand von Stumpfstoßschweißnähten analog zu den in Abschnitt 5.2.3 beschriebenen Kriterien bewertet. Für jeden Parametersatz wurden pro Anlage drei Schweißproben angefertigt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Die gewählten Drehzahlen umfassen ein sehr großes Parameterfenster. Dabei zeigt sich nach Anfertigung von Querschliffen, dass Schweißnähte mit Drehzahlen von 700 min^{-1} und darüber innere Tunnelfehler aufweisen, die auf eine zu niedrig vorgegebene Prozesskraft zurückzuführen sind. Speziell diese Nähte zeigen auch an der Oberfläche haftende Aluminiumfäden, die auf eine eher zu heiße Schweißnaht hindeuten. Aus diesen Indizien kann gefolgert werden, dass diese Prozessparameter außerhalb eines gültigen Parameterfensters liegen. Auf die Auswertung dieser

Schweißnähte mittels Zugversuchen und Biegeproben wurde daher verzichtet, die Querschliffe zeigen jedoch eine sehr gute Übereinstimmung der Nahtcharakteristika zwischen FSW-Anlage und Roboter, siehe Abbildung 42:

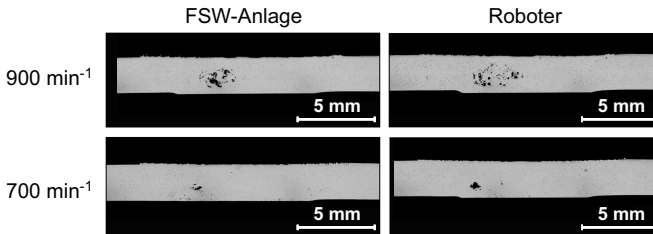


Abbildung 42: Gleiche Nahtcharakteristika hinsichtlich der Porosität im Vergleich der Anlagen; Prozessparameter siehe Tabelle 3; geringere Drehzahlen erzeugten fehlerfreie Schweißnähte; Schliffe poliert, ungeätzt

Biegeversuche, die nach ISO 5173 an Proben der erzeugten Stumpfstoßschweißnähte durchgeführt wurden, lieferten sowohl über die Nahtoberseite als auch über die Nahtwurzel durchweg positive Ergebnisse ohne erkennbare Merkmale. Sämtliche Proben konnten auf den Maximalwinkel von 180° gebogen werden.

Die Zugversuche nach ASTM E8-04 zeigen sehr ähnliche Zugfestigkeiten in Abhängigkeit der eingestellten Prozessparameter. Dennoch kann bei insgesamt sechs Zugproben je Anlage und Parametersatz festgestellt werden, dass die erreichten Zugfestigkeiten der Roboterschweißnähte im Mittel minimal geringer ausfallen als die mit der FSW-Anlage gefertigten Nähte (Abbildung 43). Die Unterschiede sind mit maximal etwa 1,8 % extrem gering. Eine natürliche Streuung aus der Messgenauigkeit der Zugprüfmaschine erscheint als Ursache wenig wahrscheinlich. Eine mögliche Erklärung für diese Ergebnisse ist vielmehr der Umstand, dass der Werkzeuganstellwinkel, wie oben beschrieben, beim Roboter durch dessen elastische Verformungen höher war als bei der steifen FSW-Anlage. Dadurch findet bei ansonsten konstanten Prozessparametern ein leicht unterschiedlicher Wärmeeintrag in den Werkstoff statt, wodurch die kleinen, aber signifikanten Unterschiede in den Zugfestigkeiten des geschweißten Materials entstehen. Auch leicht unterschiedliche Anpresskräfte können für diese Ergebnisse mitverantwortlich sein, da mit zwei unterschiedlichen Kraftregelsystemen gearbeitet

wurde, die nicht aufeinander kalibriert sind. Die Tatsache, dass derartige Unterschiede in den Schweißproben gemäß Abschnitt 5.2 nicht offensichtlich sind, lässt sich ebenfalls erklären: Der AW-5083-Werkstoff ist naturhart, daher versagen die geschweißten Proben gewöhnlich im Grundwerkstoff. Das Gussmaterial versagte häufig aufgrund vorhandener Fehlstellen ebenfalls im Grundwerkstoff, weshalb die Streuungen der Zugfestigkeiten jeglichen Effekt überdecken würden. In den Ergebnissen der AW-6060-Schweißproben kann ein solcher Effekt u. U. gesehen werden, jedoch betrug die Werkzeuganpresskraft nur einen Bruchteil der hier realisierten Kräfte. Das Material selbst verfügt zudem über eine allgemein sehr geringe Festigkeit, weshalb die Vorschubkräfte nicht sehr hoch sind. Daher ist nur eine marginale Änderung des Anstellwinkels gegenüber dem programmierten Wert zu erwarten. Ein um 38 % geringerer Abstand der Werkzeugschulter zum Roboterflansch verringert zusätzlich lastbedingte Winkeländerungen in den Handachsen.

Die allgemein schlechteren Zugfestigkeiten der mit der Drehzahl $n = 400 \text{ min}^{-1}$ gefügten Proben sind auf das unabhängig von der verwendeten Schweißanlage einheitliche Bruchverhalten im Nahtbereich zurückzuführen. Unter den übrigen Proben hingegen versagten die meisten in der Wärmeeinflusszone, weshalb die geringen Werte hier auf die Güte des Prozessparametersatzes zurückzuführen ist.

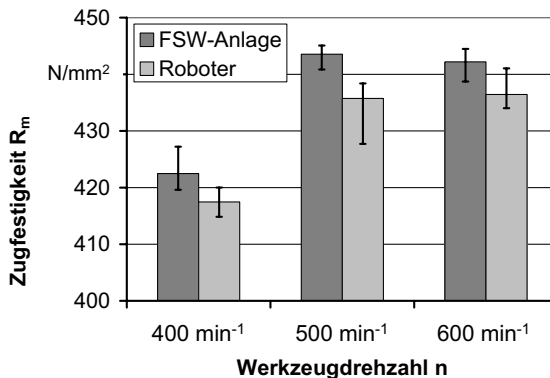


Abbildung 43: Zugfestigkeiten der geschweißten AW-2024-T3-Proben; sechs Proben je Parametersatz und Schweißanlage

Für die Qualität der erzeugten Schweißnähte kann aus den vorliegenden Ergebnissen gefolgert werden, dass die Änderungen des Werkzeuganstellwinkels

keinen oder nur einen unwesentlichen Einfluss auf die Nahtqualität nehmen. Selbst bei sehr niedrigen Werkzeugdrehzahlen kann mit dem Roboter zumindest für diese untersuchte Legierung ein Schweißprozess erzeugt werden, der von dem einer FSW-Anlage hinsichtlich der Nahtgüte fast nicht oder sogar überhaupt nicht zu unterscheiden ist.

5.4 Schlussfolgerungen zur Anlagenfähigkeit

5.4.1 Anwendungsbereich des Roboters

Die Charakterisierung der geschweißten Verbindungen sowie die Analyse des Roboterhaltens vermitteln ein aussagekräftiges Bild, durch welches die verwendeten Schweißanlagen im Vergleich zueinander bewertet werden können. So wurden insgesamt vier Legierungen bis zu einer maximalen Dicke von 8 mm erfolgreich in verschiedenen Schweißpositionen bzw. -richtungen gefügt. Die Roboteranlage wurde dabei je nach Einschweißtiefe nahe an die Belastungsgrenzen herangeführt. Die Möglichkeit einer weiteren Steigerung der Einschweißtiefe ist stark von der zu schweißenden Legierung abhängig. Zum Fügen der sehr weichen Legierung AW-6060 mit entsprechend geringen mechanischen Kennwerten im Ausgangszustand wurde bei der maximalen Dicke von 8 mm eine Prozesskraft von lediglich 5 kN vorgegeben. Das Limit einer dauerhaften Belastung liegt zumindest für die Schweißposition PA bei etwa 10 kN bis 12 kN (VOELLNER ET AL. 2006), weshalb angenommen werden kann, dass mit dem Roboter auch 10 mm starke Materialien geschweißt werden können. Es ist jedoch zu beachten, dass mit steigender Einschweißtiefe oft auch ein Werkzeug mit größerer Schulter gewählt werden muss, wodurch auch eine Erhöhung der Prozesskraft erforderlich ist, um eine ausreichende Verdichtung des plastifizierten Werkstoffes unter der Werkzeugschulter zu gewährleisten. Die Legierung AW-5083 erforderte bereits bei der Einschweißtiefe von 6 mm eine Prozesskraft von 8 kN, weshalb hier nur noch geringe Steigerungen der Einschweißtiefe zu erwarten sind. Die Schweißversuche mit der Legierung AW-2024 wurden dagegen bereits bei der Blechstärke von nur 2,3 mm mit Prozesskräften durchgeführt, die in der gewählten Schweißposition an die Belastungsgrenzen des Roboters heranreichen. Für höhere Einschweißtiefen muss daher ggf. auf optimierte Schweißpositionen ausgewichen werden, wie die Verteilung der maximalen Belastungen im Arbeitsbereich des Roboters zeigt (vgl. Abschnitt 4.2) und was offenbar bereits erfolgreich umgesetzt wurde (SMITH & HINRICHS 2006).

5.4.2 Qualität der erzeugten Schweißnähte

Es wurde gezeigt, dass der Roboter in der Lage ist, auch in unterschiedlichen Schweißpositionen Nahtqualitäten zu erzeugen, die den auf konventionellen Schweißanlagen hergestellten Verbindungen ebenbürtig sind. Dies gilt zunächst für die gewählten Legierungen in Verbindung mit den verwendeten Prozessparametern. Es ist davon auszugehen, dass diese Ergebnisse auch auf weitere Legierungen übertragen werden können, die mit ähnlichen Schweißparametern gefügt werden. Dennoch sind anhand der Schweißergebnisse Unterschiede zwischen den untersuchten Anlagen festzustellen. Die Messungen der Prozesskräfte belegen, dass das Robotersystem zu Schwingungen neigen kann, deren Amplituden im Vergleich zu denen der FSW-Anlage sehr viel höher sind. Dieses Verhalten ist durch die geringere Steifigkeit des Robotersystems und auch des Bearbeitungstisches zu begründen. Die Anregungen finden je nach Werkzeugdrehzahl in einem Bereich statt, der sich mit den Eigenfrequenzen des Roboters deckt. Das gute Dämpfungsverhalten des FSW-Prozesses selbst schwächt Schwingungen jedoch auf einen unkritischen Zustand ab. Anhand der durchgeführten Werkstoffprüfungen wurde gezeigt, dass diese Unterschiede zu FSW-Anlagen offenbar keine Auswirkungen auf die Qualität der Verbindung haben.

Neben den identischen Nahtqualitäten ist auch eine Übertragbarkeit der Prozessparameter im Allgemeinen gut gewährleistet. Bei überwiegend gleichen Schweißparametern können auch vom Roboter in beiden betrachteten Schweißlagen und selbst mit unterschiedlichen Rührreißschweißspindeln Nahtqualitäten erzeugt werden, die von herkömmlichen FSW-Anlagen erreicht werden. Diese Übertragbarkeit ist jedoch nur dann gewährleistet, wenn auch der Wärmehaushalt und damit die Temperaturen am Werkzeug vergleichbar sind. Im Rahmen dieser Arbeit wurden diese Temperaturen zwar nicht gemessen, aber die bereits in Abschnitt 5.2.3.2 erwähnten wachsenden Auswürfe der vom Roboter erzeugten Nähte bei relativ langen Schweißzeiten sind ein gutes Indiz für zunehmend warme Prozessbedingungen. Die selbe Schlussfolgerung wurde auch in IMWF STUTTGART & FT ILMENAU (2007, S. 60 ff.) gezogen, wo mit Hilfe der Thermographie die Temperaturen an der Schweißstelle zweier unterschiedlicher Schweißanlagen gemessen wurden, die unter ansonsten gleichen Bedingungen betrieben wurden. Die Ursache für die verschiedenen Wärmehaushalte wurde auf unterschiedliche Werkzeugaufnahmen und damit unterschiedliche Wärmeableitungen in die Schweißspindel zurückgeführt. Auch die unterschiedlichen Ergebnisse aus den Schweißversuchen an dem Gusswerkstoff zeigen anhand der Nahtoberflächen und

der Querschlitze, dass eine Übertragbarkeit auch für unterschiedliche Schweißpositionen des Roboters nicht vollends gegeben ist, wenn auch die für diese Legierung gewählten Parametersätze als grenzwertig einzustufen sind.

5.4.3 Kraft-/Positionsregelung

Wie die Literatur bereits zeigt (siehe Abschnitt 3.2.4), können mit Robotern nur in Verbindung mit einer Kraftregelung reproduzierbar gute Schweißergebnisse erzielt werden. Im Falle des porösen Gusswerkstoffes zeigen sich aber auch Nachteile des Systems. Zwar wurden mit dem Roboter Schweißverbindungen mit guten Nahteigenschaften erzeugt. Dennoch bewirkt eine konstante Anpresskraft des Werkzeuges abhängig vom Zustand des Gussmaterials ein mehr oder minder tiefes Eintauchen des Werkzeuges in den Werkstoff, was unter ungünstigen Bedingungen sogar zu einer Kollision des Werkzeuges mit der Spannvorrichtung führen kann. An dieser Stelle erweist sich der positionsgeregelte Betrieb der anderen in den Untersuchungen verwendeten Anlagen vorteilhaft. Durch ihre hohe Steifigkeiten können mit diesen die Werkzeuge exakt geführt werden, so dass fehlerfreie Schweißnähte bis zu einem gewissen Grad auch bei inhomogenem Material erzeugt werden können. Dieser positionsgeregelte Betrieb ist beim Roboter jedoch nicht möglich, allenfalls noch bei homogenem Ausgangsmaterial denkbar.

5.4.4 Systemverhalten beim Eintauchen und Schweißen

Die Schweißversuche zeigen, dass mit Robotern in einem großen Anwendungsbereich ein stabiler Schweißprozess erzeugt werden kann. Etwaige Schwingungen, die durch den FSW-Prozess erzeugt werden, werden durch diesen selbst stark gedämpft, so dass das Werkzeug ohne Vibrationen durch die Fügepartner hindurch geführt werden kann. Das Verhalten des Roboters beim Eintauchen mag zwar nicht kritisch in Bezug auf die dynamischen Belastungen der Anlage sein, die Vibrationen können jedoch durch einfache Maßnahmen weitgehend unterdrückt werden:

- Eine optimierte Pin-Geometrie in Form einer Verjüngung am Fuß des Pins kann eine Art Zentrierung des Werkzeuges bewirken. Dieser Effekt wird beispielsweise bei konventionellen Bohrern durch den Spitzenwinkel oder sogar separate Zentrierspitzen ausgenutzt. Zusätzlich wird durch eine kleinere Fläche der Anpressdruck des Werkzeuges auf die Fügepartner während des Eintauchens erhöht, wodurch die Eintauchzeit gegenüber der Verwendung eines breiten Pins verkürzt werden kann. Die Verjüngung des

Pins eines Rührreibschweißwerkzeuges geht jedoch mit einer Abnahme der Toleranz gegenüber einer seitlichen Fehlpositionierung des Werkzeuges zur Schweißnaht einher. Durch den geringeren Querschnitt steigt insbesondere beim robotergeführten Schweißprozess die Gefahr eines *lack of fusion*.

- Um die Hebelarme und damit Auslenkungen so gering wie möglich zu halten, empfiehlt es sich, möglichst kurze Werkzeuge zu verwenden. Die Anwendung exakt gefertigter und standardisierter Werkzeugaufnahmen erhöht zudem die Rundlaufgenauigkeit des Werkzeuges, was Taumelbewegungen beim Eintauchprozess verringert.
- Durch die Optimierung der Eintauchstrategie können ebenfalls positive Effekte erzielt werden. Ziel muss es sein, möglichst schnell eine hohe Prozesskraft des Werkzeuges auf die Fügepartner herzustellen, ohne dabei das Werkzeug schlagartigen Belastungen auszusetzen. Dadurch kann der Werkzeugpin entsprechend schnell in die Fügepartner eingedrückt werden, wodurch das Werkzeug stabilisiert wird. Dieser Ansatz wurde bei den Versuchen gemäß Abschnitt 5.2 verfolgt und zeigt vielversprechende Resultate. Auch eine hohe Werkzeugdrehzahl beim Eintauchprozess kann zur Vermeidung von Schwingungen beitragen und gleichzeitig dem Prozess mehr Wärme zuführen. Zudem kann dadurch die Eintauchzeit des Werkzeuges signifikant verkürzt werden.
- Die Eintauchzeit des Werkzeuges kann ebenfalls durch Vorbohren positiv beeinflusst werden. Diese Lösung besitzt zwei Vorteile: Zum Einen wird das Werkzeug durch die bereits vorhandene Bohrung geführt und kann daher nicht zu den gezeigten Schwingungen und Vibrationen an der Blechoberfläche angeregt werden. Zum Anderen kann durch die fehlende Gegenkraft die Werkzeugschulter schneller einen Kontakt zur Werkstückoberfläche herstellen und damit Wärme für den Schweißprozess generieren. Bei Verwendung von Bobbin Tools ist dieses Verfahren sogar obligatorisch. Da das Vorbohren jedoch einen zusätzlichen Prozessschritt erfordert, ist diese Variante mit einem erhöhten Aufwand verbunden.
- Auch die Zuhilfenahme externer Wärmequellen kann den Eintauchprozess beschleunigen. Hier bietet sich beispielsweise die lokale Vorwärmung des Eintauchpunktes durch einen Lichtbogen (Isolierung des Werkzeuges notwendig!), eine Gasflamme, Induktion oder einen Laserstrahl an. Es sind

jedoch auch diese Lösungen sehr aufwändig und ihre Wirtschaftlichkeit fraglich.

Obwohl die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche positive Ergebnisse zeigen, kann dennoch die Möglichkeit eines kritischen Strukturverhaltens nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Das dynamische Verhalten der Anlage ist von sehr vielen Parametern abhängig, deren Überprüfung einen nicht realisierbaren Versuchsplan erfordern würde. So ist zu vermuten, dass das System speziell bei stark asymmetrischen Werkzeuggeometrien möglicherweise stark angeregt wird. Dennoch weisen die durchgeführten Untersuchungen bereits auf ein sehr großes Betriebsfenster des Roboters hin, welches bislang nur durch die Maximalbelastungen der Anlage beschränkt ist.

5.4.5 Auswirkungen der Prozesskräfte auf die elastische Strukturverformung des Roboters

Die Deformationen der Endkrater offenbaren insbesondere bei Materialien, die hohe Prozesskräfte erfordern und verursachen, größere Abweichungen des TCP im Bereich einiger Millimeter vom programmierten Sollwert. Berechnungen zeigen jedoch, dass aus diesen Prozesskräften in erster Linie hohe Belastungen der Grundachsen resultieren. Eine Verdrehung der Grundachsen führt zu einer Änderung der Werkzeugorientierung um weniger als $0,5^\circ$ gegenüber dem programmierten Sollwert. Durch die gewählte Anordnung der Spindel am Flansch (koaxial zu diesem) entstehen in den Handachsen hingegen relativ geringe Drehmomentbelastungen. Diese tragen jedoch auch zu einer Änderung des Anstellwinkels bei. Insgesamt befinden sich die gemessenen Abweichungen in einem hinsichtlich der Nahtqualität unkritischen Bereich. Damit kann selbst bei hohen Prozesskräften davon ausgegangen werden, dass die Übertragung von Prozessparametern von steifen FSW-Anlagen auf den Roboter ohne aufwändige Korrekturen vorgenommen werden kann. Für lineare Schweißnähte ist daher lediglich die seitliche Abdrängung des TCP durch entsprechende Gegenmaßnahmen zu kompensieren. Im Falle ebener, zweidimensionaler Schweißnähte ist die Bahnkorrektur unwesentlich schwieriger. Mit einfachen Nahtfolgesensoren, wie sie bereits bei robotergeführten (Laserstrahl-)Schweißvorgängen eingesetzt werden, können diese Abweichungen automatisch korrigiert und so ein robuster Schweißbetrieb garantiert werden (REEK 2000, S. 51 ff.). Kamerasysteme, welche die Position des Roboters als nicht mitgeführte Messinstrumente überwachen, können hierfür beispielsweise eingesetzt werden (METRIS 2008; MONSARRAT ET AL.

2004). Für Nietprozesse im Flugzeugbau befinden sich derartige Systeme bereits erfolgreich im Produktionseinsatz (MONSARRAT ET AL. 2007). FSW-Schweißnähte im dreidimensionalen Bereich erfordern jedoch eine erweiterte Berücksichtigung der Bahnführung des TCP. Dies bildet den zentralen Punkt des folgenden Kapitels 6.

6 Schweißen enger Radien mit einem Roboter

6.1 Allgemeines

Die Flexibilität eines Industrieroboters legt unter anderem auch die Möglichkeit nahe, komplexe Strukturen mittels FSW zu fügen, soweit dies prozessseitig realisierbar ist. Einzelne Veröffentlichungen (DUBOURG ET AL. 2008; SHINODA ET AL. 2001) geben Hinweise darauf, dass Orbitalnähte mit kleinen Durchmessern durchaus mit FSW hergestellt werden können, jedoch kann aus der erwähnten Prozessführung (Drehung des Werkstückes unter dem rotierenden Werkzeug) geschlossen werden, dass dieser Prozess mit einer Werkzeugmaschine oder zumindest im positionsgeregelten Betrieb durchgeführt wird. Bei diesen speziellen Anwendungen kann die Werkzeugführung relativ einfach erfolgen, wohingegen bei komplexeren Schweißnähten die Fügepartner in der Regel fest eingespannt sind und während des Schweißens ortsfest bleiben müssen. Damit muss wiederum die Relativbewegung zwischen Werkzeug und Fügeteil alleine von der Schweißmaschine ausgeführt werden, was mit Robotern theoretisch gut bewerkstelligt werden kann.

Im Rahmen der folgenden Abschnitte wird der robotergeführte Schweißprozess über unterschiedlich konvex gekrümmte Oberflächen betrachtet. Diese werden durch einen Versuchsaufbau realisiert, bei dem das Werkzeug um 90° über einen zylindrischen Körper geführt werden muss. Vor und nach dieser Krümmung existiert eine gerade An- und Abfahrtstrecke, siehe Abbildung 44. Im Fokus der Untersuchungen liegen sowohl das Verhalten des Roboters als auch der Prozess und dessen unmittelbare Umgebung. Neben dem Prozess- und Anlagenverständnis soll es auch Ziel sein, ein einheitliches Werkzeug nutzen zu können, welches sich beim Schweißen in der Ebene bereits bewährt hat und auch über gekrümmte Oberflächen zufriedenstellende Ergebnisse liefern soll. Als Ausgangsbasis dienen daher die Werkzeuge, die auch für die Untersuchungen in Kapitel 5 verwendet wurden. Im Vorfeld der für diesen Teil relevanten Ergebnisse wird der Prozess überdies theoretisch analysiert und eine Einschätzung darüber im Vergleich zu Schweißnähten in der Ebene erarbeitet. Zum besseren Verständnis der sich ändernden Bedingungen werden als Hilfsmittel ein CAD-Modell sowie mathematische Modelle herangezogen.

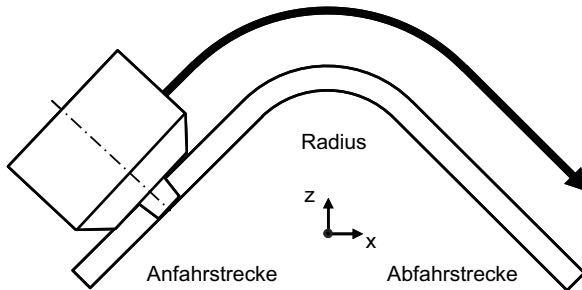


Abbildung 44: Versuchskontur zum Schweißen stark gekrümmter Oberflächen

6.2 Übergang von ebenem zu konvexem Schweißnahtverlauf

6.2.1 Kontakt des Werkzeuges auf der Fügeiloberseite

Beim Übergang vom Schweißen in der Ebene in gekrümmte Oberflächen sind Veränderungen des Prozesses zu erwarten, die aus der Wechselwirkung des Werkzeuges mit den Fügepartnern entstehen. Zum Verständnis der Effekte beim Schweißen konvex geformter Bauteile wurde ein CAD-Modell erzeugt. Dieses beschreibt das Überstreichen eines Werkzeuges mit dem Schulterdurchmesser von 13 mm über die Oberfläche eines Zylinders in Umfangsrichtung. Das Werkzeug besitzt zunächst eine Schulterfläche, die innen eine konkave Oberfläche mit einem Konizitätswinkel von 10° aufweist, wie es im vorangegangenen Abschnitt 5.2 beim Schweißen in der Ebene verwendet wurde. Auf eine Modellierung des Werkzeugpins wurde an dieser Stelle verzichtet, denn es soll lediglich das Überstreichen des Werkzeuges auf der Werkstückoberfläche abgebildet werden. Die modellierten Werkstücke wurden im Nahtbereich überdies bei Bedarf aufgedickt, um eine Nahtüberhöhung nach dem Überstreichen des Werkzeuges erfassen zu können. Das Werkstück wurde mitsamt der Aufdickung schließlich mit dem überstreichenden Werkzeug verschnitten, um so überschüssiges Material zu „entfernen“. Der einmalige Verschnitt des Werkzeuges mit dem Fügepartner ohne Aufdickung erlaubt die Darstellung des theoretischen Abdruckes des Werkzeuges auf der Bauteiloberfläche, was dem Bereich entspricht, in dem das Werkzeug in hartem Kontakt mit den Fügepartnern steht.

Um eine Referenz für die Zylinder zu erhalten, wurde das Modell zunächst für die Schweißung in der Ebene erstellt. Das Werkzeug steht in diesem Fall in einem

Anstellwinkel von 2° stechend zur Oberflächennormalen. Die Eintauchtiefe des Werkzeuges beträgt im Schnittpunkt der Werkzeugachse mit der Schulterebene 0 mm. In Abbildung 45 ist gut zu erkennen, dass der hintere Teil des Werkzeuges sich sichelförmig in das Material eindrückt, wohingegen es im vorderen Teil von der Bauteiloberfläche abhebt und so stets Material unter die Schulter fördern kann. Die Skizze beschreibt hier nur den Teil des Werkzeuges, der in hartem Kontakt mit der Werkstückoberfläche steht. Im Realfall befindet sich unter der Werkzeugschulter zusätzlich plastifiziertes Material, wodurch insgesamt mehr Werkstoff mit dem Werkzeug Kontakt hat. Durch dessen Plastifizierung sind jedoch entsprechend geringe mechanische Festigkeitseigenschaften zu erwarten, weshalb für den größten Anteil der Kraftübertragung zwischen Werkzeug und Werkstück die gezeigte Fläche verantwortlich sein dürfte. Die gezeigte Betrachtung ist daher an dieser Stelle ausreichend.

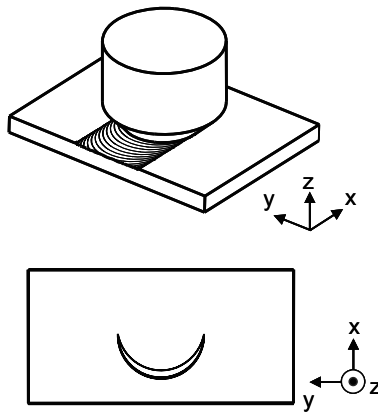


Abbildung 45: Oben: Rührreißschweißen in der Ebene; unten: theoretischer Kontakt ("Abdruck") des Werkzeuges auf dem Werkstück

Beim Schweißen über gekrümmte Oberflächen verändern sich die Kontaktverhältnisse des Werkzeuges auf dem Werkstück. Abbildung 46 zeigt dies an den drei Beispielen, die später auch im Realversuch erprobt werden. Es ist deutlich erkennbar, dass bei einer schwachen Krümmung mit einem Außenradius der Fügepartner von 104,5 mm der Werkzeugabdruck dem des Abdruckes in der Ebene zunächst noch stark ähnlich ist. Mit abnehmendem Radius verjüngt sich jedoch der Eindruck des Werkzeuges im hinteren Teil der Schulter (im Bild jeweils

unten), bis sich das Werkzeug schließlich nur noch an den Flanken auf dem Material abstützt. Um die Abdrücke abbilden zu können, musste darüber hinaus die Eintauchtiefe h' des Werkzeuges mit steigender Fügepartnerkrümmung nach oben korrigiert werden. Sie beträgt bei der Kontur mit dem Außenradius von 104,5 mm nur 0,1 mm, beim Außenradius von 54,5 mm das Doppelte und beim Außenradius von 14,5 mm sogar 0,5 mm. Diese Eintauchtiefen wurden so gewählt, dass sich Werkzeugabdrücke mit vergleichbar großen Kontaktflächen auf den Bauteilen ergeben.

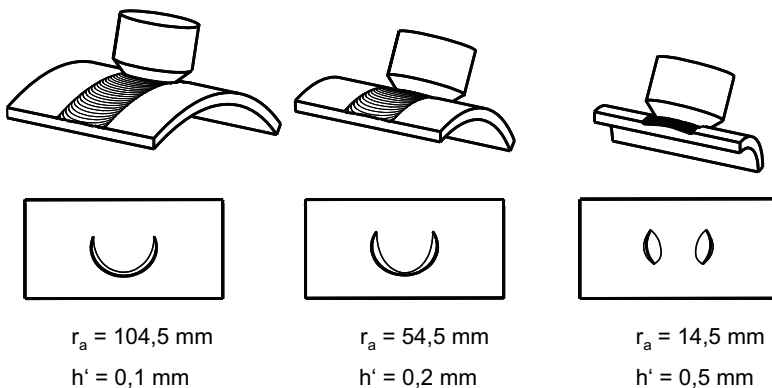


Abbildung 46: Oben: Rührreibschweißen auf zunehmend kleinen (Oberflächen-) Radien; unten sind jeweils die Kontaktflächen des Werkzeuges auf den Fügepartnern abgebildet.

6.2.2 Resultierende Nahtformen

Das Modell zeigt zudem, dass sich beim Rührreibschweißen auf unterschiedlich gekrümmten Flächen auch die Nahtform verändert. Beim Schweißen in der Ebene steht wie gezeigt lediglich die Außenkante der Werkzeugschulter im harten Kontakt mit den Fügepartnern (Abbildung 45). Da der tiefste Punkt der Werkzeugschulter bedingt durch den Werkzeuganstellwinkel im hinteren Teil liegt, verringert sich der Nahtquerschnitt im Zentrum der Fügezone beim Schweißen in der Ebene minimal (Abbildung 47 oben), verglichen mit den äußeren Bereichen der FSW-Naht. Im Realfall macht sich dieser Effekt jedoch kaum bemerkbar. Das aufgebaute Modell zeigt nun, dass sich mit zunehmender Werkstückkrümmung die Kontaktfläche auf der Schulter nach außen verlagert, die im untersuchten Fall konkav ist. Der

Anstellwinkel des Werkzeuges wird dabei konstant zu 2° stechend gegenüber der Oberflächennormalen angenommen. Damit verändert sich das Nahtprofil von einem leicht verringerten Querschnitt beim Schweißen in der Ebene hin zu einer gewölbten Naht beim Schweißen auf gekrümmten Flächen. Diese Veränderung wird in Abbildung 47 gezeigt. Während die Oberseite des Nahtquerschnittes bei einem Außenradius des Werkstückes von 104,5 mm nach Verschneidung mit dem überstreichenden Werkzeug (Schulterdurchmesser: 13 mm) annähernd geradlinig ist, zeigt der kleinste betrachtete Radius eine theoretische Wölbung der Naht von 0,88 mm, gemessen vom tiefsten Eindringpunkt des Werkzeuges in die Fügepartner. Die gestrichelten Linien markieren in der Abbildung jeweils die Flanken der Werkzeugschulter im Werkstück. Diese liegen bei den Radien aufgrund der oben erwähnten und gewählten Eintauchtiefen unterhalb der Werkstückoberfläche. Die Riefen entstehen durch die Musterung des Werkzeuges, welches in diskreten Abständen im CAD-Modell abgebildet und mit dem Zylinder verschnitten wurde.

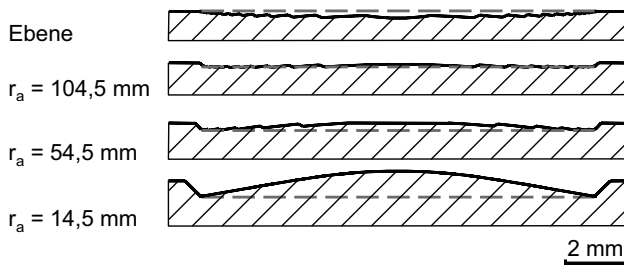


Abbildung 47: Theoretische Aufrisse der Nahtquerschnitte bei steigenden Werkstückkrümmungen

Die Ausbildung einer solchen charakteristischen Nahtform wird auch von DUBOURG ET AL. (2008, S. 3) erwähnt. Dort werden Aluminiumrohre mit einem Durchmesser von etwa 90 mm mittels FSW in Stumpfstoßkonfiguration geschweißt. Die Reduzierungen der Nahtquerschnitte wurden allerdings lediglich auf der Advancing Side der Schweißnaht beobachtet, in die allgemein ebene Werkzeugschulter war eine Spirale eingefräst. Als Ursache wird der veränderte Materialfluss infolge der oben beschriebenen, sich ändernden Kontaktbedingungen vermutet.

6.2.3 Wärmetransport in die Spannvorrichtung

Während des FSW-Prozesses wird durch die Reibung zwischen Werkzeugschulter und Füge­teil stetig Wärme erzeugt. Sie wird vorwiegend durch den angrenzenden (metallischen) Werkstoff abgeleitet, da dieser eine weit höhere Wärmeleitfähigkeit als Luft besitzt (Faktor 1.600 am Beispiel eines niedriglegierten Stahlwerkstoffes). Sie fließt dadurch sowohl in das Werkzeug als auch in Richtung der Fügepartner und damit in die Spannvorrichtung ab. Unter der Annahme, dass die Wärmeabfuhr in das Werkzeug konstant ist, ändert sich der Wärmehaushalt, sobald sich das Werkzeug aus dem ebenen Bereich dem Radius nähert. Am Radius steht für die Wärmeabfuhr nur noch etwa die halbe Masse bereit (Abbildung 48), so dass in diesem Bereich ein Wärmestau zu erwarten ist. Damit verändern sich die Prozessbedingungen hin zu einem wärmeren Prozess mit entsprechend höheren Temperaturen in den Füge­teilen.

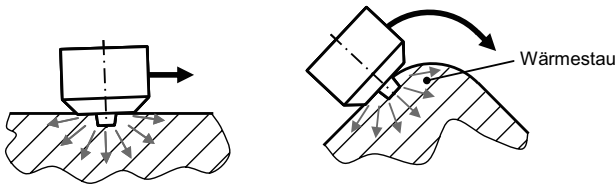


Abbildung 48: Transport der Reibwärme von der Kontaktfläche in das Werkstück; links: ebenes Werkstück; rechts: gekrümmtes Werkstück

Eine theoretische Formel für die erzeugte Leistung P wurde von COOK ET AL. (2004) aufgestellt. Diese gilt unter den vereinfachten Bedingungen einer glatten, ebenen Schulter mit einem glatten, zylindrischen Pin. Das Werkzeug steht dabei normal zur Werkstückoberfläche:

$$M_w = \frac{2}{3} \pi \cdot r_s^3 \cdot \tau + 2\pi \cdot r_p^2 \cdot l_p \cdot \tau \quad (\text{Gl. 6-1})$$

$$P = M_w \cdot \Omega \quad (\text{Gl. 6-2})$$

mit

- M_w : Drehmoment um das FSW-Werkzeug
- r_s : Radius der Werkzeugschulter
- r_p : Radius des Pins
- τ : wirkende Scherspannung

l_p : Pinlänge

Ω : Winkelgeschwindigkeit des Werkzeuges

Die wirkende Scherspannung lässt sich vereinfacht durch den Quotienten aus Reibkraft und vertikaler Kontaktfläche des Werkzeuges auf der Materialoberfläche ausdrücken:

$$\tau = \frac{F_z \cdot \mu}{r_s^2 \cdot \pi} \quad (\text{Gl. 6-3})$$

mit

μ : Reibungskoeffizient

Die Winkelgeschwindigkeit kann durch die Werkzeugdrehzahl berechnet werden:

$$\Omega = 2\pi \cdot n \quad (\text{Gl. 6-4})$$

Damit lassen sich obige vier Gleichungen zu einer Formel zusammenfassen:

$$P = \frac{4}{3} \pi \cdot r_s \cdot n \cdot F_z \cdot \mu \cdot \left(1 + 3 \frac{r_p^2 \cdot l_p}{r_s^3} \right) \quad (\text{Gl. 6-5})$$

Aus dieser Formel kann eine Streckenenergie abgeleitet werden, welche sich aus dem Quotienten der Leistung und der Schweißgeschwindigkeit ergibt:

$$E^s = \frac{P}{v} = \frac{4}{3} \pi \cdot r_s \cdot n \cdot F_z \cdot \frac{1}{v} \cdot \mu \cdot \left(1 + 3 \frac{r_p^2 \cdot l_p}{r_s^3} \right) \quad (\text{Gl. 6-6})$$

Die Gleichung ist zwar stark vereinfacht, dennoch zeigt sie, dass verschiedene Größen herangezogen werden können, um die eingebrachte Streckenenergie zu verändern. Um die Energie über dem Radius zu beeinflussen, können als einstellbare Größen die Kraft F_z , die Werkzeugdrehzahl n oder die Schweißgeschwindigkeit v herangezogen werden. Alle verbleibenden Größen sind während der Schweißaufgabe entweder nicht veränderlich oder stellen sich wie der wirkende Reibungskoeffizient in Abhängigkeit der anderen Größen ein.

6.2.4 Mögliche resultierende Nahtmerkmale

Die veränderten Kontaktbedingungen sowie die sich daraus ergebende theoretische Nahtform lassen im Vorfeld der Untersuchungen Rückschlüsse auf vier Probleme zu, die zu Fehlern in der Naht führen können (Abbildung 49).

Die möglicherweise zunehmende Eintauchtiefe führt zu einem ersten Problem, wenn für Schweißnähte in der Ebene und auf gekrümmten Flächen das identische Werkzeug verwendet werden soll: Bei einer konstanten Bauteildicke und konstant langem Pin besteht die Möglichkeit, dass das Werkzeug im Bereich gekrümmter Flächen zu tief in den Werkstoff eindringt, während es zum Schweißen auf ebenen Flächen korrekt eingestellt ist. Die Folge wäre dann eine Kollision des Werkzeugpins mit der Spannvorrichtung und damit ein Nahtwurzelfehler. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass ein für eine gekrümmte Fläche korrekt eingestelltes Werkzeug auf Flächen mit geringerer Krümmung nicht ausreichend tief in die Fügepartner eintaucht und damit ebenfalls Nahtwurzelfehler in Form eines *lack of penetration* provoziert.

Ein zweites Problem entsteht durch die erwähnte Teilung der Kontaktfläche des Werkzeuges auf den Fügepartnern bei steigender Bauteilkrümmung. Diese Teilung ist dadurch bedingt, dass das Werkzeug nicht nur in der Zone vor dem Schweißpunkt, sondern auch im hinteren Teil der Schulter von den Fügepartnern abhebt. Damit ist eine wichtige Funktion der Werkzeugschulter nicht mehr gegeben. Sie kann im hinteren Teil der Schweißzone den Werkstoff nicht mehr genügend verdichten und somit keine fehlerfreie Schweißnaht erzeugen. Die mögliche Folge sind Fehler, die vom einfachen *surface galling* bis hin zu inneren bzw. offenen, sichtbaren Nahtfehlern reichen können.

Die für ebene Schweißnähte bewährte Werkzeugkontur führt zu einer Überhöhung in der Mitte des Nahtquerschnittes, während das Werkzeug in den Randbereichen tief in die Fügepartner eindringt. Die Folgen dieses Effektes sind neben der Überhöhung auch zwei Kerben an den Flanken der Schweißnaht, die durch das Werkzeug eingebracht werden und somit den Querschnitt der Fügepartner und damit auch die Festigkeit der Verbindung verringern.

Bei konstanten Prozessparametern kann infolge eines sich ändernden Wärmehaushaltes ein Wärmestau im Bereich des zu schweißenden Radius entstehen. Dadurch sind die Prozessbedingungen im Radius heißer als auf einer ebenen Oberfläche, was entsprechende Nahtmerkmale zur Folge haben kann.

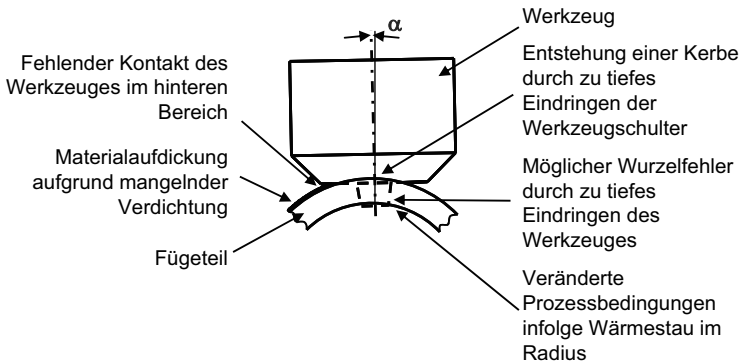


Abbildung 49: Probleme, die beim Rührreibschweißen über gekrümmte Flächen entstehen können

6.3 Erwarteter Einfluss des Roboters

Messungen der Prozesskräfte, die in Abschnitt 5.2.3.1 ausgewertet wurden, zeigen die Kraftkomponenten in allen drei Raumrichtungen, die den TCP des Roboters im Gegensatz zu den Werkzeugbezugspunkten von CNC- oder FSW-Anlagen von seiner programmierten Bahn erkennbar ablenken. Die Auswirkungen einer solchen Ablenkung hingegen sind nach den einzelnen Richtungskomponenten unterschiedlich zu bewerten. Die Abweichung in Axialrichtung des Werkzeuges wird von der integrierten Kraftregelung kompensiert und spielt daher beim Schweißen in der Ebene wie auch über gekrümmte Flächen eine untergeordnete Rolle. Die seitliche Abweichung aus der Schweißbahn kann im Extremfall zu ungenügenden Nahtqualitäten führen, die aus Nahtfehlern wie einem *lack of fusion* resultieren. Im Gegensatz zum Schweißen ebener Fügeteile kommt beim Schweißen gekrümmter Bauteile der Abdrängung des TCP entgegen der Schweißrichtung nun eine besondere Bedeutung zu: Bei der zu untersuchenden Schweißnahtgeometrie wird das Werkzeug aus einem zunächst geraden Nahtverlauf in einen gekrümmten geführt. Eine Abdrängung des TCP entgegen der Vorschubrichtung führt dazu, dass bei einer theoretisch exakten Programmierung des Roboters das Werkzeug zu früh umorientiert wird. Dadurch verringert sich der Anstellwinkel des Werkzeuges gegenüber der Fügeoberfläche und es taucht u. U. mit dem vorderen Bereich in das Material ein, während das Werkzeug im hinteren Bereich weiter vom Material abhebt. Die Folge wäre ein Eingraben des Werkzeuges in die Fügeteile und damit ein Zusammenbruch des Schweißprozesses. Aus diesem Grund ist es bei FSW-

Maschinen mit geringen Steifigkeiten wie dem Roboter erforderlich, die Abdrängung entgegen der Schweißrichtung zu kompensieren. Der notwendige Wert für diese Verzögerung ist jedoch von vielen Einflussgrößen wie der zu schweißenden Legierung, der Einschweißtiefe, den Prozesskräften, die sich beim Schweißen ergeben, sowie der Schweißposition und damit der Lage des Roboters im Raum abhängig. Er kann daher im Vorfeld nicht berechnet werden und muss folglich experimentell ermittelt werden.

Ein kritischer Punkt ist auch die Bewegung des Roboters selbst. Die Kontur der Schweißnaht kann relativ einfach durch eine geradlinige Bewegung, eine Kreisbewegung sowie abschließend eine zweite geradlinige Bahn dargestellt werden. Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 erläutert, muss die programmierte Bahn des Roboters an den Stützpunkten überschleift werden, um ein Verzögern des TCP bis zum Stillstand und ein erneutes Beschleunigen an den jeweiligen Übergängen der Einzelbewegungen zu unterbinden. Die dabei vorgegebene Überschleifdistanz ist damit verbunden, dass der Roboter innerhalb dieser Distanz eine nicht beeinflussbare Bewegung und damit auch Abweichungen von der Sollbahn ausführt. Dies kann auch der Fall sein, wenn eine aktuelle Bewegung tangential und ohne Änderung der Orientierung in eine andere Bewegung übergeführt wird. Dadurch ist zu erwarten, dass die gewählte Kontur mit Blick auf die Lage und Orientierung des TCP nicht mehr exakt abgefahren werden kann. Aus diesem Grund muss während der durchzuführenden Versuche die Bewegung des TCP im Raum sowie dessen Geschwindigkeit überwacht werden, um die Ungenauigkeiten in der Überschleifbewegung mit den möglichen Programmeinstellungen gezielt zu minimieren. Dies gilt ebenso für die Änderung von FSW-Prozessparametern, die exakt an der gewünschten Stelle ausgeführt werden müssen.

6.4 Abhilfestrategien

6.4.1 Variation des Anstellwinkels über dem Radius

Aufgrund der oben gezeigten, theoretisch begründeten Probleme werden Strategien vorgestellt, um diese Probleme abzuschwächen oder sogar zu beseitigen. Dafür eröffnen sich Möglichkeiten in der Gestaltung der Werkzeugbahnführung und des Werkzeuges selbst. Dem fehlenden Kontakt des hinteren Werkzeugteiles kann durch eine Vergrößerung des Anstellwinkels entgegengewirkt werden. Wie Abbildung 49 am Beispiel einer Kontur mit einem Außenradius von 14,5 mm und

einem Werkzeugschulterdurchmesser von 13 mm zeigt, hebt die Werkzeugschulter bei einem Anstellwinkel von 2° sowohl vorne als auch hinten vom Werkstück ab. Abbildung 50 verdeutlicht dagegen, dass sich durch eine Erhöhung des Anstellwinkels gegenüber der Flächennormalen des Werkstückes die Werkzeugkontaktfläche wieder in den hinteren Bereich des Werkzeuges verlagert und sich ab einem Anstellwinkel von etwa $7,5^\circ$ wieder zu einer einzigen Fläche zusammenschließt. Diese theoretische Studie wurde unter den Randbedingungen erstellt, dass das Werkzeug die bislang verwendete konische Kontur aufweist, einen Durchmesser von 13 mm besitzt und eine gekrümmte Fläche mit einem Außenradius von 14,5 mm überstreicht. Die Eintauchtiefe des Werkzeuges beträgt in allen vier Fällen 0,5 mm.

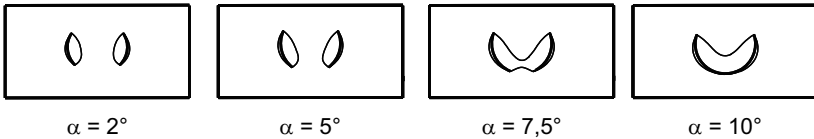


Abbildung 50: Veränderung der Werkzeugkontaktfläche (Draufsicht) bei Erhöhung des Werkzeuganstellwinkels; Schulterdurchmesser des Werkzeuges: 13 mm; Außenradius der gekrümmten Fläche: 14,5 mm

Der notwendige Anstellwinkel, bei dem die Schulter mit der hinteren Kante des Werkstückes kontaktiert, lässt sich geometrisch durch ein allgemeines Dreieck mit den Seiten $(r_a - h')$ - r_s - r_a beschreiben (Abbildung 51). Dabei ist vorausgesetzt, dass die theoretische Eintauchtiefe h' wie beim positionsgesteuerten FSW-Prozess bekannt ist. Nach dem Kosinussatz besteht folgender Zusammenhang:

$$r_a^2 = (r_a - h')^2 + r_s^2 - 2 \cdot (r_a - h') \cdot r_s \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) \quad (\text{Gl. 6-7})$$

Mit $\cos\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \sin \alpha$ vereinfacht und aufgelöst nach dem notwendigen Anstellwinkel α lautet die Formel:

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{r_s^2 + h'^2 - 2 \cdot r_a \cdot h'}{2 \cdot (r_a - h') \cdot r_s}\right) \quad (\text{Gl. 6-8})$$

Ein negativer, also schleppender Anstellwinkel würde zur Folge haben, dass das Werkzeug mit der vorderen Schulterkante in den Werkstoff eintaucht, was zu einem

instabilen Rührreibschweißprozess führen würde. Dies kann bei einem vergleichsweise zu großen h' der Fall sein, so dass der Term innerhalb der Klammer negativ wird. Weiterhin ist bei dieser Formel zu bemerken, dass der notwendige Anstellwinkel für sehr kleine h' im Wesentlichen vom Verhältnis $r_s/(2r_a)$ abhängig ist. Seine Berechnung ergibt sich aus der nachfolgenden Betrachtung.

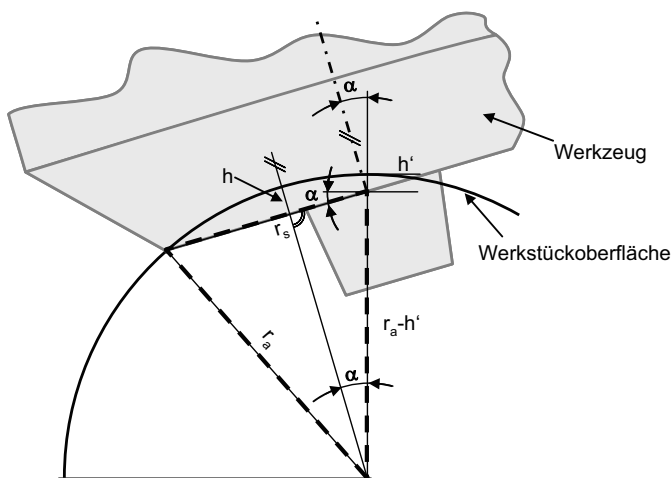


Abbildung 51: Geometrie zur Berechnung des Anstellwinkels, der für einen ausreichenden Kontakt der Schulter auf dem Werkstück notwendig ist

Wie die Skizze zeigt, steigt unter der programmierten Eintauchtiefe h' auch die reale Eintauchtiefe h des Werkzeuges. Vereinfachend ist hier ein Werkzeug angenommen, bei dem die tiefste Stelle der Schulter durch den Radius des Werkzeuges, also der Schulteraußenkante, gegeben ist. Diese Vereinfachung beinhaltet damit sowohl Werkzeuge mit konkav geformten als auch ebenen Schulterflächen. Die Eintauchtiefe h lässt sich wie folgt bestimmen:

$$h = r_a - (r_a - h') \cdot \cos \alpha \quad (\text{Gl. 6-9})$$

Als Beispiel sei eine programmierte Eintauchtiefe h' von 0,1 mm, ein Werkstückradius r_a von 14,5 mm und ein Radius der Werkzeugschulter r_s von 6,5 mm gegeben. Daraus resultieren ein notwendiger Anstellwinkel α von 12,14° sowie eine maximale Eintauchtiefe h von 0,42 mm.

Für die Variation der Größen *Werkzeugschulterdurchmesser* und *Radius der Werkstückoberfläche* haben diese Formeln zwei allgemeine Konsequenzen:

- Je größer bei gegebener Werkstückkrümmung und Eintauchtiefe h' der Durchmesser der Werkzeugschulter ist, desto weiter muss der Werkzeuganstellwinkel vergrößert werden, damit die hintere Werkzeugkante in Kontakt mit dem Werkstück steht. Abbildung 52 verdeutlicht diesen Zusammenhang unter der Randbedingung einer konstant angenommenen Anfangseintauchtiefe h' von 0,1 mm:

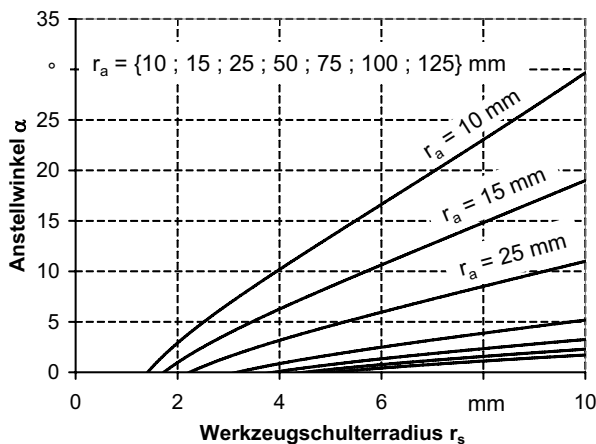


Abbildung 52: Notwendiger Anstellwinkel α in Abhängigkeit des Werkzeugschulterradius r_s für ausgewählte Werkstückradien

- Mit der Vergrößerung des Werkzeugschulterradius vergrößert sich gleichzeitig zum notwendigen Anstellwinkel die reale Eintauchtiefe des Werkzeuges h im Werkstück. Diese Aussagen gelten streng genommen nur für positionsgesteuerte Schweißmaschinen, bei denen die Werkzeugposition relativ zum Bauteil vorgegeben werden kann. Bei kraftgesteuerten Anlagen kann die Aussage nicht zutreffen, da sich die Eintauchtiefe den Prozessbedingungen anpasst. Dennoch ist auch beim kraftgesteuerten Prozess ein Anstieg der realen Eintauchtiefe zu erwarten. Abbildung 53 zeigt die entsprechenden Abhängigkeiten graphisch anhand ausgewählter Werkstückradien.

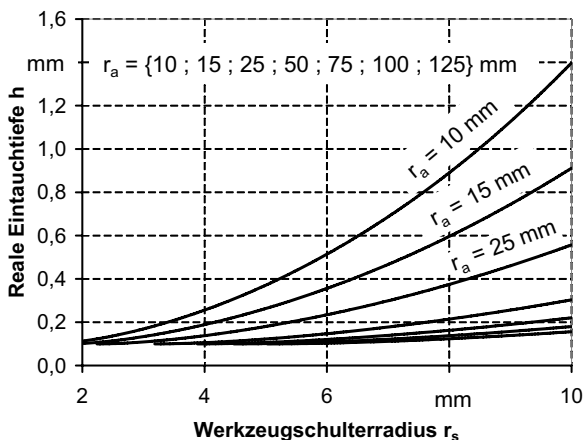


Abbildung 53: Für einen vollständigen Schulterkontakt notwendige reale Eintauchtiefe h in Abhängigkeit des Radius der Werkzeugschulter; die programmierte Eintauchtiefe h' beträgt konstant 0,1 mm.

Mit diesen Zusammenhängen kann gezeigt werden, dass für kleine Bauteilradien der FSW-Prozess unter Umständen nur sehr schwer einstellbar ist. Für die vorliegende Schweißaufgabe bedeutet dies weiterhin, dass das Werkzeug kurz vor Beginn und kurz nach Ende des Bauteilradius in Form einer Vergrößerung des Anstellwinkels umorientiert werden muss. Hierfür sind weitere Stützpunkte im Programm nötig, an denen diese Bewegungen ausgeführt werden können. Bei allen Stützpunkten müssen die Bewegungen wiederum miteinander verschliffen werden, wodurch die Genauigkeit der Werkzeugführung abnehmen kann. Damit ist diese Strategie zwar theoretisch hilfreich, praktisch jedoch mit Schwierigkeiten verbunden.

6.4.2 Änderung der programmierten Bahn

Eine Veränderung des Anstellwinkels über einer Schweißbahn kann auch dadurch erreicht werden, dass die programmierte Schweißbahn von der realen Kontur abweicht. Dies setzt jedoch voraus, dass die Schweißanlage mit einer Kraftregelung ausgestattet ist, die während des Prozesses das Werkzeug in axialer Richtung so korrigiert, dass es einen stetigen Kontakt zur Bauteiloberfläche besitzt.

Abbildung 54 zeigt den Einfluss einer Verschiebung V der programmierten Bahn (gestrichelte Linie) gegenüber der Fügeteilkontur auf den Werkzeuganstellwinkel. Die Kontur besteht hierbei aus einem geraden Abschnitt, der in einen gekrümmten mit dem Radius r_a übergeht. Betrachtet wird hier der Zeitpunkt, zu dem sich das Werkzeug im Schweißprogramm noch auf einer geradlinigen Bewegung befindet, während das Werkstück bereits in den gekrümmten Teil übergegangen ist. Durch das Zurückweichen des Werkstückes unter dem Werkzeug korrigiert die Kraftregelung dessen axiale Position um den Betrag k_w . Durch diese kombinierte Bewegung resultiert ein um $\Delta\alpha$ erhöhter Anstellwinkel des Werkzeuges auf dem Fügeteil, was zu verbesserten Kontaktbedingungen führt.

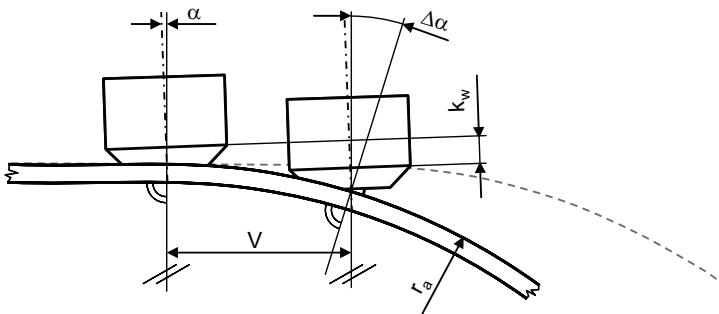


Abbildung 54: Erhöhung des Anstellwinkels durch Verzögerung der Radiusbewegung; die verschobene Bahn ist gestrichelt dargestellt.

Wird nun die Bahnführung des TCP gegenüber der realen Kontur geschickt verändert, kann der Werkzeuganstellwinkel über dem Radius gezielt erhöht werden. Der Vorteil hierbei ist eine einfache Anpassung der vorhandenen Stützpunkte im Schweißprogramm, ohne neue Stützpunkte zur Erhöhung des Anstellwinkels einführen zu müssen. Als Möglichkeiten bieten sich hierzu eine Verschiebung der Schweißbahn oder auch eine Variation der Bahngeometrie selbst an.

6.4.3 Optimierung der Schultergeometrie

In Abschnitt 6.2.1 wurde gezeigt, dass sich mit kleiner werdendem Werkstückradius die Kontaktfläche des Werkzeuges auf dem Werkstück ungünstig verändert und sich bei konkav geformten Werkzeugschultern Nahtwölbungen ausbilden können (Abschnitt 6.2.2). Ein Ansatz, um die Werkzeugkontaktfläche zu verändern, ist die

Anpassung des Werkzeuges selbst. Wird nun die Form der Werkzeugschulter verändert, ändert sich auch die Form des Werkzeugabdruckes auf dem Werkstück und damit das daraus resultierende Nahtquerschnittsprofil. So führt nach dem aufgebauten CAD-Modell der entstehenden Schweißnahtkontur die Verwendung einer flacheren, ebenen Werkzeugschulter bei sonst gleichen Einstellungen zwar nicht dazu, dass das Werkzeug vollen Kontakt mit dem Werkstück im hinteren Bereich hat. Eine ausreichende Verdichtung des Werkstoffes ist dadurch nicht gewährleistet, aber der Kontakt ist flächig und das resultierende Nahtquerschnittsprofil zeigt eine dementsprechend flache Kontur. Abbildung 55 zeigt das Ergebnis zweier Modelle (flache Schulter / flache Schulter mit Riefen) grafisch. Die Schweißrichtung ist in allen Draufsichten vertikal nach oben auf einem Zylinder mit dem Radius r_a von 14,5 mm. Der Werkzeuganstellwinkel beträgt dabei in jeder der drei gezeigten Varianten 2° .

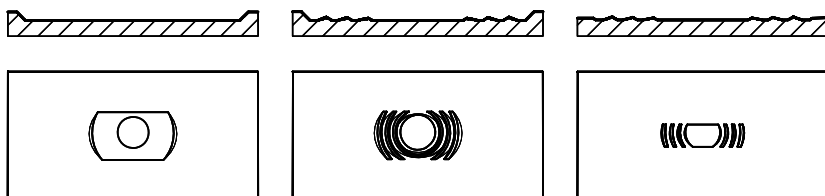


Abbildung 55: Werkzeugabdrücke mit Querschnittsprofil auf einer Oberfläche mit $r_a = 14,5 \text{ mm}$; links: flache Schulter, Eintauchtiefe 0,5 mm; Mitte: Schulter mit Riefen, Eintauchtiefe 0,5 mm; rechts: Schulter mit Riefen, Eintauchtiefe 0,1 mm

Die linke Variante zeigt die Verwendung einer glatten Schulter ohne Kavität. Dadurch ist der Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück flächig und das Querschnittsprofil entsprechend eben. Eine Nahtüberhöhung, wie sie in Abbildung 47 unten gezeigt ist, kann durch diese Werkzeugform in der Theorie vermieden werden. Der Nachteil dieser Schultergeometrie ist, dass sich während des Schweißprozesses kein oder nur minimal plastifiziertes Material unter der Schulter sammeln und damit den Schweißprozess stabilisieren kann. Um diesen Nachteil zu kompensieren, wurden in der in Abbildung 55 gezeigten mittleren Variante in die Werkzeugschulter drei konzentrische Riefen eingebracht (Zeichnung siehe Anhang A1). Das Modell zeigt, dass sich dadurch das Profil der Nahtoberseite derart ändert, dass sich theoretisch minimale Nahtüberhöhungen bilden, der Vorteil einer im Grunde ebenen Schulter im Vergleich zur konkav gestalteten jedoch erhalten bleibt.

Durch die vergrößerte Kontaktfläche, die ein Werkzeug mit ebener Schulterform (mit oder ohne Riefen) im Vergleich zu einem Werkzeug mit konkaver Schultergeometrie realisiert, sinken bei gleich vorgegebener Anpresskraft die in das Werkstück eingebrachten Druckspannungen. Dadurch ist zu erwarten, dass die sich einstellende Eintauchtiefe bei einer ebenen Schultergeometrie gegenüber einer konkaven Schultergeometrie reduziert. Die in Abbildung 55 gezeigte, rechte Variante zeigt den Abdruck, den ein Werkzeug mit ebener Schulterform und eingebrachten Riefen auf dem konvex gekrümmten Bauteil hinterlässt. Im Vergleich zum mittleren Teilbild beträgt die eingestellte Werkzeugeintauchtiefe nur 0,1 mm. Der darüber dargestellte Nahtquerschnitt zeigt, dass auch bei geringerer Eintauchtiefe keine ausgeprägte Nahtwölbung entsteht, wie dies bei konkav gestalteten Schultergeometrien (vgl. Abbildung 47) der Fall ist.

Eine Änderung der Schultergeometrie in Form einer Verringerung der Kavität führt damit zu einem Nahtquerschnitt, der im Vergleich zur konkav geformten Schulter eine zunehmend ebene Form besitzt. In Kombination mit einer bereits vorgeschlagenen Erhöhung des Werkzeuganstellwinkels kann eine weitere Reduzierung der Welligkeit der Naht erzielt werden. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 56 gezeigt. Mit zunehmendem Anstellwinkel α zur Flächennormalen sowie bei abnehmender Kavität der Werkzeugschulter ist eine Verringerung der Nahtwölbung zu erwarten. Die Randbedingungen in diesem Diagramm sind ein Werkzeugschulterdurchmesser von 13 mm sowie ein Oberflächenradius der Fügeiteile von 14,5 mm.

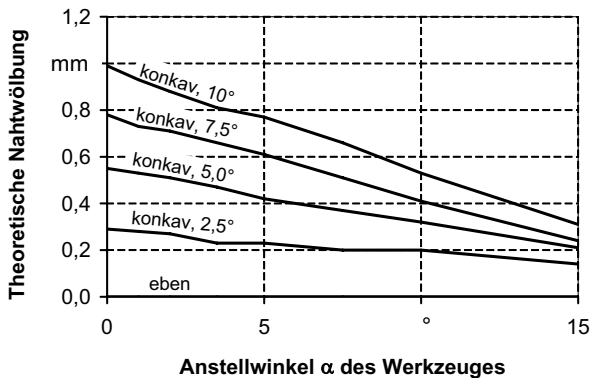


Abbildung 56: Nahtwölbung (Welligkeit) in Abhängigkeit des Werkzeuganstellwinkels bei unterschiedlichen Schultergeometrien; Werte aus dem CAD-Modell

Eine Optimierung der Werkzeugform für eine bestimmte Werkstückkrümmung soll im Rahmen dieser Arbeit nicht erfolgen. Ziel muss es im Hinblick auf industrielle Anwendungen sein, für die Ebene sowie gekrümmte Oberflächen identische Werkzeuge verwenden zu können, um theoretisch beliebige Nahtkonturen fügen zu können. Deshalb werden die Untersuchungen hauptsächlich mit den Werkzeugen durchgeführt, welche sich beim Schweißen in der Ebene bewährt haben und in den vorherigen Teilen der Arbeit verwendet worden sind.

6.5 Modellbildung und Simulation des Schweißvorganges

6.5.1 Zweck des Modells

Zum Verständnis der Auswirkungen einer Veränderung des Schweißprogrammes gegenüber der realen Kontur (vgl. Abschnitt 6.4.2) wurde ein mathematisches Modell erstellt, welches eine kraftgeregelte Werkzeugführung über die betrachtete Kontur beschreibt. Als Eingangsparameter können dabei der Radius der zu schweißenden Kontur sowie Radius und Lage des Schweißprogrammes variiert werden. Die Ausgangsgrößen des Modells sind durch den sich ergebenden Anstellwinkel des Werkzeuges auf der realen Kontur, dessen Bahngeschwindigkeit und die erforderliche Zustellung, die von der Kraftregelung bereitgestellt werden muss, gegeben. Da insbesondere Robotersysteme mit hohen Nachgiebigkeiten

behaftet sind, ergibt sich eine entsprechende Abdrängung des Werkzeuges infolge der Prozesskräfte, die durch eine vereinfachte, lineare Abhängigkeit berücksichtigt werden. Die folgenden Abschnitte zeigen die Betrachtung sowohl eines ideal steifen als auch eines steifigkeitsbehafteten Systems.

6.5.2 Aufbau des Modells

Das Modell wurde in MATLAB erstellt und beschreibt unter Zuhilfenahme der analytischen Geometrie die Führung eines Punktes auf einer programmierten Schweißbahn im zweidimensionalen Raum. Zu jedem diskreten Bahnpunkt wird die Orthogonale auf die Bahn berechnet und um den programmierten Werkzeuganstellwinkel gekippt. Die so entstandene Gerade entspricht der Werkzeugachse. Über den Schnittpunkt dieser Geraden mit der Bahn der Originalkontur lässt sich der Werkzeuganstellwinkel α_{real} für eine ideal steife Anlage berechnen. Findet eine Abdrängung des TCP aufgrund der Vorschubkraft statt, verschiebt sich dieser Schnittpunkt abhängig von der Steifigkeit des Systems entgegen der Schweißvorschubrichtung. Zusätzlich erlaubt das Modell unter Berücksichtigung gegebener Steifigkeitswerte axial zum Werkzeug auch die Ausgabe der theoretischen, notwendigen Korrekturbewegungen k_w in axialer Werkzeugrichtung, die von der programmierten Schweißbahn auf die originale Werkstückoberfläche bezogen realisiert werden müssen.

Anhand des aufgebauten Modells können die Effekte auf die erwähnten Zielgrößen einer der Werkstückkontur gegenüber veränderten Bahn berechnet werden. Um die Ergebnisse der Berechnungen geeignet zu visualisieren, wurde ein Laufparameter s eingeführt. Dieser bestimmt einen Punkt entlang der Werkstückoberfläche und beträgt an der Stelle des Überganges von der Einlaufgeraden in den Radius gleich Null (Abbildung 57). In den Diagrammen der folgenden Abschnitte ist also auf der Abszisse die reale Kontur in abgewickelter Form dargestellt. Des Weiteren gelte ein Außenradius der betrachteten Kontur von $r_a = 14,5$ mm sowie ein programmierter Anstellwinkel des Werkzeuges von $\alpha = 2^\circ$.

6.5.3 Ideal steifes System

6.5.3.1 Möglichkeiten der Veränderung der programmierten Schweißbahn

Zur Vereinfachung und zum besseren Verständnis wird die Werkzeug führende Maschine zunächst als ideal steif angenommen, wodurch Abdrängungen des TCP

durch die Strukturverformung unberücksichtigt bleiben können. Als Möglichkeiten der Bahnvariation werden eine Verzögerung der Umschwenkbewegung, eine Verschiebung der Schweißbahn und die Variation des Radius gegenüber dem des Werkstückes betrachtet.

6.5.3.2 Einführung einer Verzögerung

Eine Erhöhung des Werkzeuganstellwinkels kann, wie bereits in Abschnitt 6.4.2 angedeutet, sehr einfach durch eine Verzögerung der Umschwenkbewegung erreicht werden (Abbildung 57). Dadurch wird der TCP theoretisch auf der Einlaufstrecke über den Beginn des Radius hinausgeführt. Die Modellberechnungen wurden dabei mit unterschiedlichen Verzögerungswerten durchgeführt.

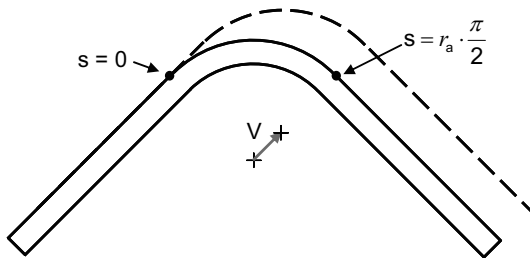


Abbildung 57: Verzögerung der Umschwenkbewegung durch den Wert V ; die gestrichelte Linie beschreibt die programmierte Schweißbahn.

Die Betrachtung des sich ergebenden realen Anstellwinkels (Abbildung 58) zeigt bei positiven Verzögerungen im Allgemeinen, dass dieser ab Beginn des Radius nahezu linear zunimmt. Die Änderung des Anstellwinkels $\Delta\alpha$ lässt sich für diesen Punkt durch folgenden Zusammenhang beschreiben:

$$\Delta\alpha (s = 0) \approx \frac{V}{r_a} \quad (\text{Gl. 6-10})$$

Sobald das Werkzeug nach der Verzögerung selbst mit der Umorientierung beginnt, fällt der Anstellwinkel auf der Kontur wieder streng monoton bis zum programmierten Anstellwinkel ab. Am Ende des Radius ist die Geschwindigkeit, mit der sich der Anstellwinkel ändert, am höchsten. Ist der Verzögerungswert kleiner Null, fällt bereits kurz vor Beginn der Radiuskontur der Werkzeuganstellwinkel gemäß obiger Formel auf der Fügeteiloberfläche ab, was zu

einem Zusammenbrechen des Schweißprozesses infolge eines in den Werkstoff eintauchenden Werkzeuges führen würde. Das Diagramm zeigt dabei, dass schon kleine Änderungen des Verzögerungswertes einen großen Einfluss auf den Werkzeuganstellwinkel nehmen. Für die Programmierung der Schweißbahn bedeutet dies, dass der Wert der Verzögerung wie auch die Schweißbahn selbst sehr genau programmiert sein müssen, um zu zufriedenstellenden Schweißergebnissen zu gelangen.

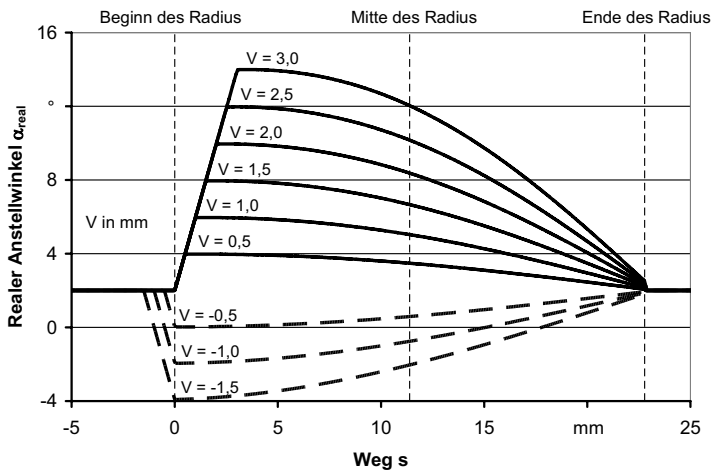


Abbildung 58: Resultierender realer Anstellwinkel des Werkzeuges bei verschiedenen Verzögerungen V der Schweißbahn

Die errechneten Korrekturen zeigen im Bereich des Radius monotone Verläufe, die jeweils bei Null starten und am Ende tangential in einen Endwert übergehen (Abbildung 59). Dieser Endwert liegt aufgrund des programmierten Anstellwinkels von 2° marginal höher als der Wert der Verzögerung. Die Steigungen der Kurven nehmen mit dem Wert der Verzögerungen zu. Für die Kraftregelung bedeutet dies, dass die maximal mögliche Korrekturgeschwindigkeit bei höheren Verzögerungen ausreichend ausgelegt hoch sein muss, um eine konstante Werkzeuganpresskraft auf der Fügeiteiloberfläche gewährleisten zu können.

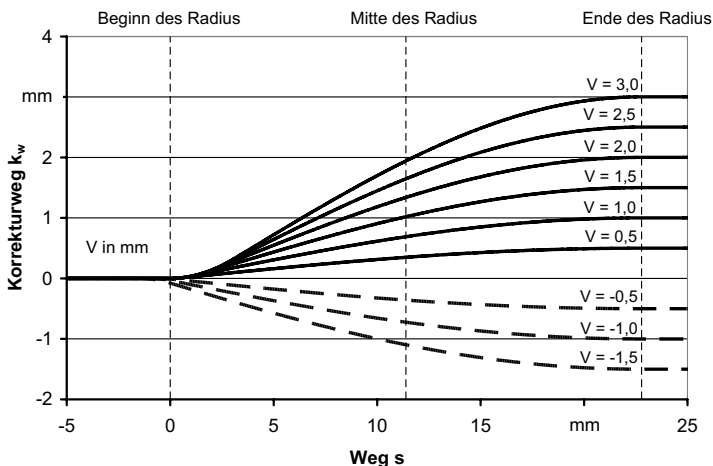


Abbildung 59: Zustellbewegungen der Kraftregelung bei verschiedenen Verzögerungen der Schweißbahn

Auch die realen Geschwindigkeiten des Werkzeuges ändern sich aufgrund der Verzögerung, da die Kraftregelung für eine zusätzliche Bewegung des TCP koaxial zur Werkzeugachse verantwortlich ist. Folgende Abbildung 60 zeigt die Geschwindigkeiten, bezogen auf eine normierte Geschwindigkeit des TCP auf der verzögerten Bahn. Bei einer gewählten positiven Verzögerung steigt diese bei Beginn des Radius zunächst leicht an. Dies ist damit zu erklären, dass sich der programmierte TCP immer noch auf der Einlaufstrecke befindet, während sich der reale TCP auf der wahren Kontur bereits auf dem Radius befindet, sich folglich von der programmierten Bahn entfernt und damit schneller wird. Sobald das Schweißprogramm den TCP umorientiert, fällt die Geschwindigkeit zunächst ab und nimmt im Verlauf des Radius einen sich immer schwächer ändernden Verlauf an, der jedoch stets streng monoton fallend ist. Am Ende des Radius beträgt die reale TCP-Geschwindigkeit unter den gegebenen Voraussetzungen nur noch einen Wert von etwa $(1 - 0,07V \cdot \text{mm}^{-1})$. Bei einem Verzögerungswert von 3,0 mm bedeutet dies, dass die TCP-Geschwindigkeit bis am Ende des Radius auf 79 % der programmierten abfällt. Diese Abnahme der Geschwindigkeit ist damit zu erklären, dass im Laufe der Radiusbewegung der TCP zunehmend um einen Punkt auf der Oberfläche der Originalkontur rotiert. Am Ende des Radius steigt die reale TCP-Geschwindigkeit schließlich wieder sprunghaft auf 100 % an.

Diese Berechnungen lassen darauf schließen, dass der Anstellwinkel α zu Beginn des Radius zwar wie gewünscht erhöht wird, die durch das Werkzeug eingebrachte Streckenenergie aber über einen weiten Teil des Radius ansteigt. Dadurch wird das Prozessfenster für das Schweißen über derart gekrümmte Oberflächen weiter geschmälert, sofern keine Gegenmaßnahmen durch z. B. eine weitere gezielte Veränderung der Prozessparameter ergriffen werden.

Eine theoretisch negative Verzögerung bzw. eine zu geringe Verzögerung der Roboterschweißbahn führt zu analogen Verläufen, jedoch steigt die Geschwindigkeit des TCP auf dieser Kontur an. Für die dadurch reduziert eingebrachte Streckenenergie mag dieser Fall interessant sein. Angesichts eines damit verbundenen, schleppenden Anstellwinkels ist diese Möglichkeit jedoch nicht relevant.

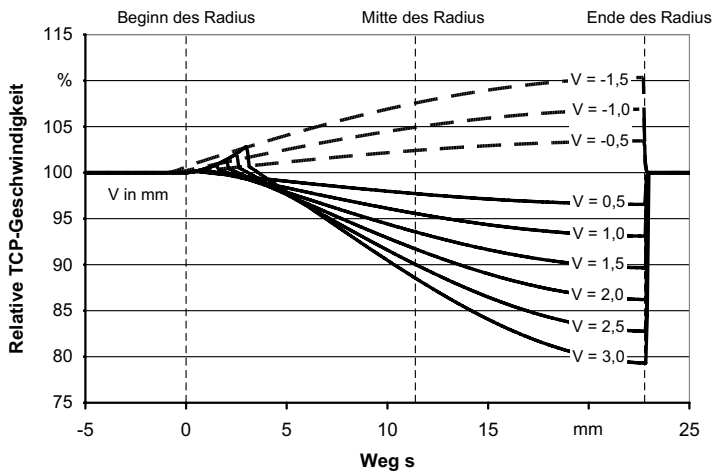


Abbildung 60: Relative Geschwindigkeit des TCP auf der Originalkontur bei verschiedenen Verzögerungen der Schweißbahn

Diese Berechnungen wurden auch mit den anderen zu untersuchenden Oberflächenradien von 54,5 mm und 104,5 mm durchgeführt. Sie zeigen die selben Charakteristika, jedoch nicht so stark ausgeprägt wie die oben dargestellten. Dadurch kann angenommen werden, dass für die größeren Radien der Schweißprozess stabiler abläuft und höhere Toleranzen für die gewählten Verzögerungen zulässt.

6.5.3.3 Zweidimensionale Verschiebung der Schweißbahn

Die Modellbetrachtungen in Abschnitt 6.5.3.2 zeigen, dass eine verzögerte Schweißbahn zu einer sprunghaften Erhöhung des Anstellwinkels führt. Dieser Effekt kann dazu genutzt werden, um eine ausreichende Verdichtung des Werkstoffes durch das Werkzeug zu gewährleisten. Bei der diskutierten Variation der Schweißbahn sinkt jedoch der Anstellwinkel im Verlauf des Radius wieder ab, bis das Werkzeug am Ende des Radius wieder seinen ursprünglich programmierten Anstellwinkel erreicht (Abbildung 58). Dadurch steigt vor allem in der zweiten Hälfte des Radius die Gefahr von Nahtfehlern durch einen mangelhaften Kontakt des Werkzeuges auf den Fügepartnern. Um diesen Nachteil möglicherweise ausgleichen zu können, wurde das Berechnungsmodell so verallgemeinert, dass eine beliebige Verschiebung der Schweißbahn in zwei Richtungen erlaubt ist. Hierzu wurde die Verzögerung V zum Verschiebungsvektor \vec{V} erweitert, welcher aus den Komponenten V_x und V_z besteht (entsprechend dem Koordinatensystem aus Abbildung 44). Die programmierte Schweißbahn ändert sich entsprechend dieser Veränderung. Eine Verschiebung um gleiche V_x - und V_z - Werte bedeutet folglich eine reine Verzögerung der Schweißbahn, wie sie in Abschnitt 6.5.3.2 bereits diskutiert wurde.

Untersucht wurden Verschiebungen der Schweißbahn um den Betrag von 2 mm auf einer Kontur mit dem Radius 14,5 mm. Die Richtung der Verschiebung wurde dabei um einen Drehwinkel φ variiert. Daraus ergeben sich unterschiedliche Anstellwinkel α_{real} über dem Verlauf der realen Kontur. Abbildung 61 zeigt diese zusammenfassend an drei charakteristischen Punkten der Kontur. Zu Beginn und zum Ende des Radiusbereiches treten in den Verläufen des Anstellwinkels teils starke Sprünge auf, wie dies am Beispiel des Radiusbeginns in Abbildung 58 gezeigt ist. Diese Werte wurden in unten stehender Abbildung jeweils als Resultierende zu Beginn und am Ende des Radiusbereiches herangezogen. Zusätzlich ist der reale Anstellwinkel am höchsten Punkt der Kontur (in etwa bei der Mitte) angetragen.

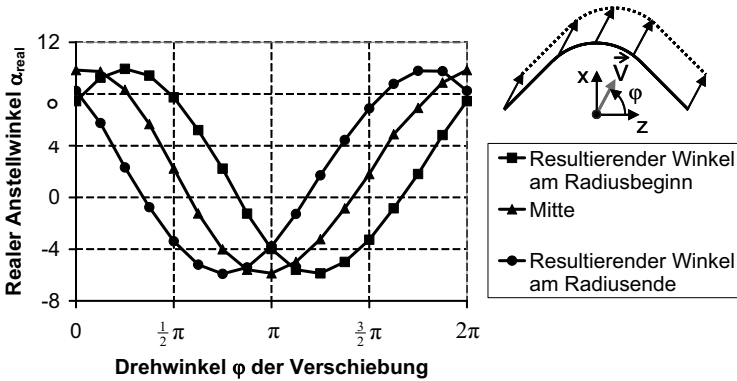


Abbildung 61: Sich einstellende Anstellwinkel des Werkzeuges an charakteristischen Punkten auf dem Radius ($r_a = 14,5 \text{ mm}$) in Abhängigkeit der Richtung, in der die Schweißbahn gegenüber der realen Kontur verschoben ist

Die Grafik zeigt, dass die Verläufe der Anstellwinkel an den drei charakteristischen Punkten einen sinusförmigen Verlauf annehmen, deren Mittelwerte dem programmierten Anstellwinkel von $\alpha = 2^\circ$ entsprechen und deren Amplituden in diesem Beispiel 8° betragen. Vom Beginn bis zum Ende des Radius sind diese Verläufe durch eine negative Phasenverschiebung von jeweils gegeneinander $\frac{1}{4}\pi$ gekennzeichnet.

Für den Bereich des Radius lässt sich damit die Formel 6-10 verallgemeinern. Eine Änderung des Anstellwinkels in einem betrachteten Punkt wird nur durch den zur Oberfläche tangentialen Anteil des Verschiebungsvektors bewirkt. Im Bereich des Radius lässt sich der Tangentenvektor $\vec{T}(s)$ zu einem Punkt $P(s)$ der Fügeteiloberfläche wie folgt berechnen (es gelte das Koordinatensystem aus Abbildung 61):

$$\vec{T}(s) = \begin{pmatrix} \cos\left(\frac{\pi - s}{4 r_a}\right) \\ \sin\left(\frac{\pi - s}{4 r_a}\right) \end{pmatrix} \quad \forall s \in \{0 \dots \frac{r_a \cdot \pi}{2}\} \quad (\text{Gl. 6-11})$$

Der Verschiebungsvektor in obigem Beispiel kann nach dessen Definition durch die Komponenten V_x und V_z beschrieben werden:

$$\vec{V} = \begin{pmatrix} V_x \\ V_z \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 6-12})$$

Der tangentielle Anteil des Verschiebungsvektors beträgt das Skalarprodukt beider Vektoren, da $\vec{T}(s)$ ein Vektor der Länge 1 ist:

$$V_{\text{tang}}(s) = \vec{V} \bullet \vec{T} \quad (\text{Gl. 6-13})$$

Damit ergibt sich für den sich einstellenden, realen Anstellwinkel im Punkt P(s):

$$\alpha_{\text{real}}(s) \approx \alpha + \frac{V_{\text{tang}}(s)}{r_a} = \alpha + \frac{V_x \cos\left(\frac{\pi - s}{4} - \frac{s}{r_a}\right) + V_z \sin\left(\frac{\pi - s}{4} - \frac{s}{r_a}\right)}{r_a} \quad (\text{Gl. 6-14})$$

Die hiermit angegebene Näherung vermittelt einen Eindruck über die Einflüsse der einzelnen Variablen auf den sich ausbildenden Anstellwinkel:

- Eine positive horizontale Verschiebung der Schweißbahn gegenüber dem Werkstück führt im für s definierten Bereich (siehe Gleichung 6-11) generell zu einer Erhöhung des programmierten Anstellwinkels. Eine negative Verschiebung hat den gegenteiligen Effekt zur Folge.
- Eine Verschiebung der Schweißbahn nach oben (positive z-Richtung) führt am Beginn des Radiusbereiches zu einer Erhöhung des Anstellwinkels. Das Argument des Sinus-Gliedes wird jedoch ab $s > r_a \cdot \pi/4$ negativ, so dass sich der Anstellwinkel entsprechend verringert. Eine Verschiebung der Bahn nach unten bewirkt wiederum das Gegenteil.
- Je größer der Radius r_a des Werkstückes ist, desto geringer fallen die Änderungen des Anstellwinkels infolge der Verschiebung \vec{V} aus.

Für das Schweißen von stark gekrümmten Oberflächen ist ein gleichmäßig hoher Anstellwinkel über die gesamte gekrümmte Oberfläche von Interesse. Diese Bedingung ist bei einer rein horizontalen Verschiebung (Drehung des Verschiebungsvektors um 0) annähernd erfüllt, da der Anstellwinkel sowohl zu Beginn als auch am Ende des Radiusbereiches erhöht ist. In Abbildung 62 ist der Verlauf des realen Anstellwinkels über dem Radiusbereich beispielhaft ($r_a = 14,5 \text{ mm}$; $\alpha = 2^\circ$), hier mit Hilfe der Simulation berechnet, dargestellt. Das Diagramm zeigt, dass ab Beginn des Radius der Anstellwinkel zunächst stark auf $7,4^\circ$ ansteigt und danach einen weiter steigenden, aber flachen Verlauf annimmt. Das Maximum von $9,9^\circ$ befindet sich 2,7 mm nachdem der höchste Punkt des

Radius überfahren wurde. Am Ende des Radiusbereiches beträgt der Anstellwinkel noch $8,2^\circ$, bevor er dann wieder stark auf den programmierten Wert von 2° abfällt.

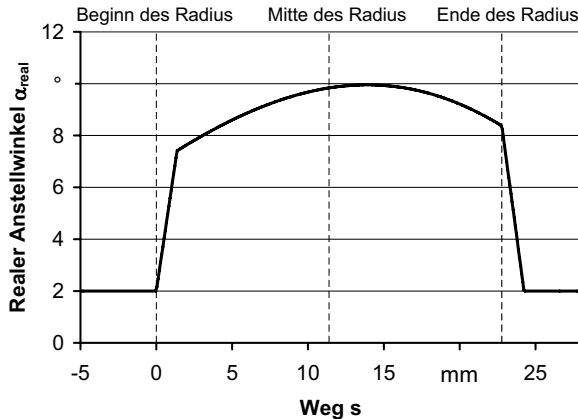


Abbildung 62: Realer Werkzeuganstellwinkel bei einer horizontalen Verschiebung der Schweißbahn um 2 mm gegenüber einer Kontur mit dem Außenradius $r_a = 14,5$ mm

Für das reale Schweißen der Versuchsgeometrien kann dies eine effiziente Möglichkeit bedeuten, den Anstellwinkel des Werkzeuges durch eine einfache Programmkorrektur gezielt zu verändern. Wie die theoretische Analyse des Werkzeugabdruckes auf der Fügeiteiloberfläche in Abbildung 50 zeigt, kann bei einem Außenradius der Kontur von $r_a = 14,5$ mm und dem verwendeten Werkzeug mit einem Schulterdurchmesser von $d_s = 13$ mm ein Anstellwinkel von $> 7,5^\circ$ bereits zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen. Die Geschwindigkeit des TCP ändert sich bei dieser Schweißstrategie in der Weise, dass diese zu Beginn des Radius um etwa 10 % ansteigt, dann bis zum Ende des Radius in einem linearen Verlauf auf etwa 90 % absinkt und dann schließlich wieder die programmierte Geschwindigkeit einnimmt, siehe Abbildung 64 ($R_{prog} = 14,5$ mm).

6.5.3.4 Veränderung des programmierten Radius

Neben der Verschiebung der Schweißbahn gegenüber der realen Kontur besteht auch die Möglichkeit, den programmierten Radius r_{prog} zu verändern. Eine Verkleinerung dieses Radius führt dazu, dass bei konstant programmierter TCP-

Geschwindigkeit die gekrümmte Fläche schneller überfahren wird als bei einem größeren Radius. Voraussetzung hierfür ist, dass die Schweißbahn in vertikaler Richtung so verschoben wird, dass die Mittelpunkte des Radius der realen Kontur r_a und der programmierten Bahn r_{prog} auf einer horizontalen Geraden liegen (Abbildung 63).

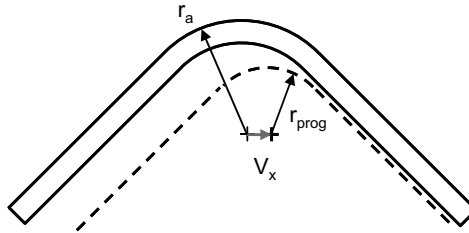


Abbildung 63: Veränderung des programmierten Radius gegenüber der realen Kontur in Kombination mit einer horizontalen Verschiebung der Schweißbahn

Die Änderung der Geschwindigkeit verhält sich dabei umgekehrt proportional zur Veränderung des Radius (Abbildung 64). Dieses Verhalten ist interessant im Hinblick auf die in die Werkstücke und in die Spannvorrichtung eingebrachte Wärme, die sich aufgrund der Bauteilgeometrie im Bereich des Radius stauen kann. Wie Gleichung 6-6 zeigt, kann die eingebrachte Streckenenergie durch eine Erhöhung der Geschwindigkeit reduziert werden. Eine Verkleinerung des programmierten Radius gegenüber der Originalkontur kann hierfür ein effizientes Mittel darstellen, wodurch ein weiterer Programmieraufwand zur Erhöhung der Geschwindigkeit erspart bliebe. Abbildung 64 zeigt die berechneten relativen TCP-Geschwindigkeiten über der realen Kontur bei unterschiedlich programmierten Radien r_{prog} . Die Randbedingungen hierbei sind ein Radius der Kontur von $r_a = 14,5$ mm sowie eine Verschiebung der Schweißbahn um 2 mm in horizontaler Richtung, wie sie in Abschnitt 6.5.3.3 vorgeschlagen und analysiert ist.

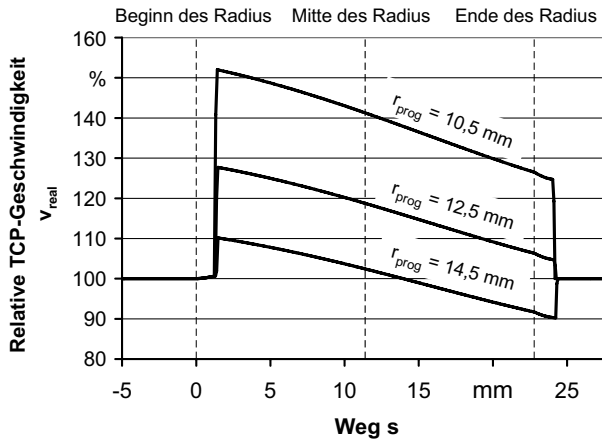


Abbildung 64: Erhöhung der relativen TCP-Geschwindigkeit bei unterschiedlich vorgegebenen Radien r_{prog}

Die Veränderung des programmierten Radius hat auf den berechneten tatsächlichen Anstellwinkel α_{real} hingegen keine nennenswerten Auswirkungen. Bei der oben dargestellten Verringerung des programmierten Radius von 14,5 mm auf 10,5 mm sinkt nach den Berechnungen durch das Modell der Anstellwinkel um konstant $0,56^\circ$ über dem gesamten Radius. Ähnlich dazu bewirkt die Verringerung des programmierten Radius bei den Zustellbewegungen lediglich ein konstantes Offset.

6.5.4 Nachgiebigkeitsbehaftetes System

6.5.4.1 Unterteilung

Der Übergang von einer ideal steifen Schweißanlage zu einem nachgiebigkeitsbehafteten System wie dem Roboter ist mit den Effekt verbunden, dass der TCP aufgrund der wirkenden Prozesskräfte aus der Sollbahn abgedrängt wird. Für die untersuchte Schweißaufgabe hat dies zwei Konsequenzen, die sich in die Einflüsse der zum Werkzeug koaxialen und der zur Schweißrichtung tangentialen Nachgiebigkeit des Systems unterteilen lassen.

6.5.4.2 Einfluss der axialen Nachgiebigkeit

Bei kraftgeregelten Schweißanlagen wird der TCP in axialer Richtung so korrigiert, dass sich die vorgegebene Prozesskraft einstellt. Das bedeutet, dass die Kraftregelung den TCP theoretisch unter die Fügeitoberfläche korrigiert, bis aufgrund der Verspannung des Roboters die vorgegebene Prozesskraft erreicht ist. Die theoretische Eintauchtiefe ist dabei über die Steifigkeit in Werkzeugaxialrichtung C_{ax} definiert. Tatsächlich jedoch befindet sich das Werkzeug stets in Kontakt mit dem Bauteil. Diese Gegebenheiten beeinflussen letztendlich die reale Geschwindigkeit des Werkzeuges beim Schweißen einer konvex geformten Oberfläche. Für die reale Bahngeschwindigkeit v_{real} auf einem Radius gilt dabei folgender linearer Zusammenhang, da ein Winkel auf einem programmierten Radius r_{prog} mit einer ebenso programmierten Vorschubgeschwindigkeit v_{prog} überstrichen wird:

$$v_{real} = v_{prog} \cdot \frac{r_d}{r_{prog}} \quad (\text{Gl. 6-17})$$

Aufgrund der Formeln ist eine Zunahme der Schweißgeschwindigkeit zu erwarten, wenn der programmierte Radius kleiner ist als der reale. Dieser Zusammenhang wurde auch schon in Abschnitt 6.5.3.4 anhand der Modellberechnungen gezeigt.

6.5.4.3 Einfluss der tangentialen Nachgiebigkeit

Anders als bei der axialen Prozesskraft F_w ist die Kraft entgegen der Schweißrichtung nicht durch die Kraftregelung vorgegeben, sondern sie stellt sich in Abhängigkeit der Schweißaufgabe, also des zu verschweißenden Materials, der Einschweißtiefe, des verwendeten Werkzeuges und der Schweißparameter, ein. Dadurch wird, vereinfacht, der TCP um einen Betrag Δs nach hinten gedrängt, der dem Quotienten aus Vorschubkraft F_x und der tangentialen Steifigkeit C_{tang} der Schweißanlage entspricht:

$$\Delta s = \frac{F_x}{C_{tang}} \quad (\text{Gl. 6-18})$$

Diese Zurückdrängung verursacht bei theoretisch exakter Bahnführung ein zu frühes Einschnen des Werkzeuges in den Radiusbereich, wodurch dessen Anstellwinkel nach Gleichung 6-10 verringert wird, wobei eine negative Verzögerung durch die Abdrängung des TCP entsteht. Dieser Zusammenhang ist aus Abbildung 58 ersichtlich. Sobald das Werkzeug aufgrund eines zu geringen

oder gar schleppenden Anstellwinkels in den Werkstoff eintaucht, besteht die Gefahr des Eingrabens des Werkzeuges und damit des Zusammenbruches des Schweißprozesses. Die Änderung des Anstellwinkels $\Delta\alpha$ lässt sich für kleine programmierte Werkzeuganstellwinkel berechnen durch:

$$\Delta\alpha \approx -\frac{\Delta s}{r_a} = -\frac{F_x}{C_{tang} \cdot r_a} \quad (\text{Gl. 6-19})$$

Aus dieser Formel geht zum einen hervor, dass sich die Änderung des Anstellwinkels umgekehrt proportional zur Abdrängung des TCP durch die Prozesskraftkomponente F_x verhält. Weiter drückt sie aus, dass die Toleranz des Schweißprozesses mit größeren Radien und einer steiferen Schweißanlage zunehmen muss, da die Änderung des Anstellwinkels dann geringer ausfällt.

6.5.4.4 Änderung der Schweißbahn

Zur Kompensation der Abdrängung kann wiederum eine Verschiebung der Schweißbahn herangezogen werden, wie dies bereits in Abschnitt 6.5.3 vorgeschlagen wurde. Die Formel 6-14 lässt sich mit der Formel 6-19 zur Berechnung des realen Anstellwinkels erweitern, so dass nun die Abdrängung des TCP und eine Verschiebung der Schweißbahn berücksichtigt ist:

$$\alpha_{real}(s) \approx \alpha + \frac{V_{tang}(s) - \Delta s}{r_a} = \alpha + \frac{V_x \cos\left(\frac{\pi}{4} - \frac{s}{r_a}\right) + V_z \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{s}{r_a}\right) - \frac{F_x}{C_{tang}}}{r_a} \quad (\text{Gl. 6-20})$$

Die Aussagen aus Gleichung 6-14 können dahingehend erweitert werden, dass die Abdrängung des TCP durch eine horizontale Verschiebung V_x über dem Radiusbereich kompensiert werden kann.

Ziel muss es sein, dass der reale Anstellwinkel auch für nachgiebigkeitsbehaftete Systeme im gesamten Radiusbereich um einen konstanten Wert erhöht ist. Da die Verschiebung der Schweißbahn Freiheitsgrade in zwei Richtungskomponenten zulässt, können mit Hilfe obiger Näherung die Anstellwinkel an zwei Positionen eingestellt werden. Wird die Verschiebung wiederum durch die zwei Komponenten V_x in horizontaler und V_z in vertikaler Richtung vorgegeben, so ergeben sich die sich einstellenden Winkel nach Formel 6-20 am Anfang und am Ende des Radius zu:

$$\alpha_{real}(s=0) \approx \alpha + \frac{\frac{V_x + V_z}{\sqrt{2}} - \frac{F_x}{C_{tang}}}{r_a} \quad (\text{Gl. 6-21})$$

$$\alpha_{real}(s=r_a \cdot \frac{\pi}{2}) \approx \alpha + \frac{\frac{V_x - V_z}{\sqrt{2}} - \frac{F_x}{C_{tang}}}{r_a} \quad (\text{Gl. 6-22})$$

Wird nun für beide Positionen ein sich einstellender Anstellwinkel durch $\alpha_{soll} = \alpha_{real}$ vorgegeben, können obige Formeln nach V_x und V_z aufgelöst werden:

$$V_x = \sqrt{2} \cdot \left(\frac{F_x}{C_{tang}} + r_a \cdot (\alpha_{soll} - \alpha) \right) \quad (\text{Gl. 6-23})$$

$$V_z = 0 \quad (\text{Gl. 6-24})$$

Nach diesen Formeln kann der Einfluss der Werkzeugabdrängung alleine durch eine Erhöhung der Verschiebung der Schweißbahn in horizontaler Richtung kompensiert werden, während dafür eine vertikale Verschiebung der Schweißbahn nicht nötig ist.

Analog zu den Simulationen für eine ideal steife Schweißanlage kann auch bei einer nachgiebigen Anlage die Geschwindigkeit des TCP durch eine Verkleinerung des programmierten Radius ohne wesentliche Beeinflussung des Anstellwinkels erhöht werden. Voraussetzung ist allerdings, dass die Mittelpunkte des programmierten Radius und der realen Kontur auf dem selben vertikalen Niveau bleiben.

Damit kann für einen gegebenen Radius und eine gegebene Steifigkeit des Systems eine Veränderung der Schweißbahn vorgegeben werden, durch die der Anstellwinkel so angehoben wird, wie es für einen gegebenen Schulterradius erforderlich ist. Diese theoretischen Erkenntnisse werden in den Abschnitten 6.6 und 6.7 experimentell validiert. Voraussetzung für eine Umsetzung der Berechnungen sind neben der Richtigkeit des Modells eine ausreichend schnelle Kraftregelung sowie Prozessbedingungen, die möglichst gleichbleibend über die gesamte Schweißbahn sind.

6.6 Versuchsbedingungen

Die theoretisch gewonnenen Erkenntnisse wurden experimentell überprüft. Hierzu wurde eine Spannvorrichtung konstruiert, die es erlaubt, auf einen Grundkörper

unterschiedliche Radien zu fixieren. Die abzufahrende Schweißbahn besteht dabei zunächst aus einem geraden, ebenen Teilstück, um zu Beginn mit üblichen Schweißparametern einen stabilen Schweißprozess erzeugen zu können. Zugleich dient diese Einlaufstrecke als Referenz für die Schweißnaht über die darauf folgende gekrümmte Oberfläche. Diese besteht aus einem konstanten Radius, in den die Schweißbahn aus der Ebene tangential übergeht. Die modular aufgebaute Spannvorrichtung besitzt hierbei drei Radien: 100, 50 und 10 mm. Nach einem Winkel von 90° über dem eingestellten Radius mündet die Schweißbahn schließlich wieder in einen ebenen Teil zurück. Folgende Abbildung 65 zeigt den Versuchsaufbau.

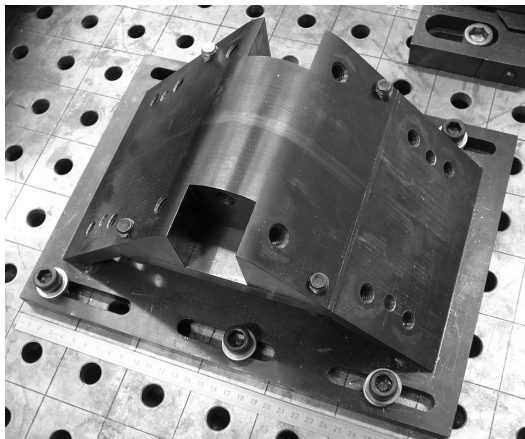


Abbildung 65: Spannvorrichtung zur Untersuchung des Rührreißschweißens an gekrümmten Oberflächen; das Bild zeigt den Aufbau mit einem Radius der Vorrichtung von 50 mm.

Die Spannvorrichtung wurde zur Durchführung der Versuche so vor dem Roboter platziert, dass die Schweißbahn tangential zur Achse A1 des Roboters verläuft. Strukturverformungen des Roboters aufgrund der Prozesskraftkomponente F_w resultieren damit in einem seitlichen Ausweichen des Werkzeuges aus der Sollbahn.

Um die Spannvorrichtung zu schützen, wurde wie auch bei den Versuchen in Kapitel 5 ein voroxidiertes Stahlblech mit einer Dicke von 1,5 mm zwischen die Spannvorrichtung und die zu verschweißenden Versuchsbleche gelegt. Für die Versuchsbleche selbst wurde eine Stärke von 3 mm gewählt, was in der Praxis eine

gebräuchliche Dicke darstellt. Damit ergeben sich bei diesem Versuchsaufbau drei unterschiedlich mögliche Oberflächenradien r_a von 14,5 mm, 54,5 mm und 104,5 mm, über die das FSW-Werkzeug geführt werden muss. Dies entspricht den Radien, die in den vorherigen Abschnitten theoretisch untersucht wurden.

Die gewählten Legierungen beschränken sich auf zwei Werkstoffe, die beispielsweise im Automobilbau Anwendung finden. Einer der Werkstoffe ist AW-5083-H111, für den schon im Rahmen von Kapitel 5 nachgewiesen wurde, dass der Roboter imstande ist, hohe Nahtqualitäten bis zu einer Stärke von wenigstens 6 mm zu erzeugen. Der zweite Werkstoff trägt die Normbezeichnung AW-6082 und wurde im Wärmebehandlungszustand T6 für die Versuche verwendet. Die chemischen Zusammensetzungen der Legierungen sind im Anhang A2 zu finden.

Die Bleche wurden per Hand mit Hilfe einer speziellen Vorrichtung bzw. einer Handbiegemaschine gebogen und weisen daher teilweise nach dem Biegevorgang Ungenauigkeiten auf, die eine Streuung der Ergebnisse nach sich ziehen können. Diese Ungenauigkeiten in Form von Abweichungen des Biegeradius und des Biegewinkels vom jeweiligen Ideal sollen jedoch mit Hilfe der Spannvorrichtung so weit wie möglich reduziert bzw. beseitigt werden.

Die verwendeten Werkzeuge entsprechen denen, mit denen bereits die Versuche aus Kapitel 5 durchgeführt wurden (konkave Schulterinnenfläche mit einem Durchmesser von 13 mm). Um darüber hinaus Aussagen zum Einfluss der Schultergeometrie auf die Nahtoberfläche treffen zu können, wurde ein zusätzliches Werkzeug angefertigt. Dieses besitzt ebenfalls einen Schulterdurchmesser von 13 mm und einen Werkzeugspindurchmesser von 5 mm, jedoch eine ebene Schulter mit drei Einstichen. Die technische Zeichnung dieses Werkzeuges kann dem Anhang A1 entnommen werden.

Neben üblichen Auswertmethoden wurden im Rahmen dieser Versuche auch Zugproben entnommen, um die mechanischen Eigenschaften der geschweißten Verbindungen im Radiusbereich messen zu können. Hierfür wurden für jede der drei Konturen spezielle Aufnahmebacken konstruiert, damit die entnommenen Zugproben im gebogenen Zustand flächig in die Prüfmaschine eingesetzt werden können. Die Backen wurden dabei so ausgelegt, dass die Hauptspannungsrichtung während des Zugversuches durch den Flächenschwerpunkt der Prüflinge im Prüfbereich verläuft. Dadurch wird ein Biegemoment auf die Zugprobe während der Prüfung vermieden und ein einachsiger Spannungszustand hergestellt.

6.7 Versuchsdurchführung

6.7.1 Vorgehen

Das Vorgehen im Rahmen der Experimente besteht zunächst aus der Suche von geeigneten Parametersätzen, mit denen fehlerfreie Schweißnähte erzeugt werden können. Vor Beginn der Versuche mit den gebogenen Blechen wurden deshalb die grundlegenden Parameter beim Schweißen in der Ebene gesucht und dabei die wirkenden Prozesskräfte aufgezeichnet. Der Ermittlung optimaler Parameter folgen Variationen in der Schweißstrategie, um die damit verbundenen Effekte auf die Schweißnaht erfassen zu können. Das Vorgehen während der Experimente entspricht dabei dem aus den theoretischen Versuchen (Verschiebung der programmierten Schweißbahn entlang der Einlaufstrecke, Verschiebung in horizontaler Richtung, Variation des programmierten Radius, Variation der Werkzeugschultergeometrie).

Der Fokus der Versuche liegt auf der Kombination des engsten Radius ($r_a = 14,5 \text{ mm}$) mit dem FSW-Werkzeug, welches einen Schulterdurchmesser von 13 mm bei einer glatten, konkaven Schulterkontur aufweist. Aufgrund dieser Kombination ist zu erwarten, dass die oben beschriebenen Effekte zur Ausbildung des Schweißnaht und deren Abhilfestrategien am deutlichsten hervortreten. Im Hinblick auf die zu verschweißenden Werkstoffe wurden die Versuche vor allem anhand des AW-5083-Materials durchgeführt. Schweißversuche mit dem AW-6082-Material dienen der Ergänzung sowie der Validierung der Ergebnisse. Die meisten Schweißversuche wurden zudem als Blindnähte realisiert. Dies vereinfacht die Spanntechnik, die gewonnenen Ergebnisse streuen dadurch weniger, und nicht zuletzt reichen diese Nähte zur visuellen Charakterisierung des Schweißergebnisses sowie des Anlagenverhaltens aus. Stumpfstoßschweißungen wurden dann realisiert, wenn von den geschweißten Verbindungen Zugproben entnommen und geprüft wurden.

6.7.2 Erfassung der realen Roboterbahn

In Abschnitt 6.3 wurde erläutert, dass aufgrund der Überschleifbewegungen zwischen den einzelnen Fahrbefehlen die exakte Bahn sowie die Orientierung des TCP nicht eingehalten werden können. Um einen geeigneten Kompromiss zwischen Genauigkeit der Bewegung und Konstanz der Bahngeschwindigkeit zu finden, wurde deshalb die Kontur auch „trocken“, also ohne Schweißprozess und

Kraftregelung mit dem Roboter abgefahren und die Bewegungen der Roboterachsen dabei intern aufgezeichnet. Im Rahmen der Schweißversuche stellte sich eine Überschleifdistanz von 4 mm als optimal heraus. Folgende Abbildung 66 verdeutlicht die Ungenauigkeit des Roboters anhand des realen Anstellwinkels, der aus den gemessenen Achswerten bei Probefahrten ohne Prozesskraft ermittelt wurde. Der abgefahrte Radius beträgt in diesem Beispiel 14,5 mm. Dabei zeigt sich, dass das Werkzeug bereits vor Beginn des Radius im Bereich der vorgegebenen Überschleifdistanz mit der Umoorientierung beginnt und diese erst nach Ende des Radiusbereiches abgeschlossen ist. Dadurch ergeben sich Änderungen des Anstellwinkels um bis zu ca. 5° , die bereits signifikante Veränderungen des Schweißprozesses zur Folge haben können. Jedoch ist zu erwähnen, dass durch die roboterinterne Schwerkraftkompensation und durch Ungenauigkeiten bei der Berechnung dieser Anstellwinkel die aufgezeichneten Daten nicht exakt in die realen kartesischen Koordinaten des Werkstückes umgerechnet werden können. Es ist daher anzunehmen, dass der Anstellwinkel über dem Radius größtenteils korrekt ist. Die Veränderungen des Anstellwinkels zu Beginn und am Ende des Radiusbereiches sind jedoch aufgrund der erlaubten Überschleifdistanz definitiv vorhanden.

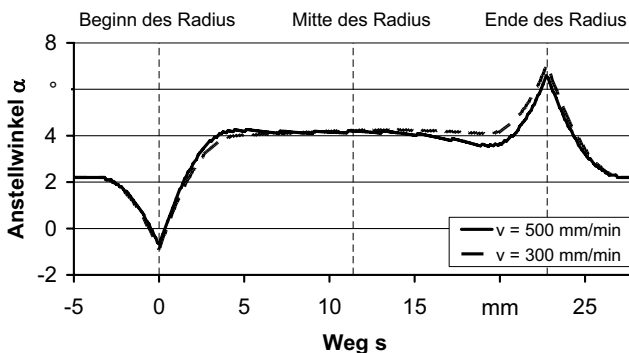


Abbildung 66: Bestimmung des Werkzeuganstellwinkels gegen die reale Kontur bei Probefahrten ohne Prozesskraft über den Versuchsradius $r_a = 14,5 \text{ mm}$

Bei einer theoretisch exakten Schweißbahn müsste sich die Umoorientierungsgeschwindigkeit des Werkzeuges ab Beginn des Radiusbereiches unstetig von Null auf einen konstanten Wert verändern. Auch hier kann gemessen werden, dass sich

die Umorientierungsgeschwindigkeit bereits 3,5 mm vor dem Beginn des Radiusabschnittes in Form einer Rampe auf einen Endwert erhöht, welcher der theoretisch exakten Umorientierungsgeschwindigkeit entspricht. Im Fall einer Prozessgeschwindigkeit von 500 mm/min bricht die vorgegebene Geschwindigkeit des TCP am Beginn und am Ende des Radius um etwa 5 % ein. Wird die Kontur mit niedriger Geschwindigkeit abgefahren, kann keine nennenswerte Änderung der TCP-Geschwindigkeit gemessen werden. Die abgefahrte Bahn selbst gleicht ebenfalls nicht der theoretischen, befindet sich jedoch im Bereich der für den Robotertyp angegebenen Absolutgenauigkeit.

Die Versuche wurden auch an den Außenradien 54,5 mm und 104,5 mm durchgeführt. Hier zeigt sich ein wesentlich genaueres Bewegungsverhalten des Roboters, da die Umorientierung unkritischer und langsamer verläuft. Die Änderungen des Anstellwinkels und der TCP-Geschwindigkeiten liegen hier in einem unkritischen Bereich.

6.7.3 Einstellung der grundlegenden Prozessparameter

Anhand einfacher linearer Nähte wurde zuerst für jede der Legierungen bei korrekt eingestellter Pinlänge (volle Durchschweißung) ein Parametersatz ermittelt, der eine visuell zufriedenstellende Schweißnaht erzeugt. Folgende Tabelle 4 zeigt einen Überblick über die wichtigsten Prozessparameter.

Tabelle 4: Prozessparameter zum Verschweißen der untersuchten Legierungen

	Anpresskraft F_w	Werkzeug- drehzahl n	Schweiß- geschwindigkeit v
AW-5083-H111	6,0 kN	1.400 min ⁻¹	300 mm/min
AW-6082-T6	4,7 kN	1.600 min ⁻¹	500 mm/min

Unter Anwendung oben stehender Prozessparameter wurden mit dem in Abschnitt 5.2.1 beschriebenen Dynamometer die Prozesskräfte in den drei Raumrichtungen gemessen. Für die untersuchten Materialien ergeben sich die Kraftkomponenten nach folgender Tabelle:




Tabelle 5: Mittlere Prozesskräfte beim Schweißen des Blechmaterials

	F_x	F_y	F_z
AW-5083-H111; Pinlänge: 1,54 mm	798 N	-110 N	5.729 N
AW-5083-H111; Pinlänge: 2,85 mm	976 N	14 N	5.695 N
AW-6082-T6; Pinlänge: 2,88 mm	670 N	155 N	4.296 N

Das Hauptaugenmerk dieser Messungen liegt auf der Prozesskraftkomponente in Vorschubrichtung. Zu erwähnen ist dabei, dass diese am Beispiel der AW-5083-Legierung zwar mit der Pinlänge zunimmt, sich jedoch nicht direkt proportional dazu verhält.

In unmittelbarer Nähe der Spannvorrichtung wurden mit dem Dynamometer auch die Steifigkeiten des Roboters gemessen. Da sich die Robotersteifigkeit in Abhängigkeit der Position und Orientierung des TCP stark ändern kann, wurden die Steifigkeiten sowohl axial zum Werkzeug als auch tangential zu den drei Schweißrichtungen gemessen, die der Roboter in der Einlaufstrecke, in der Mitte des Radius und in der Auslaufstrecke besitzt. Tabelle 6 zeigt zusammenfassend die Messergebnisse:

Tabelle 6: Steifigkeiten des Roboters in unterschiedlichen Orientierungen

	Einlaufstrecke 	Mitte Radius 	Auslaufstrecke 
C_{ax}	1.332 N/mm	1.683 N/mm	1.378 N/mm
C_{tang}	554 N/mm	639 N/mm	633 N/mm

Um eine Referenz der Nahtgüten der geschweißten Radien zu erhalten, wurden die beiden Werkstoffe zunächst in der Ebene in Stumpfstoßkonfiguration geschweißt und gemäß DIN EN 895 geprüft. Folgende Tabelle fasst die gemessenen Zugfestigkeiten zusammen:

Tabelle 7: Mittlere Zugfestigkeiten geschweißter ebener Bleche im Vergleich zum Grundwerkstoff; je Wert mindestens zwei Proben

	GW	geschweißt	Schweißfaktor
AW-5083-H111	300 MPa	301 MPa	100 %
AW-6082-T6	324 MPa	245 MPa	76 %

6.7.4 Referenzversuche ohne Anpassungen

Um eine Referenz für die Versuche mit modifizierter Schweißbahn zu erhalten, wurden die drei unterschiedlichen Blechkonturen zunächst ohne Änderung der Prozessparameter und ohne Verzögerung der Umschwenkbewegung auf der theoretisch exakten Bahnführung geschweißt. Bei der gemessenen Steifigkeit und den wirkenden Prozesskräften beträgt die Abdrängung des TCP in der Einlaufstrecke entgegen der Schweißrichtung etwa 1,76 mm, was zu einer rechnerischen Verringerung des Anstellwinkels gemäß Formel 6-19 um $0,96^\circ$ ($r_a = 104,5$ mm), $1,85^\circ$ ($r_a = 54,5$ mm) und $6,95^\circ$ ($r_a = 14,5$ mm) führt. Die Schweißversuche zeigen wie erwartet, dass das Werkzeug vorzeitig in den Radius umorientiert wird, was auf diese Abdrängung zurückzuführen ist. In Konsequenz daraus taucht das Werkzeug mit der Schultervorderkante in das Werkstück ein, wodurch der Schweißprozess zusammenbricht. Dieses Verhalten ist umso deutlicher, je kleiner der Radius der zu schweißenden Kontur ist. Die Folge des Prozesszusammenbruches ist bei allen drei Versuchskonturen eine Kollision des Werkzeuges mit der Spannvorrichtung (Abbildung 67 unten) sowie bei den Konturen mit den Außenradien r_a von 54,5 mm und 14,5 mm je ein offener Nahtfehler auf der Nahtoberseite, der jedoch bei der Kontur mit $r_a = 54,5$ mm nur auf wenigen Millimetern sichtbar ist. Die zu hohe Eintauchtiefe des Werkzeuges ist bei allen drei Konturen von einem Durchdrücken der Naht nach unten und teils extremen seitlichen Materialauswürfen auf der Nahtoberseite begleitet. Folgende Abbildungen zeigen die Ober- und Wurzelseiten so geschweißter Versuchsbleche, wobei die Länge des Schweißpins beim Schweißen mit 2,88 mm für eine vollständige Durchschweißung des Materials im ebenen Zustand ausreicht.

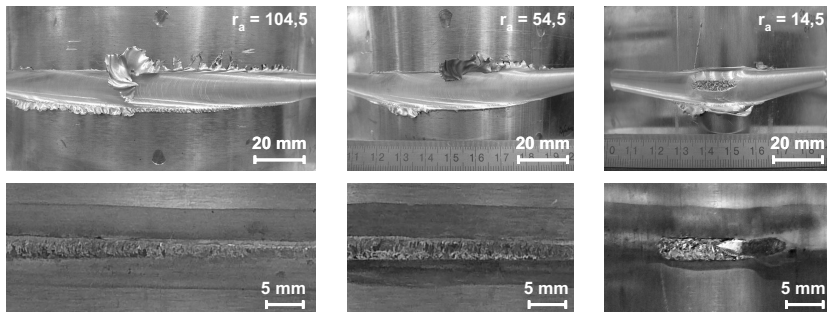


Abbildung 67: Nahtober- und Wurzelseiten (Radiusbereich) bei theoretisch exakter Bahnführung des Werkzeuges durch den Roboter; geschweißt wurde jeweils von links nach rechts; geschweißter Werkstoff: AW-5083

Des Weiteren ist insbesondere beim kleinsten der drei Versuchsradien zu beobachten, dass sich der Anstellwinkel bereits vor dem Einschnen von der Einlaufstrecke in den Radius verringert. Als Ursache hierfür wird neben der nicht genau geführten Roboterbahn (vgl. Abschnitt 6.7.2) auch die Spanntechnik vermutet, die das Versuchsblech nicht exakt auf der Spannvorrichtung fixieren kann. Eine Verbesserung der Ergebnisse kann durch eine möglichst flächige Spannung der Bleche im Radiusbereich erzielt werden. Die Versuche zeigen, dass die Wichtigkeit einer optimalen Spanntechnik mit kleiner werdendem Radius zunimmt.

6.7.5 Variation der Schweißstrategie

6.7.5.1 Einfluss der Verzögerung

Ausgehend von den in Abschnitt 6.7.4 beschriebenen Referenzversuchen wurde als erste Maßnahme die Umschwenkbewegung verzögert. Ziel der Verzögerung ist das Verhindern einer zu frühen Umlagerung des Werkzeuges auf einen realen Anstellwinkel von unter 2° im ebenen Einlaufbereich und darüber hinaus eine Erhöhung des realen Anstellwinkels im Bereich des Radius, wie es in Abschnitt 6.5.3.2 beschrieben ist.

Mit den in Tabelle 4 gegebenen Prozessparametern wird beim Werkstoff AW-5083 für eine volle Einschweißtiefe über dem Bauteilradius von $r_a = 14,5$ mm experimentell eine Verzögerung von mindestens 5,5 mm benötigt. Mit diesem Wert

können bereits ohne weitere Veränderungen der Schweißbahn nahezu fehlerfreie Verbindungen über die gesamte Schweißnaht erzielt werden. Dennoch zeigt sich, dass aufgrund der ansonsten konstanten Prozessparameter das Werkzeug im Bereich des Radius einsinkt, wodurch die Gefahr einer Kollision des Werkzeuges mit der Spannvorrichtung zunimmt. Auf der Retreating Side entsteht zudem kurz vor dem Beginn des Radiusbereiches stets ein Grat, der reproduzierbar ist und mit den gegebenen Spannvorrichtungen nicht vermieden werden kann. Mit steigendem Werkstückradius reichen bereits geringere Verzögerungswerte aus, um optisch fehlerfreie Schweißnähte über dem gesamten Radius zu erzeugen. Die Bleche in Abbildung 68 zeigen die Schweißergebnisse auf den untersuchten Radien mit den jeweils optimalen Verzögerungswerten. Um ein zu starkes Einsinken des Werkzeuges aufgrund der höheren lokalen Wärmeeinbringung im Radiusbereich zu vermeiden, wurde dort die vorgegebene Prozesskraft $F_{w,R}$ um bis zu 10 % verringert. Da die Legierung AW-6082 zum Rührreibschweißen eine geringere Werkzeuganpresskraft erfordert und sich bei ihr auch geringere Vorschubkräfte einstellen (Tabelle 5), reichen bei diesem Werkstoff bereits geringere Verzögerungswerte aus, um eine optisch fehlerfreie Schweißnaht zu erzeugen. Für die Kontur mit dem kleinsten Radius beträgt diese beispielsweise 4 mm. Dieses Material neigt zudem weniger zur oben erwähnten Gratbildung auf der Retreating Side kurz vor dem Radiusbeginn.

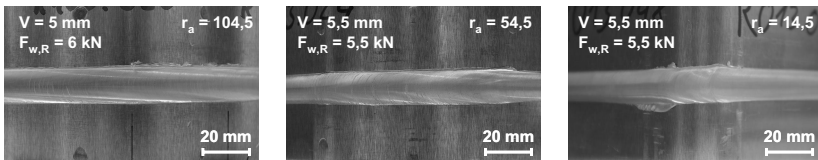


Abbildung 68: Mit Verzögerung geschweißte Bleche der Legierung AW-5083 in unterschiedlichen Radien

Bei den gewählten Einstellungen und Verzögerungswerten sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Versuchsbedingungen zwar stets identisch waren, der Roboter jedoch herstellenseitig mit einer Wiederholgenauigkeit von 0,15 mm (KUKA 2002, S. 9) spezifiziert ist. Die hohen Belastungen aufgrund der Prozesskräfte führen zu einer weiteren Streuung der Genauigkeit. Dennoch sind die Schweißergebnisse bei gleicher Positionierung der Versuchsbleche vor dem Roboter robust reproduzierbar.

Für den kleinsten Versuchsradius wurde während des Schweißens von AW-5083 der Anstellwinkel mit Hilfe einer Kamerabeobachtung aufgezeichnet. Obwohl eine Messmethode dieser Art ungenau sein kann, zeigt sich, dass der Anstellwinkel zu Beginn des Einschwenkens in den Radius stark ansteigt und, wie in Abschnitt 6.5.3.2 simuliert, im Verlauf der Schweißnaht wieder auf den programmierten Anstellwinkel abfällt. Dabei kann sogar beobachtet werden, dass der Anstellwinkel gegen Ende des Radiusbereiches kleiner als 2° wird. Zum selben Ergebnis gelangen auch die Berechnungen, bei denen die Abdrängung des TCP mit berücksichtigt wird. Abbildung 69 zeigt die Verläufe der rechnerischen Anstellwinkel und die entsprechend gemessenen Punkte. Es ist zu erkennen, dass die Anstellwinkel aus den realen Messungen deutlich größer sind als in der Simulation und eher dem theoretischen Verlauf unter Vernachlässigung der Abdrängung folgen. Daher kann vermutet werden, dass das Simulationsmodell nicht exakt den realen Bedingungen entspricht oder die Abdrängung des TCP geringer ist als dies aus den Berechnungen mit Hilfe der Steifigkeiten und Prozesskräfte hervorgeht. Der qualitative Verlauf des Anstellwinkels über dem Radius entspricht jedoch sehr gut dem der Berechnungen.

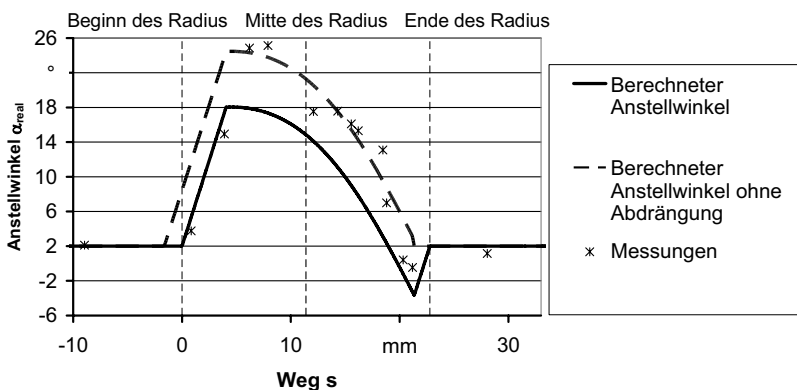


Abbildung 69: Berechnete Anstellwinkel des Werkzeuges bei einer Verzögerung der Einschwenkbewegung von 5,5 mm; angenommene Abdrängung aus $C_{tang} = 600 \text{ N/mm}$ und $F_x = 976 \text{ N}$; Messungen aus dem realen Versuch; Versuchsmaterial: AW-5083

Während Schweißversuche ohne eine Korrektur der Schweißbahn im Radiusbereich teils offene Nahtfehler zeigen, können durch die Einführung der Verzögerungen

geschlossene Nähte erzeugt werden (Abbildung 70). Im Inneren der Schweißnaht können teilweise unterhalb der Nahtoberfläche Decklagenfehler in Form von *surface galling* beobachtet werden. Die Entstehung dieses Merkmals ist mit einer hohen Werkzeugdrehzahl und gleichzeitig vergleichsweise niedriger Anpresskraft während des Schweißens verbunden. Die Prozesskraft muss jedoch bei starken Werkstückkrümmungen im Radiusbereich zurückgenommen werden, um ein zu tiefes Einsinken des Werkzeuges zu verhindern. Aufgrund der Limitierung des Schweißkopfantriebes konnten keine niedrigeren Werkzeugdrehzahlen realisiert werden, um die Prozesswärme dadurch zu reduzieren. Als zweites Merkmal drückt das Werkzeug den Werkstoff häufig über die gesamte Breite der Naht nach unten durch, wodurch eine Wurzelüberhöhung von wenigen Zehntelmillimetern entsteht. Dieses Phänomen ist auf eine zu schwache Spanntechnik zurückzuführen, die den Werkstoff nicht hinreichend fixieren kann (IMWF STUTTGART & FT ILMENAU 2007, S. 48ff). Die Querschliffe zeigen zum Teil auch Nahtwurzelfehler in Form eines *lack of fusion*. Dieser kommt durch die seitliche Abdrängung des Werkzeuges zustande, die sich während der Umorientierungsbewegung ergibt und durch die sich ändernden Steifigkeitsverhältnisse verursacht ist. Die korrekte Positionierung des Werkzeuges ist insbesondere beim Schweißen über den kleinsten Radius sehr schwierig. Auffälligstes Merkmal ist beim kleinsten Radius (Abbildung 70, rechtes Teilbild), dass das Werkzeug im Radiusbereich eine gewölbte Nahtform erzeugt, die zudem auf der Advancing und der Retreating Side den Verbindungsquerschnitt verringert. Diese Wölbung resultiert aus der konkaven Form des Werkzeuges, wie es in Abschnitt 6.2.2 beschrieben ist. Tendenziell ist zu beobachten, dass die Verringerung des Querschnittes auf der Advancing Side höher ausfällt als auf der Retreating Side. Die Ausbildung einer derartigen Nahtform wird auch in DUBOURG ET AL. (2008, S. 3) beim Rührreibschweißen von Rohren beschrieben. In unten stehendem Beispiel ist die Tiefe des Werkzeugeindrucks maximal 0,27 mm, während, von dieser Stelle gemessen, die Höhe der Nahtwölbung 0,46 mm beträgt. Unter der Annahme, dass die Außenkante der Werkzeugschulter auf der Advancing und Retreating Side wie auch die Schulter im hinteren Bereich auf der Blechoberfläche aufliegt, folgt nach Gleichung 6-9 ein rechnerischer Anstellwinkel des Werkzeuges von $11,1^\circ$. Auch aus dem Diagramm in Abbildung 56 geht ein derartiger Anstellwinkel bei dem verwendeten Werkzeug auf dieser Kontur hervor. Dieser hohe Winkel erscheint aufgrund der Messwerte aus Abbildung 69 durchaus plausibel. Eine Nahtwölbung kann auch am mittleren Querschliff ($r_a = 54,5 \text{ mm}$) festgestellt werden, allerdings ist sie dort mit 0,05 mm extrem gering.

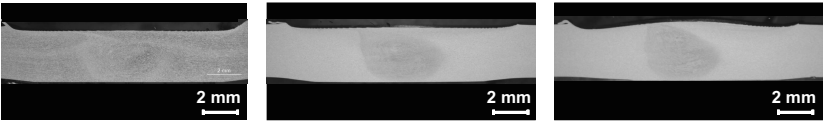


Abbildung 70: Querschliffe aus dem Radiusbereich von Versuchsblechen, die mit den Prozessparametern aus Abbildung 68 geschweißt wurden

Aus dem Radiusbereich im Stumpfstoß geschweißter Verbindungen wurden Zugproben entnommen, um die mechanischen Eigenschaften dieser Nähte zu ermitteln. Im Gegensatz zu Kapitel 5 wurden die Oberseiten der Schweißnähte nicht abgearbeitet, um eine Referenz zum maximalen Verbindungsquerschnitt von 3 mm zu erhalten. Tabelle 8 zeigt die Übersicht über die Zugfestigkeiten für beide Legierungen und alle drei Versuchsradien. Dabei zeigt sich, dass alle Versuchsproben im Allgemeinen an der Stelle mit dem dünnsten Nahtquerschnitt versagen, der durch den Werkzeugeindruck im Nahtbereich entsteht. Werden die Spannungen auf die in den Querschliffen gemessenen dünnsten Probendicken (an den Kerben) umgerechnet, ergeben sich Zugfestigkeiten, die sogar im Bereich derer der geschweißten ebenen Proben liegen.

Tabelle 8: Zugfestigkeiten von Radien, die nur mit einer verzögerten Umschwenkbewegung geschweißt wurden

	$r_a = 104,5 \text{ mm}$	$r_a = 54,5 \text{ mm}$	$r_a = 14,5 \text{ mm}$
AW-5083-H111	294 MPa	294 MPa	277 MPa
AW-6082-T6	229 MPa	233 MPa	230 MPa

Die Zugfestigkeiten liegen generell unter denen des Grundwerkstoffes bzw. unter denen geschweißter ebener Proben. Für die beiden größeren Versuchsradien ergeben sich beim AW-5083-Werkstoff jedoch sehr gute Werte von mindestens 90 % der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes. Die über den Außenradius r_a von 104,5 mm geschweißten AW-5083-Proben versagen sogar teilweise im Grundwerkstoff oder in der Schweißnaht, wobei ihre Zugfestigkeiten in diesem Fall auf Grundwerkstoffniveau liegen. Je geringer der Versuchsradius wird, desto stärker kommen die im Querschnitt entstehenden Kerben zum Tragen, was an den Ergebnissen der AW-5083-Legierung deutlich zu erkennen ist.

6.7.5.2 Weiterführende Änderung der Schweißbahn

Sowohl die theoretischen Betrachtungen als auch die praktischen Versuche zeigen, dass bei einer reinen Verzögerung der Umschwenkbewegung des Werkzeuges über dem Radius der Anstellwinkel am Nahtanfang zwar zunächst stark ansteigt, im Verlauf des Radius jedoch wieder sukzessive auf den programmierten Wert absinkt. In Abschnitt 6.5.3.3 ist deshalb eine rein horizontale Verschiebung der Schweißbahn vorgeschlagen, um die Erhöhung des Anstellwinkels bis zum Ende des Radiusbereiches aufrecht zu erhalten. Zusätzlich dazu bewirkt die Verkleinerung des programmierten Radius theoretisch eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit über dem Radius. Dieser Effekt ist insbesondere beim kleinsten der Versuchsradien von Interesse, da die mechanischen Eigenschaften bei den beiden größeren Versuchsradien schon sehr gut an die Eigenschaften eben geschweißter Verbindungen heranreichen.

Bei den in Abschnitt 6.7.3 beschriebenen Vorschubkräften für die beiden untersuchten Legierungen und die Robotersteifigkeit im Einlaufbereich ergeben sich nach Gleichung 6-23 für den Werkstoff AW-5083 eine horizontale Verschiebung von $V_x = 4,7$ mm, für den Werkstoff AW-6082 beträgt diese 3,9 mm. Vorausgesetzt ist ein Anstellwinkel in der Ebene von $\alpha = 2^\circ$ und im Radiusbereich ein Winkel von $\alpha_{\text{soll}} = 8^\circ$.

Im Fall einer rein horizontalen Verschiebung ergeben sich für den AW-5083-Werkstoff ab einem Verschiebungswert von $V_x = 4$ mm visuell fehlerfreie Schweißnähte. Die Schweißnaht ist auch bei höheren Verschiebungswerten V_x noch fehlerfrei, jedoch wird der Nahteneinfall größer, wodurch der Querschnitt der Schweißnaht verringert wird. Der Vergleich der Nahtoberflächen zeigt, dass im Fall einer rein horizontalen Verschiebung der Schweißbahn die Geschwindigkeit auch am Radiusende annähernd der programmierten entspricht. Dies kann anhand der Nahtoberseite in Abbildung 71 deutlich erkannt werden. Die verzögerte Bahn zeigt am Radiusende FSW-typische Riefen (linkes Bild, siehe Markierungen), die sehr viel enger aneinandergereiht sind, als dies bei der horizontal verschobenen Bahn (rechts) der Fall ist.

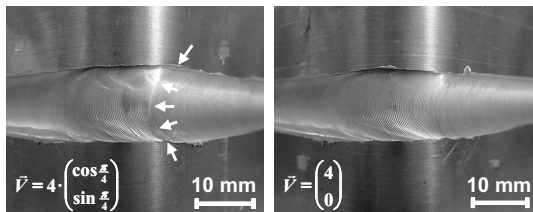


Abbildung 71: Vergleich der Nahtoberseiten einer verzögerten (links) und einer horizontal verschobenen (rechts) Schweißbahn; Werkstoff: AW-6082

Bei einer zusätzlichen Verringerung des programmierten Radius bestätigen sich die Vorhersagen, dass das Werkzeug mit einer erhöhten Geschwindigkeit über den Radius geführt wird. Abbildung 72 zeigt den theoretischen Anstellwinkel sowie Messergebnisse bei einer horizontalen Verschiebung der Schweißbahn von $V_x = 5,0$ mm. Der programmierte Radius beträgt bei diesem Schweißversuch $r_{prog} = 10,5$ mm. Auch wenn die Messungen im Ein- und Auslaufbereich sehr gut dem programmierten Anstellwinkel entsprechen, ist als Einschränkung zu erwähnen, dass die Präzision der Messungen aufgrund einer einfachen Videoauswertung relativ gering ist. Sie zeigen aber deutlich, dass im Gegensatz zu einer reinen Verzögerung der Schweißbahn (siehe Abschnitt 6.7.5.1) der Anstellwinkel nicht nur am Beginn des Radiusabschnittes, sondern über den gesamten Radiusabschnitt signifikant höher ist als der programmierte (2°). Lediglich im letzten Drittel des Radiusbereiches verringert sich der Anstellwinkel früher als es die Berechnungen vorhersagen. Die Gründe hierfür werden in den veränderten Prozessbedingungen aufgrund des veränderten Kontaktes der Werkzeugschulter auf dem Werkstück oder in einer sich ändernden tangentialen Steifigkeit des Systems über dem Radiusbereich vermutet. Eine variable Abdrängung des Werkzeuges wurde in der Simulation nicht berücksichtigt.

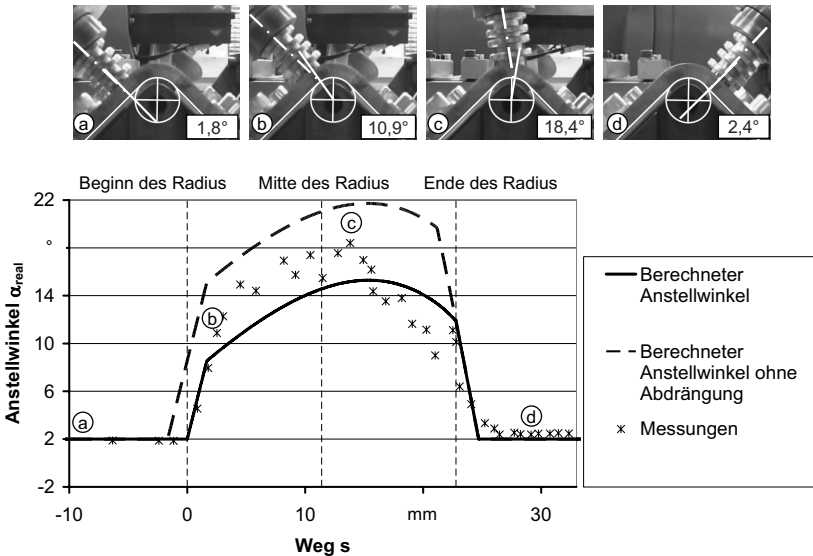


Abbildung 72: Theoretischer Verlauf des Anstellwinkels bei einer horizontalen Verschiebung von $V_x = 5 \text{ mm}$ und einem programmierten Radius von $r_{\text{prog}} = 10,5 \text{ mm}$ beim Schweißen des Radius $r_a = 14,5 \text{ mm}$; angenommene Abdrängung aus $C_{\text{lang}} = 600 \text{ N/mm}$ und $F_x = 976 \text{ N}$; Vergleich mit Messergebnissen

Auch die Geschwindigkeit steigt, wie erwartet, über dem Radius im Mittel auf etwa 145% der programmierten Geschwindigkeit an. Die erhöhte Geschwindigkeit des Werkzeuges lässt sich darüber hinaus auch rein visuell durch einen erhöhten Abstand der Riefen auf der Nahtoberseite im Vergleich zu den geraden Nahtabschnitten erkennen. Querschliffe von Schweißproben, die mit kleiner programmiertem Radius geschweißt wurden, zeigen jedoch auf der Advancing Side des Schweißnuggets häufig Tunnelfehler. Dort versagen folglich auch daraus entnommene Zugproben. Die Verringerung des programmierten Radius und die daraus resultierende Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit in diesem Maße ist daher für dieses Beispiel nicht zielführend. Um dennoch das Risiko eines zu starken Einsinkens des Werkzeuges am Beginn des Radius und damit die Kollision mit der Spannvorrichtung zu verringern, ist eine Reduktion der Prozesskraft um ca. 10 % im Radiusbereich zu empfehlen.

Beim Schweißen des Werkstoffes AW-6082 über den Außenradius von $r_a = 14,5$ mm zeigt sich, dass bei den gewählten Schweißparametern (siehe Tabelle 4) eine Erhöhung der Geschwindigkeit durch Verringerung des programmierten Radius ebenfalls nicht nötig ist. Mit dieser Strategie wird die in die Fügepartner eingebrachte Wärme sogar soweit reduziert, dass diese für eine merkmalsfreie Schweißnaht zu gering ist und dadurch offene Nahtfehler entstehen (Abbildung 73). Auch eine Reduktion der Prozesskraft im Radiusbereich ist beim Schweißen dieser Legierung nicht notwendig. Mit der Strategie einer rein horizontalen Verschiebung der Schweißbahn von $V_x = 4$ mm wird eine Zugfestigkeit der geschweißten Verbindung von $R_m = 227$ MPa erreicht, was im Vergleich zu einer verzögerten Schweißbahn zwar keine Verbesserung bedeutet, jedoch ist der Verlauf der Nahtoberfläche mit dieser Schweißstrategie gleichmäßiger. Insgesamt liegen die Zugfestigkeiten jedoch noch unter denen geschweißter ebener ($R_m = 245$ MPa) Verbindungen.

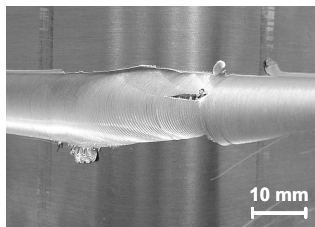


Abbildung 73: Nahtfehler aufgrund zu geringer Wärmeeinbringung über dem Radius; Material: AW-6083; $r_a = 14,5$ mm; $r_{prog} = 10,5$ mm; $V_x = 4$ mm; Schweißparameter siehe Tabelle 4

6.7.6 Variation des Werkzeuges

In Abschnitt 6.4.3 wird vorgeschlagen, die Schulterform zu optimieren, um eine Nahtwölbung im Bereich des Radius zu verhindern. Daher wurden am kleinsten der untersuchten Versuchsradien auch Schweißversuche mit einer ebenen Schulterform durchgeführt. Messungen der Prozesskräfte belegen, dass die Kraftkomponente entgegen der Vorschubrichtung etwa 40 % höher ist als bei einem gleichen Schweißversuch unter Verwendung der konkaven Schulterform (Messung am Beispiel der Werkstoffe AW-5083 und AW-6082). Dadurch müssen die Verschiebungen in horizontaler Richtung entsprechend höher gewählt werden, um

das Zurückdrängen des TCP beim Schweißen über den Versuchsradius auszugleichen zu können.

Schliffbilder von oberflächlich fehlerfreien Schweißnähten zeigen den gewünschten Effekt. Das Werkzeug sinkt zwar vergleichbar tief in den Werkstoff ein, jedoch bildet sich keine oder eine geringere Nahtwölbung aus, was durch die veränderte Schulterform begründet ist. So beträgt die Nahtwölbung im Fall des linken Querschliffes aus Abbildung 74 ca. 0,05 mm, im rechten Teilbild 0,22 mm (vgl. analoge Schweißnaht mit konkaver Schulter aus Abbildung 70 rechts: 0,46 mm). Eine Ausbildung von Längsriefen auf der Nahtoberfläche ist entgegen der Simulation nicht zu beobachten (vgl. Abbildung 55) und durch den realen Werkstofffluss während des Schweißens zu begründen. Am Beispiel einer geschweißten AW-6082-Verbindung über den Außenradius $r_a = 14,5$ mm kann bei Verwendung einer ebenen Werkzeugschulter die Zugfestigkeit im Vergleich zu den Versuchen mit konkaver Schulter nur unwesentlich gesteigert werden ($R_m = 234$ MPa). Diese Werte liegen jedoch nur noch knapp unterhalb derer eben geschweißter Verbindungen und sind auf die verbleibende Verringerung des Nahtquerschnittes zurückzuführen.

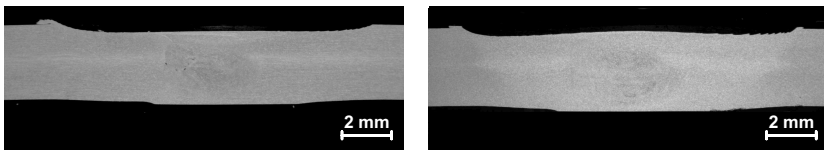


Abbildung 74: Querschliffe von Schweißnähten über den Versuchsradius $r_a = 14,5$ mm, die mit ebener Werkzeugschulter geschweißt wurden; Werkstoffe: links AW-5083, rechts AW-6082

6.8 Schlussfolgerungen

6.8.1 Gültigkeit für andere Schweißnahtgeometrien

Mit den vorliegenden Strategien ist es möglich, fehlerfreie Schweißnähte über die untersuchten Konturen zu erzeugen. Für Winkel ungleich der untersuchten 90° ergeben sich prinzipiell die selben Schweißstrategien, jedoch werden die Parameterfenster für fehlerfreie Schweißnähte mit größeren Winkeln entsprechend kleiner und umgekehrt. So ist für Konturen mit einem Winkel größer als 90° zu

erwarten, dass die notwendige Erhöhung des Anstellwinkels durch eine horizontale Verschiebung der Schweißbahn gegenüber dem Bauteil zunehmend kritisch wird. Denn in Formel 6-20 ändern sich die Argumente der Sinus- und Cosinus-Glieder dahingehend, dass sie nicht mehr die Terme $\pi/4$ enthalten, sondern auf den zu überfahrenden Winkel angepasste Werte (beispielsweise $3/8 \cdot \pi$ bei einem zu überfahrenden Winkel von 135°). Damit erhöht sich zu Anfang und am Ende des Radius der Anstellwinkel nicht mehr so stark wie bei kleineren zu überfahrenden Winkeln.

6.8.2 Veränderung der Schweißbahn

Die Versuche zeigen, dass eine einfache Nahtfolge, wie sie beispielsweise beim automatisierten Schutzgasschweißen eingesetzt wird, nicht anwendbar ist. Auch eine Bahngenerierung aus einem CAD-System, wie es von SORON (2007, S. 115 ff.) realisiert wurde, ist bei kleinen Radien nicht ausreichend, denn abhängig von den zu schweißenden Radien muss der Anstellwinkel des Werkzeuges vergrößert werden, um fehlerfreie Schweißnähte zu erzeugen. Handelsübliche Nahtfolgesysteme dagegen regeln die Werkzeugführungs kinematik normalerweise auf einen konstanten Anstellwinkel über der Naht aus.

Durch eine gezielte Verschiebung der Schweißbahn gegenüber der realen Kontur kann die Abdrängung des TCP entgegen der Schweißrichtung kompensiert werden. Darüber hinaus kann bei noch höheren Verschiebungswerten der reale Anstellwinkel des Werkzeuges über dem Radius vergrößert werden. Der Aufwand einer solchen Modifikation der Schweißbahn ist insbesondere bei einer Offline-Programmierung verhältnismäßig gering. Durch eine Verschiebung der Schweißbahn wird ermöglicht, dass das Werkzeug selbst über enge Radien einen Kontakt zur Werkstückoberfläche besitzt, der für die notwendige Verdichtungswirkung auf den Werkstoff ausreichend ist. Ziel der Verschiebung muss es primär sein, ein Eintauchen des Werkzeuges mit der vorderen Kante der Schulter zu unterbinden. Passiert dies dennoch, gräbt sich das Werkzeug in den Werkstoff ein und kollidiert schließlich mit der Spannvorrichtung, was zu einer unbrauchbaren Schweißverbindung und ggf. auch zu einer Beschädigung der Spannvorrichtung führt.

Die Versuche zeigen, dass bei großen Werkstückradien bereits kleinere Verschiebungen der Schweißbahn ausreichen, um fehlerfreie Schweißnähte zu erzeugen. Der Grund hierfür ist, dass bei größeren Radien die Kompensation der Werkzeugrückdrängung eine wichtigere Rolle spielt als eine Erhöhung des

Anstellwinkels. Wird der zu schweißende Radius allerdings kleiner, muss durch die Korrekturen der Schweißbahn zusätzlich der Werkzeuganstellwinkel erhöht werden. Dadurch lässt sich der Schweißprozess umso schwieriger korrekt einstellen, je kleiner der zu schweißende Radius ist. Dennoch ist eine Verschiebung der Schweißbahn in lediglich eine Richtung ausreichend, um die Werkzeugabdrängung zu kompensieren und gleichzeitig den Anstellwinkel über dem Radius zu erhöhen.

Für den Fall, dass der Wärmeeintrag über dem Radius aufgrund eines Wärmestaus zu hoch ist und dadurch bedingt das Werkzeug zu tief in die Werkstücke eindringt, bietet sich eine Verkleinerung des programmierten Radius gegenüber der Originalkontur an. Dadurch kann eine Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit erzielt werden, ohne die Prozessparameter an sich verändern zu müssen. Dies hat gegenüber einer direkten Änderung der Prozessparameter den Vorteil, dass die Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit insbesondere bei kleinen zu schweißenden Radien exakt im Radiusbereich passiert und keine weiteren besonderen Programmbefehle im Schweißprogramm erforderlich sind. Es konnte darüber hinaus anhand der für die Experimente verwendeten Materialien gezeigt werden, dass durch diese Maßnahme der Wärmeeintrag soweit reduziert werden kann, dass dieser im Radiusbereich sogar zu gering für eine fehlerfreie Schweißnaht ist. Eine zusätzliche Reduktion der Prozesskraft im Bereich des Radius kann weiterhin im Bedarfsfall helfen, die in die Fügepartner eingebrachte Wärme zu verringern und so einen stabilen Schweißprozess herzustellen, jedoch steigt dadurch das Risiko innerer Nahtfehler aufgrund einer zu geringen Verdichtung des Werkstoffes durch das Werkzeug.

Der Anwendungsbereich der erzielten Ergebnisse erstreckt sich nicht nur über Roboterschweißanlagen, sondern prinzipiell über alle kraftgeregelten Rührreißschweißanlagen. Dennoch ist zu erwähnen, dass die Veränderungen der Schweißbahn nur dann zu zufriedenstellenden Ergebnissen führen, wenn die Schweißanlage über eine ausreichend schnelle Kraftregelung verfügt und eine ausreichende Toleranz in der Korrektur der axialen Richtung zulässt, um über die gesamte Schweißnaht die vorgegebene Prozesskraft bereitzustellen. Für positionsgeregelte Schweißanlagen muss der Werkzeugkontakt über eine entsprechende Programmierung der Anlage hergestellt werden. Die für eine fehlerfreie Schweißnaht notwendige Erhöhung des Anstellwinkels kann jedoch auch auf diesen Anlagen angewendet werden.

6.8.3 Einfluss der Spanntechnik

Der Spannvorrichtung kommt insbesondere bei kleinen Radien eine besondere Bedeutung zu. Während bei den größeren untersuchten Versuchsradien eine punktuelle Spanntechnik für ein gleichmäßiges Nahtbild ausreichend ist, muss bei engen Radien eine möglichst flächige Fixierung der Versuchsbleche realisiert werden. Trotz Realisierung einer so beschaffenen Einspannung konnte im Bereich kurz vor dem Radiusbeginn eine vermehrte Gratbildung sowie ein Durchdrücken des Werkzeuges nicht vermieden werden. Dass diese Effekte auf die Spannvorrichtung zurückzuführen sind, zeigen auch andere Arbeiten (IMWF STUTTGART & FT ILMENAU 2007, S. 48 ff.). Die Spannvorrichtungen, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet wurden, weisen aus Flexibilitätsgründen einen Abstand von 15 mm zum Werkzeug auf. Wird dieser Abstand verringert, sind entsprechend bessere Ergebnisse bezüglich der Gratbildung und einer Nahtwurzelerhöhung zu erwarten.

6.8.4 Werkzeuggestaltung

Grundsätzlich sind Werkzeuge mit möglichst kleinem Schulterdurchmesser zu verwenden. Für ebene Schweißnähte wird dadurch der Nahtquerschnitt kleiner. Im Bereich der Radien wird anhand der theoretischen Betrachtungen gezeigt, dass bei Verwendung kleinerer Schulterdurchmesser der Anstellwinkel des Werkzeuges um ein geringeres Maß als im Falle größerer Werkzeuge erhöht werden muss, um einen ausreichenden Kontakt auf den Fügepartnern zu gewährleisten. Dies wird umso wichtiger, je kleiner der zu verschweißende Radius ist. Aus den geringeren Änderungen des Werkzeuganstellwinkels wiederum folgen kleinere Änderungen der Schweißbahn, die für fehlerfreie Schweißnähte erforderlich sind.

Durch die Schulterform kann die charakteristische Ausbildung der Nahtform im Bereich des Radius beeinflusst werden. Bei Verwendung von konkav geformten Werkzeugschultern entsteht dort eine Nahtwölbung, da das Werkzeug lediglich am Rand der Advancing Side und der Retreating Side in hartem Kontakt mit den Fügepartnern steht. Wird die Form der Werkzeugschulter eben gestaltet, resultiert selbst bei kleinen Radien eine Nahtform ohne nennenswerte Wölbung. Zugversuche belegen dies ebenfalls anhand höherer Zugfestigkeiten, die durch die geringere Einkerbung der Fügepartner durch das Werkzeug bedingt sind. Die Verbesserung fällt allerdings nur noch sehr gering aus.

6.8.5 Konstruktion der Fugestelle

Die beschriebenen Versuche zeigen, dass auch bei einfachen Stumpfstoßen Schweißnähte erzeugt werden können, bei denen die Zugproben nicht im Zentrum der Schweißnaht versagen. Die schwächste Stelle liegt meist am Rand der Naht, wo der Querschnitt aufgrund einer Einkerbung des Werkzeuges verringert ist. Anhand der Querschliffe oberflächlich merkmalsfreier Schweißversuche konnten keine Nahtfehler wie ungenügende Durchschweißungen (*lack of penetration*) gefunden werden. Dennoch stellen diese Schliffe lediglich den Zustand eines lokalen Querschnittes der Naht dar und sind nicht für die gesamte Naht im ebenen wie im Bereich des Radius repräsentativ. Die Bruchflächen der Zugproben sprechen jedoch für Schweißverbindungen ohne Tunnelfehler im gesamten Radiusbereich. Dynamische Zugversuche, bei denen insbesondere ungenügende Durchschweißungen negativ auffallen, wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Für den Fall, dass bei Realbauteilen, die dynamisch beansprucht werden, derartige Nahtfehler auftreten, kann die Fügezone durch eine Art „Badstütze“ zusätzlich abgesichert werden (Abbildung 75). Dadurch kann der Werkzeugpin etwas länger gestaltet werden, so dass dieser in die Unterstützung einschweißen kann und auch ein leichtes Einsinken des Werkzeuges im Radiusbereich keine Kollision des Werkzeuges mit der Spannvorrichtung zur Folge hat. Die vorgeschlagene Stoßgeometrie ist insbesondere beim Schweißen von Blechen an Gussteile interessant, da die Füge-technologie bei der Konstruktion der Stoßgeometrie der Gussteile berücksichtigt werden kann. Bei statisch beanspruchten Bauteilen kann der Prozess auch ohne Unterstützung hinreichend genau eingestellt werden, wie die beschriebenen Versuche zeigen. Auch die erfolgreiche Verwendung eines einzigen Werkzeuges für den ebenen sowie den gekrümmten Bereich ist möglich.

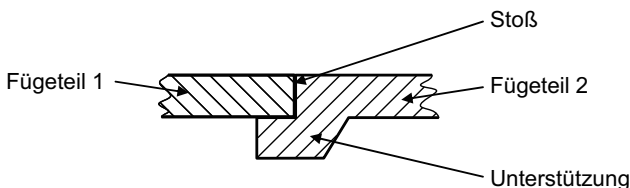


Abbildung 75: Stoßgeometrie mit Unterstützung

6.8.6 Belastungen des Roboters

Die Untersuchungen belegen, dass die gezeigten Geometrien mit dem Roboter durchaus rührreibschweißbar sind. Damit ist die Eignung des Systems für derartige Geometrien zunächst nachgewiesen. Die Lasten des Roboters beim Schweißen sind mit den gewählten Prozessparametern im Vergleich mit den sehr hohen Lasten, wie sie beispielsweise bei der Legierung AW-2024 erforderlich sind (vgl. Tabelle 2 in Abschnitt 5.2.2), noch relativ gering. Dennoch muss der Roboter mit relativ großen Umorientierungsgeschwindigkeiten betrieben werden, um die geforderten Prozessparameter gewährleisten zu können. Die damit verbundenen Achsbeschleunigungen führen zu entsprechenden dynamischen Belastungen der Motoren, wodurch eine generelle Aussage über die Eignung des Roboters in Bezug auf eine Schweißaufgabe unmöglich erscheint. Folgende Kriterien und Empfehlungen müssen daher bei hohen Belastungen des Systems überprüft bzw. angewendet werden:

- Zumindest im Bereich des zu schweißenden Radius kann die Auswahl von Prozessparametern mit möglichst geringen Werkzeuganpresskräften helfen, die Grundbelastung der Getriebe und Motoren zu reduzieren. Auch die Reduktion der Vorschubgeschwindigkeit entlastet das System und bringt bei geringer gewählten Werkzeuganpresskräften einen Ausgleich des notwendigen Wärmeeintrages mit sich.
- Der Abstand vom Roboterflansch zur Werkzeugschulter ist so gering wie möglich zu gestalten. Dadurch können hohe Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen vermieden werden.
- Bei der Gestaltung der Fügestelle ist auf einen Kompromiss zwischen optimaler Geometrie und der Schweißsicherheit zu achten. Durch einen möglichst großen Radius kann damit die Schweißanlage entlastet werden (geringere Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen bei der Umorientierung des Werkzeuges) und es kann auch die Gefahr von Schweißnahtfehlern im Radiusbereich reduziert werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung von Schwerlast-Industrierobotern bezüglich ihrer Eignung zum Rührreibschweißen. Da dieser Schweißprozess hohe Anpresskräfte eines rotierenden Werkzeuges auf den Fügepartnern erfordert, werden dafür bislang hauptsächlich Sonderschweißanlagen eingesetzt, welche die für eine Schweißaufgabe notwendigen Prozesskräfte unter einer vernachlässigbaren elastischen Verformung bereitstellen. Des Weiteren können auch Fräsmaschinen, CNC-Bearbeitungszentren oder parallelkinematische Systeme unter der Randbedingung begrenzter Einschweißtiefen im Plattenbereich verwendet werden. Schwerlast-Industrieroboter besitzen mittlerweile Handhabungskapazitäten, die theoretisch zum Verschweißen von Aluminiumlegierungen im Dickenbereich einiger Millimeter ausreichen. Aufgrund ihrer geringen Steifigkeiten sind jedoch im Vergleich zu Bearbeitungszentren oder Sonderschweißanlagen hohe elastische Verformungen bzw. ein ungünstiges dynamisches Verhalten des Systems zu erwarten, was den Schweißprozess negativ beeinflussen kann.

Um den Einfluss der Schweißanlage auf die Qualität von FSW-Verbindungen zu untersuchen, wurden zunächst drei unterschiedliche Aluminiumlegierungen im Dickenbereich von 2 bis 8 mm ausgewählt, die im Stumpfstoß mit einer FSW-Anlage, einem Fräsbearbeitungszentrum und einer Roboterschweißanlage unter möglichst gleichen Prozessbedingungen gefügt wurden. Als Versuchslegierungen wurden die aushärtbare Strangpresslegierung AW-6060 im Wärmebehandlungszustand T66, die naturharte Walzlegierung AW-5083 und der Gusswerkstoff AC-46000 in Form von Druckgussplatten für die Experimente herangezogen. Um die Flexibilität des Roboters für unterschiedliche Schweißpositionen zu erproben, wurden die Versuche sowohl in Vertikal- als auch in Horizontallage des Werkzeuges durchgeführt. Während die FSW-Anlage und der Roboter über eine Kraftregelung verfügen, wurden die Schweißnähte mit der CNC-Maschine im positionsgeregelten Betrieb hergestellt. Die Versuchslegierungen wurden dabei mit Prozesskräften von bis zu 8 kN verschweißt. Die Auswertung der Schweißnähte erstreckte sich auf folgende Maßnahmen: Visuelle Begutachtung, Biegeproben, Querschleiffe, Zugversuche sowie Härtemessungen. Es konnte gezeigt werden, dass unter den gegebenen Prozessbedingungen mit allen drei Anlagentypen nahezu identische Schweißnahtqualitäten erzeugt werden können. Im direkten Vergleich

mit der FSW-Anlage kann sich die hohe Nachgiebigkeit der Roboteranlage, welche sich aus dem Schweißroboter sowie dem Bearbeitungstisch und der Spannvorrichtung ergibt, zwar in Form von Vibrationen bemerkbar machen. Auf die Qualität der Schweißergebnisse wirken sich diese Vibrationen aber nicht aus, da das Werkzeug stets mit ausreichender Anpresskraft auf den Fügepartnern geführt werden kann. Das Strukturverhalten bei geringen Werkzeugdrehzahlen wurde in einer separaten Studie untersucht. Dabei wurden für die in der Luftfahrt gebräuchliche Aluminiumlegierung AW-2024 Schweißparameter in einem Drehzahlbereich von 400 min^{-1} bis 900 min^{-1} realisiert. Zusätzlich dazu wurden für den Roboter sehr hohe Prozesskräfte von bis zu 12 kN vorgegeben und angewendet. Die Belastungsgrenzen des Roboters wurden dabei für die gewählte Schweißlage ausgereizt. Die Versuche zeigen, dass das System auch in diesem Drehzahlbereich einen stabilen Schweißprozess ohne nennenswerte Schwingungen des Werkzeuges oder der Roboterstruktur ermöglicht. Lediglich während der Eintauchphase sind Vibrationen der Roboterschweißanlage mit der Frequenz der Werkzeugdrehzahl zu beobachten. Dabei ist jedoch anzumerken, dass das Eintauchen des Werkzeuges unter ungünstigen Randbedingungen erfolgte, die durch geeignete Maßnahmen optimiert werden können. Durch die hohen Belastungen, die während des Eintauchens und des Schweißens auf den Roboter wirken, verändert sich auch der Anstellwinkel des Werkzeuges relativ zum vorgegebenen Wert. Je nach Schweißlage und Richtung war im Rahmen der Versuche eine Änderung um $\pm 0,5^\circ$ zu messen. Auf die Nahtqualität haben diese Veränderungen jedoch keinen nennenswerten Einfluss, wie vergleichende Schweißnähte auf einer steifen FSW-Anlage zeigen ($< 2 \%$, bezogen auf Zugfestigkeiten der Schweißverbindungen). Der stabile Schweißprozess ist auf ein extrem gutes Dämpfungsverhalten des FSW-Prozesses zurückzuführen. Mit den gewonnenen Ergebnissen eröffnet sich für das robotergestützte Rührreibschweißen ein großes Anwendungspotential, welches vor allem durch die Maximalbelastung des Roboters begrenzt ist.

Robotersysteme besitzen im Vergleich zu CNC- und Sonderschweißanlagen eine hohe Flexibilität, die anlagenbedingt nahezu beliebige Schweißnahtkonturen erlaubt. Ein überwiegender Anteil der industriell hergestellten FSW-Nähte besteht zwar aus linearen Konturen oder Orbitalnähten mit sehr großem Durchmesser, wie sie im Bereich der Luft- und Raumfahrt benötigt werden. Komplexere Schweißnahtgeometrien sind aber in anderen Branchen wie dem Automobilbau zu finden. Schweißnähte mit größerer Krümmung (z. B. an Rohren) werden meist mit positionsgeregelten Anlagen realisiert, was einen relativ geringen Aufwand für die Prozesseinstellung erfordert. Das kraftgeregelte Rührreibschweißen an Konturen

mit sehr geringen Radien wurde daher an einer Kontur untersucht, die einen ebenen Einlaufbereich, einen variablen konvexen Radiusbereich sowie einen ebenen Auslaufbereich aufweist. Der Radius betrug dabei minimal 14,5 mm, wobei ein Umorientierungswinkel von 90° überstrichen wurde. Theoretische Betrachtungen hinsichtlich des Überganges des Schweißprozesses von der Ebene in den gekrümmten Bereich zeigen, dass eine Erhöhung des Werkzeuganstellwinkels erforderlich ist, damit die Werkzeugschulter einen optimalen Kontakt zu den Fügepartnern herstellen und somit eine ausreichende Verdichtung des Werkstoffes gewährleisten kann. Neben einer aufwändigen Programmierung zur Erhöhung des Anstellwinkels bieten sich bei kraftgeregelten Anlagen auch Möglichkeiten, diesen durch eine gezielte Veränderung der programmierten Schweißbahn zu beeinflussen. Die Abdrängung des Werkzeuges entgegen der Schweißrichtung infolge der wirkenden Prozesskräfte muss dabei berücksichtigt werden. Praktische Versuche an drei ausgewählten Konturen und zwei ausgewählten Aluminiumlegierungen bestätigen die theoretischen Betrachtungen, so dass bei einer Blechdicke von 3 mm und einem minimalen untersuchten Außenradius von 14,5 mm fehlerfreie Schweißnähte erzeugt werden können. Zugversuche belegen, dass im Bereich des Radius – insbesondere bei kleinen Radien – die schwächste Stelle an den Rändern der Naht liegt, da das Werkzeug hier aufgrund seiner charakteristischen Schultergeometrie im Füge teil eine Kerbe erzeugt, die den Verbindungsquerschnitt verringert. Durch die Änderung der Schulter von einer konkaven Kontur hin zu einer ebenen Kontur kann dem entgegengewirkt werden, so dass die Zugfestigkeiten der Schweißnähte annähernd den Werten eben geschweißter Stöße gleichen. Dennoch ist zu erwähnen, dass durch die Werkzeugabdrängung, die durch die sich ändernden Steifigkeitsverhältnisse des Roboters bedingt ist, insbesondere beim Schweißen über sehr enge Radien Nahtwurzelfehler in Form von *lack of fusion* entstehen können. Der Prozess muss daher sehr genau eingestellt werden, um fehlerfreie Schweißnähte erzeugen zu können.

Damit sind die Grundlagen geschaffen, den Rührreibschweißprozess über die Anwendungen aus der Luft- und Raumfahrt, des Schiff- oder des Schienenfahrzeugbaus hinaus auch auf komplexe Strukturen zu übertragen, wie diese beispielsweise im Automobilbau anzutreffen sind. Industrieroboter können dabei sowohl die notwendigen Prozesskräfte für Anwendungen an Aluminiumblechen als auch die erforderliche Flexibilität für eine entsprechend angepasste Werkzeugführung bereitstellen.

7.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Untersuchungen belegen das Vorhandensein der technologischen Voraussetzungen für den Einsatz von Sechs-Achsen-Knickarmrobotern zum Rührreibschweißen. Die darauf beruhend mögliche Klasse von FSW-Anlagen belegt eine eigene Nische möglicher Anwendungsgebiete. Sie besteht aus Anwendungen mit Einschweißtiefen einiger Millimeter, die im Arbeitsraum des Roboters, also innerhalb eines Abstandes von etwa 2 m von der Roboterbasis, liegen und/oder stark nichtlineare Nahtkonturen aufweisen. Des Weiteren erfordern sie im Vergleich zu Sonderschweißanlagen, Fräsmaschinen oder parallel-kinematischen Robotern einen weitaus geringeren Investitionsaufwand. Dadurch können sie teilweise kostenintensive Sonderschweißanlagen ersetzen, die in diesen Anwendungsbereich (Tankstrukturen in der Luft- und Raumfahrt, im Schienenfahrzeug- und Automobilbau) fallen.

Sonderschweißanlagen können jedoch nach wie vor eine optimale Lösung darstellen, wenn es die Schweißaufgabe aufgrund der notwendigen Prozesskräfte oder eine extreme Bauteilgröße erfordert. Auch moderne CNC-Anlagen, die insbesondere für die Schwerzerspannung metallischer Werkstoffe ausgelegt sind, und moderne Tripoden können höhere Prozesskräfte bereitstellen als derzeit industriell verfügbare Roboter, wodurch sich ihr Anwendungsbereich auf höhere Einschweißtiefen erstreckt als der von Robotern. Zudem ist mit diesen Anlagen eine hochgenaue Zerspanung der Bauteile vor und nach dem Schweißen in einer Aufspannung möglich. Der meist relativ kleine Arbeitsraum macht jedoch oft die Bearbeitung größerer Bauteile unmöglich bzw. die Anlagenkosten steigen stark mit dem Arbeitsraum der Maschinen und der Anzahl der Achsen. Ein wirtschaftlicher Vergleich des Knickarmroboters mit den anderen Anlagen erscheint daher nicht sinnvoll. Die Anschaffungskosten für einen geeigneten Schwerlastroboter mit dazugehöriger Schweißspindel und Steuerung sind derzeit mit bis zu 200.000,- € (Stand 2009) zu schätzen. Ein angepasstes CNC-Bearbeitungszentrum erfordern dagegen ein Investitionsvolumen von 300.000,- € und, je nach Arbeitsraum, weit darüber.

7.3 Ausblick

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass das Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern in einem großen Anwendungsbereich möglich ist und die resultierenden Nahtqualitäten zu denen identisch sind, die auch mit herkömmlichen

FSW-Anlagen erreicht werden. Dennoch stellen gerade Roboter sehr komplexe Systeme dar, die bei sich stark ändernden Arbeitspositionen ebenso unterschiedliches Anlagenverhalten zeigen können, weswegen die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen nur einen Teilaspekt zum robotergestützten Rührreibschweißen abdecken können. Entsprechende Feldversuche an Realbauteilen müssen daher herangezogen werden, um die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse zu verifizieren.

Es wurden weiterhin erfolgreich Schweißnähte auf engen Radien mit dem Roboter hergestellt. Die Versuche wurden jedoch nur in einer Schweißposition und mit einer Einschweißtiefe durchgeführt. Die daraus gewonnen Ergebnisse sind zwar in sich schlüssig, jedoch müssen diese mit anderen Radien, Materialien, Einschweißiefen und Schweißpositionen validiert und schließlich auch auf Realbauteile mit komplexen Nahtgeometrien übertragen werden.

Aufgrund der Limitierung der maximalen Drehmomente an den Getrieben und Motoren ist der Einsatzbereich des Roboters je nach Legierung auf Einschweißiefen von wenigen Millimetern begrenzt. Wenn es gelingt, durch die Weiterentwicklung von Werkzeugen die notwendigen Prozesskräfte für einen optimalen Schweißprozess zu senken, könnte auf diesem Wege der Einsatzbereich entsprechend erweitert werden. Als ein Beispiel ist hier die Bobbin-Tool-Technologie (GOTO ET AL. 2005; LAFLY ET AL. 2006) zu nennen. Durch diese Werkzeugtechnologie liegt der Kraftfluss größtenteils im Werkzeug selbst, so dass die das Werkzeug führende Anlage nur die Vorschubkraft, eine prozessbedingte Kraft normal zur Vorschubrichtung sowie Drehmomente um die drei Raumachsen aufbringen muss. Somit werden die Gelenke des Roboters entlastet bzw. es können theoretisch auch höhere Einschweißiefen erzielt werden. Ein zweites Beispiel für verbesserte Werkzeugkonzepte ist die Minimierung der Schulterfläche bzw. eine stillstehende Schulter, während lediglich der Pin rotiert. Dadurch kann mit kleinerer Prozesskraft der gleiche Druck unter der Schulter erzeugt werden, wodurch die Anforderungen an die Handhabungskapazität der Schweißanlage sinken (WIDENER ET AL. 2006b).

Das robotergestützte Rührreibschweißen kann auch neue Möglichkeiten zum Fügen von Nicht-Aluminium-Werkstoffen eröffnen. So wurde bereits gezeigt, dass selbst Kunststoffe durch dieses Prinzip erfolgreich gefügt werden können (MATTAPELLI ET AL. 2007, WILDEN ET AL. 2006). Durch das Vorwärmen der Fügepartner könnten die notwendigen Prozesskräfte soweit reduziert werden, dass auch Roboter mit mittleren Traglasten die Werkzeugführung übernehmen können.

Ein wesentlicher Nachteil der Anwendung von Knickarmrobotern zum Rührreibschweißen ist die Abdrängung des Werkzeuges aufgrund der Prozesskräfte entgegen der Vorschubrichtung und seitlich dazu. Dies kann zu ungenügenden Durchschweißungen (OKI ET AL. 2006; WIDENER ET AL. 2006a, S. 7760) und/oder, wie gezeigt, zu schweren Nahtfehlern durch die Kollision des Werkzeuges mit der Spannvorrichtung führen. Durch eine Übertragung der in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse in ein Nahtfolgesystem wäre es möglich, eine Bahnplanung von zu schweißenden Nähten aus CAX-Systemen heraus zu generieren. Die vom Nahtfolgesystem vorgegebenen Korrekturwerte könnten analog zur Kraftregelung zu einer Positionskorrektur des Werkzeuges in Form einer Online-Regelung verwendet werden. Besitzt der Nutzer darüber hinaus auch noch exakte Kenntnisse über das Steifigkeitsverhalten des Roboters im Raum, wäre eine Offline-Bahnplanung ohne Nahtfolgesensor denkbar. Dies erfordert jedoch auch genaue Kenntnisse über die wirkenden Prozesskräfte, die von dem zu schweißenden Material, der Einschweißtiefe, dem Schweißwerkzeug sowie den verwendeten Prozessparametern abhängig sind (PEW 2008; STAHL 2005). Zudem müssten die Fügepartner relativ zueinander und zum Roboter exakt fixiert werden, um für hinreichend genaue Randbedingungen zu sorgen. Somit erscheint dieser Ansatz zwar möglich, praktisch ist er jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf das Schweißen konkaver Strukturen nicht eingegangen. Ein limitierender Faktor dürfte zum einen das Verhältnis von Werkzeugschulterdurchmesser zum Krümmungsradius der Oberfläche sein. Bei größeren Werten dieser Verhältnisse besteht die Gefahr, dass die Vorderkante der Werkzeugschulter in Kontakt mit den Fügepartnern gerät und das Werkzeug zu tief in diese eintaucht. Zum anderen kann es bei sehr engen Konturen zu Problemen der Erreichbarkeit der Fügestelle kommen, so dass das Werkzeug oder die Spindel mit den Bauteilen oder der Spannvorrichtung kollidieren würde. Dass das Schweißen konkaver Radien aber dennoch möglich ist, wurde bereits an einer CNC-Anlage erfolgreich am Beispiel einer Kontur mit einem Oberflächenradius von 105 mm gezeigt (HIRANO ET AL. 2001). Ein stabiler Prozess kann wie auch bei konvexen Strukturen durch die Veränderung des Werkzeuganstellwinkels erzielt werden. Dies kann durch eine entsprechende Programmierung der Schweißanlage oder auch, wie gezeigt, durch eine gezielte Veränderung der Schweißbahn realisiert werden.

Die robotergestützte FSW-Anlage wurde über mehr als drei Jahre im Laborbetrieb genutzt. Daraus resultieren noch keine Erkenntnisse über Verschleißerscheinungen im produktionsnahen (Dauer-)Betrieb. Normalerweise werden Knickarmroboter zum Bewegen von Werkzeugen oder Werkstücken eingesetzt, wodurch der Roboter

die Achsen in einem weiten Bereich mit hohen Beschleunigungen und Geschwindigkeiten bewegen muss. Dem gegenüber stehen hohe Lasten beim Rührreibschweißen, die nahezu statisch auf die Getriebe des Roboters wirken, während diese nur sehr kleine Bewegungen ausführen. Eine derartige Rührreibschweißanlage muss also noch im Dauerbetrieb bewertet werden, um Aussagen über die Tauglichkeit im Produktionseinsatz treffen zu können. Bei der für diese Untersuchung genutzten Anlage konnten jedoch noch keine Verschleißerscheinungen festgestellt werden.

8 Literaturverzeichnis

AMAG 2005

AMAG: Kathodenblech AMAG ProCath für Zinkelektrolyse. Metall - Internationale Fachzeitschrift für Metallurgie 59 (2005) 12, S. 792.

ANDERSSON ET AL. 2000

Andersson, C. G.; Andrews, R. E.; Dance, B. G. I.; Russell, M. J.; Olden, E. J.: A Comparison of Copper Canister Fabrication by the Electron Beam and Friction Stir Process. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Friction Stir Welding Symposium. Gothenburg (Schweden), 26.-28.6.2000.

ANONYM 2006

anonym: Neues Fügeverfahren bietet etliche Vorteile. Das Profil (Rheinmetall AG) o. Jg. (2006) 3, S. 7.

ASTM E8-04

ASTM E8-04: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. West Conshohocken (Pennsylvania/USA): American Society for Testing Materials (ASTM) International 2004.

BAUMANN 2006

Baumann, J. A.: FS process capabilities for highly contoured applications. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

BCA 2005

Business & Commercial Aviation 7/2005
<<http://www.reprintbuyer.com/mags/buscomav/1-10788404-eprint.pdf>> - Stand: 21.1.2008.

BLACH & SENNE 2002

Blach, O.; Senne, F.: Reibrührschweißen aus der Sicht eines Anwenders im Schienenfahrzeugbau. Reibrührschweißen, 2. GKSS Workshop. Geesthacht, 23.1.2002, S. 85-94.

BMP 2002

BMP - Best manufacturing practices center of Excellence: Report of survey conducted at General Tool Company
<<http://www.bmpcoe.org/bestpractices/pdf/gtc.pdf>> - Stand: 23.1.2008.

BROOKER ET AL. 2000

Brooker, M. J.; van Deudekom, A. J. M.; Kallee, S. W.; Sketchley, P. D.: Applying Friction Stir Welding to the Ariane 5 Main Motor Thrust Frame. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Friction Stir Welding Symposium. Gothenburg (Schweden), 26.-28.6.2000.

CAVALIERE ET AL. 2006

Cavaliere, P.; Nobile, R.; Panella, F.-W.; Squillace, A.: Mechanical and microstructural behaviour of 2024-7075 aluminium alloy sheets joined by friction stir welding. International Journal of Machine Tools and Manufacture 46 (2006) 6, S. 588-594.

CEDERQVIST 2004

Cederqvist, L.: FSW to seal 50mm thick copper canisters - a weld that lasts for 100,000 years. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Friction Stir Welding Symposium. Metz (Frankreich), 14.-16.9.2004. 2004. ISBN: 1-903761-04-2.

CEDERQVIST 2006

Cederqvist, L.: FSW to manufacture and seal 5 cm Cu canisters for Sweden's nuclear waste. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

CHRISTNER 2007

Christner, B.: Welding the Eclipse 500. Aerospace & Defense Manufacturing 2007, S. 65-67.

COLLIGAN ET AL. 2001

Colligan, K.; McTernan, K.; Pickens, J. R.: FSW of thick Section Corner Joints in Aluminum Alloys. In: Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium. Kobe (Japan), 27.-28.9.2001.

COOK ET AL. 2004

Cook, G. E.; Crawford, R.; Clark, D. E.; Strauss, A. M.: Robotic Friction Stir Welding. Industrial Robot 31 (2004) 1, S. 55-63.

COVINGTON 2005

Covington, J. L.: BYU Bingham Young University: Determination of the Heat Input at the Tool/Workpiece Interface during Friction Stir Welding
<http://www.et.byu.edu/groups/fsw/pdf/process_determination_of_heat.pdf
> - Stand: 17.1.2008.

DILTHEY 2005

Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. 3. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3-540-21674-X.

DIN EN 10002-1

DIN EN 10002-1, Blatt 1: Metallische Werkstoffe - Zugversuch; Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth 2001.

DIN EN 14610

DIN EN 14610: Schweißen und verwandte Prozesse - Begriffe für Metallschweißprozesse. Berlin: Beuth 2005.

DIN EN 1706

DIN EN 1706: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Gussstücke - Chemische Zusammensetzung und mechanische Eigenschaften. Berlin: Beuth 1998.

DIN EN 2002-6

DIN EN 2002, Blatt 6 (Entwurf): Luft- und Raumfahrt - Metallische Werkstoffe - Prüfverfahren - Teil 6: Biegeversuch. Berlin: Beuth 2000.

DIN EN 573-3

DIN EN 573, Blatt 3: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 3: Chemische Zusammensetzung. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN 895

DIN EN 895: Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Querzugversuch. Berlin: Beuth 1999.

DIN EN 910

DIN EN 910: Zerstörende Prüfung von Schweißnähten an metallischen Werkstoffen - Biegeprüfungen. Berlin: Beuth 1996.

DIN EN ISO 6507-1

DIN EN ISO 6507-1, Blatt 1 (Entwurf): Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth 2004.

DIN EN ISO 6947

DIN EN ISO 6947: Schweißnähte, Arbeitspositionen - Definition der Winkel von Neigung und Drehung. Berlin: Beuth 1997.

DIN EN ISO 8373

DIN EN ISO 8373: Industrieroboter - Wörterbuch. Berlin: Beuth 1996.

DUBOURG & DACHEUX 2006

Dubourg, L.; Dacheux, P.: Design and properties of FSW tools: a literature review. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

DUBOURG ET AL. 2008

Dubourg, L.; Gholipur, J.; Jahazi, M.: Friction Stir Welding of 2024-T3 tubes for hydroforming application. Trends in Welding Research 2008 ASM conference. Pine Mountain (Georgia/USA), 1.-6.6.2008.

ECLIPSE 2004

Eclipse Aviation: Friction stir welding of cabin structures for N503EA begins
<<http://www.eclipseaviation.com/progress/monthview.htm?yearx=2004&month=05#245>> - Stand: 19.1.2005.

EIREINER 2004

Eireiner, D.: Friction stir welding using NC milling machines. *Welding & Cutting* 3 (2004) 4, S. 220-223.

EIREINER 2006

Eireiner, D.: Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding. Dissertation. Technische Universität München (2006). München: Utz 2006. ISBN: 3-8316-0650-1. (*iwb-Forschungsberichte* Band 201).

ESAB 2005

ESAB: ESAB SuperStir™ in Space
<<http://www.esabna.com/canada/documents/FSWallcharts.pdf>> - Stand: 19.1.2005.

FORD 2003

Ford Motor Company: Research an Advanced Engineering Technology Report / Materials & Manufacturing
<http://www.ford.com/NR/rdonlyres/ebcqunzqbvrxelxvegkevphdu35oj35vuabflufutuii466yy6tsvl6sqb4q5mrfuyv33dfolvhsh7rtryxknyrcyhf/innovation_reportC.pdf> - Stand: 2.1.2005.

FRATINI & PIACENTINI 2006

Fratini, L.; Piacentini, M.: Friction stir welding of 3D industrial parts: Joint strength analysis. In: ASME (Hrsg.): Proceedings of the 8th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. Turin/Italien, 4.-7.7.2006. 2006, S. 763-770. ISBN: 0-7918-4251-7.

FUJII ET AL. 2006A

Fujii, H.; Cui, L.; Maeda, M.; Nogi, K.: Effect of tool shape on mechanical properties and microstructure of friction stir welded aluminum alloys. *Materials Science and Engineering, Part A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)* 419 (2006) 1-2, S. 25-31.

FUJII ET AL. 2006B

Fujii, H.; Kato, H.; Nakata, K.; Nogi, K.: FSW of high temperature materials (Mo, Ti). In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

GEBHARD & ZAEH 2006

Gebhard, P.; Zaeh, M. F.: Empirical model for the tool shoulder temperature during FSW. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

GEBHARD & ZAEH 2008

Gebhard, P.; Zaeh, M. F.: Force control design for CNC milling machines for FSW. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Friction Stir Welding Symposium. Awaji Island (Japan), 20.-22.5.2008.

GEIGER ET AL. 2004

Geiger, M.; Merklein, M.; Giera, A.: Deep drawing of friction stir welded aluminium tailored blanks. In: IDDRG conference. 2004, S. 114-123. ISBN: 3-514-00708-X.

GEIGER ET AL. 2005A

Geiger, M.; Dörfler, S.; Otto, A.: Friction Stir Welding of aluminium foam sandwich. Production Engineering: Research and Development, Bd. XII., S. 55-58.

GEIGER ET AL. 2005B

Geiger, M.; Merklein, M.; Giera, A.; Staud, D.: Eigenschaften reibrührgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen. In: PZH Produktionstechnisches Zentrum Hannover (Hrsg.): Berichtskolloquium der DFG-Forscherguppe 505 Hochleistungsfügetechnik für Hybridstrukturen. Hannover, 22.11.2005. 2005, S. 30-39. ISBN: 3-936888-99-X.

GOTO ET AL. 2005

Goto, T.; Sato, H.; Tanaka, D.; Sakaguchi, H.; Yamada, T.; Hara, H.: Highly reliable tank structure of H-IIB launch vehicle. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review (online) 2005, 42 (2005) 5, S. 1-4.

GOTTSTEIN 2001

Gottstein, G.: Physikalische Grundlagen der Materialkunde. 2. Aufl. Berlin/Heidelberg: Springer 2001. ISBN: 3-450-41961-6.

GTC 2004

General Tool Company: Friction Stir Welding
<<http://frictionstirwelding.com/frictionstirwelding.html>> - Stand:
19.1.2005.

HEITZENROEDER 2000

Heitzenroeder, P. J.; Princeton Plasma Physics Laboratory: Development of a Cost-Effective Design for the Fusion Ignition Research Experiment
<http://www.pppl.gov/pub_report/2000/PPPL-3399.pdf> - Stand:
15.1.2008.

HIRANO ET AL. 2001

Hirano, S.; Okamoto, K.; Aota, K.; Okamura, H.; Aono, Y.; Odakura, T.:
Development of 3 dimensional type friction stir welding equipment. In:
Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium. Kobe (Japan), 27.-
28.9.2001.

HITACHI 2005

Hitachi Ltd.: Hitachi's Machine Lineup
<<http://www.hitachi.us/supportingdocs/researchAndDevelopment/fsw.pdf>>
- Stand: 13.2.2005.

IMWF STUTT GART & FT ILMENAU 2007

IMWF Stuttgart; FT Ilmenau: Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Prozessparameter auf Anlagen unterschiedlicher Bauart beim Herstellen von Tailored Blanks auf geschlossener Bahn mittels Rührreibschweißen. Forschungsvorhaben AiF-Nr. 14572 N / DVS-Nr. 05.034. Fachgebiet Fertigungstechnik, Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Ilmenau; Institut für Materialprüfung, Werkstoffkunde und Festigkeitslehre (IMWF) Universität Stuttgart 2007.

ISO 5173

ISO 5173: Schweißen - Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Biegeversuch. Berlin: Beuth 2000.

JATA & SEMIATIN 2000

Jata, K. V.; Semiatin, S. L.: Continuous dynamic recrystallization during Friction Stir Welding of high strength aluminum alloys. Scripta materialia 43 (2000) 8, S. 743-749.

JENE ET AL. 2006

Jene, T.; Dobmann, G.; Wagner, G.; Eifler, D.: Oxide fragments in friction stir welds - distribution and effects on crack initiation. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

JOHNSON 2003

Johnson, D. R.: Friction Stir Welding of Magnesium Alloys. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Friction Stir Welding Symposium. Park City (Utah/USA), 14.-16.5.2003.

JOHNSON ET AL. 2003

Johnson, D. R.; dos Santos, J.; Magnasco, M.: Mechanical Properties of Friction Stir Welded S355 C-Mn Steel Plates. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Friction Stir Welding Symposium. Park City (Utah/USA), 14.-16.5.2003.

JONES & LOFTUS 2006

Jones, R. E.; Loftus, Z.: Friction Stir Welding of 5mm Ti-6Al-4V. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

KALLEE ET AL. 2002

Kallee, S. W.; Nicholas, E. D.; Thomas, W. M.: Reibrührschweißen: Erfindung, Innovationen und Anwendungen. Reibrührschweißen (FSW) - Ein modernes Fügeverfahren, Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt (SLV) Berlin-Brandenburg. Berlin, 20.2.2002.

KALLEE ET AL. 2003

Kallee, S. W.; Nicholas, E. D.; Thomas, W. M.: Industrialisation of Friction Stir Welding for Aerospace Structures. 56th International Conference on Metallic Welded Structures. Bukarest/Rumänien, 6.-11.7.2003.

KALLEE 2005

Kallee, S. W.: Industrieller Einsatz des Reibrührschweißverfahrens im Verkehrswesen. In: AMAG Technologietage. Ranshofen (Österreich), 24.-25.10.2005.

KALLEE & WAYNE 2005

Kallee, S. W.; Wayne, Th. M.: Forschungsaktivitäten in der Verfahrens- und Werkzeugentwicklung. In: AMAG Technologietage. Ranshofen, Österreich, 24.-25.10.2005.

KAMMER 2002

Kammer, C.: Aluminium-Taschenbuch - Band 1: Grundlagen und Werkstoffe. 16. Aufl. Düsseldorf: Aluminium-Verlag 2002. ISBN: 3-87017-274-6.

KAMMER ET AL. 2003

Kammer, C. et al.: Aluminium-Taschenbuch - Band 3: Weiterverarbeitung und Anwendung. 16. Aufl. Düsseldorf: Aluminium-Verlag 2003. ISBN: 3-87017-275-4.

KARG 2006

Karg, R.: Bewertung des Messsystems zur Ermittlung der Prozesskräfte beim robotergestützten Rührreißschweißen mit Kraftsteuerung. Semesterarbeit: *iwb*, Technische Universität München 2006.

KIM ET AL. 2006

Kim, Y. G.; Fujii, H.; Tsumura, T.; Komazaki, T.; Nakata, K.: Three defect types in friction stir welding of aluminum die casting alloy. Materials Science and Engineering, Part A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing) 415 (2006) 1-2, S. 250-254.

KUKA 2002

Spezifikation: Roboter KR-500-2
<http://www.kuka.com/NR/rdonlyres/790AE8B4-F5EB-41E1-9B12-A88B18F8F612/0/spez_kr3602.pdf> - Stand: 16.6.2008.

LAFLY ET AL. 2006

Laflay, A. L.; Allehaux, D.; Marie, F.; Dalle-Donne, C.; Biallas, G.: Microstructure and mechanical properties of the aluminium alloy 6056 welded by friction stir welding techniques. Welding in the World 50 (2006) 11/12, S. 98-106.

LATHI 2003

Lathi, K. E.; ESAB: Wider Extrusions at Lower Cost by Friction Stir Welding <<http://www.esabcutting.com/products/machines/Friction-Stir-Welding%20Extrusions.cfm>> - Stand: 19.1.2005.

LIENERT 2003

Lienert, T. J.: Friction stir welding of DH-36 steel. In: Lienert, T. J. (Hrsg.): Joining of Advanced and Specialty Materials VI, Proceedings from Materials solutions 2003 on joining of advanced and specialty materials. Pittsburgh, (Pennsylvania/USA), 13.-15. Oktober 2003. Ohio: Material Park 2003, S. 28-34. ISBN: 0-87170-801-9.

LOHWASSER 2002

Lohwasser, D.: FSW im Flugzeugbau. Reibrührschweißen, 2. GKSS Workshop. Geesthacht, 22.-23.1.2002.

LONG ET AL. 2007

Long, T.; Tang, W.; Reynolds, A. P.: Process response parameter relationships in aluminium alloy friction stir welds. Science and Technology of Welding and Joining 12 (2007) 4, S. 311-317.

MACHINE DESIGN 2004

Machine Design: Car bodies first to be friction stir welded <<http://www.machinedesign.com/ASP/viewSelectedArticle.asp?strArticleId=56348&strSite=MDSite&catId=0>> - Stand: 3.1.2005.

MARIE ET AL. 2004

Marie, F.; Allehaux, D.; Esmiller, B.: Development of the Bobbin Tool technique on various aluminium alloys. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Friction Stir Welding Symposium. Metz (Frankreich), 14.-16.9.2004.

MATTAPELLI ET AL. 2007

Mattapelli, S.; Arbegast, W.; Winter, R.: Friction stir joining of thermoplastics. In: The Minerals, Metals and Materials Society (TMS) (Hrsg.): TMS Annual Meeting, 2007, Friction Stir Welding and Processing, Bd. 4. 2007, S. 223-232. ISBN: 978-0-87339-661-5.

MENDEZ & EAGAR 2002

Mendez, P. F.; Eagar, T. W.: New Trends in Welding in the Aeronautic Industry. Proceedings, Second Conference on New Trends for the Manufacturing in the Aeronautic Industry. Bilbao (Spanien), 19.-20.11.2002.

MERKLEIN ET AL. 2005

Merklein, M.; Giera, A.; Geiger, M.: Deep drawing of friction stir welded thin sheet Aluminum Steel tailored hybrids. Steel Research International 76 (2005) 2/3, S. 250-256.

METRIS 2008

Metris - Absolute calibration of industrial robots
<http://www.metris.com/products/optical__cmm/robot_calibration__testing/robotic_scanning/> - Stand: 8.11.2008.

MEYER & SCHILLING 2004

Meyer, A.; Schilling, C.: Friction Stir Welding Serial Production of Aluminium Drying-Trays for the Food Industry. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 5th International Friction Stir Welding Symposium. Metz (Frankreich), 14.-16.9.2004. ISBN: 1-903761-04-2.

MEYER & SCHILLING 2007

Meyer, A.; Schilling, C.; Maschinenmarkt: Tailored Blanks aus Aluminium werden mit dem Rührreischweißen gefertigt
<<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/themenkanale/produktion/verbindungsstechnik/articles/95210/>> - Stand: 25.01.2008.

MIDLING ET AL. 1999

Midling, O. T.; Kvale, J. S.; Dahl, O.: Industrialisation of the Friction Stir Welding Technology in panels production for the maritime sector. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 1st Friction Stir Welding Symposium. Thousand Oaks (Kalifornien/USA), 14.-16.6.1999.

MISHRA & MAHONEY 2007

Mishra, R. S.; Mahoney, M. W.: Friction Stir Welding and Processing. 1. Aufl. ASM International. 2007. ISBN: 087170840X.

MONSARRAT ET AL. 2004

Monsarrat, B.; Cote, G.; De Montigny, M.; Perron, C.: Robust Computer-Aided Measurement Planning and Calibration Protocols for Aerospace Manufacturing Robotics Applications. SAE Aerospace Manufacturing & Automated Fastening Conference & Exhibition. St. Louis (Missouri/USA).

MONSARRAT ET AL. 2007

Monsarrat, B.; Lavoie, E.; Cote, G.; De Montigny, M.; Corbeil, C.; Grenier, D.; Tu, X.; Perron, C.: High Performance Robotized Assembly System for Challenger 300 Business Jet Nose Fuse Panels. SAE Aerotech Congress & Exhibition. Los Angeles (Kalifornien/USA). (Präsentation).

NASA 2002

NASA: The Next Generation of Launch Vehicles
<http://www.space.com/business/technology/technology/atlas_delta_020320-2.html> - Stand: 17.1.2008.

NCAM 2004

NCAM - National Center for Advanced Manufacturing: Friction Stir Welding <<http://www.ncamlp.org/technology/FSW.htm>> - Stand: 19.1.2005.

NCEMT 2003

NCEMT - National Center for Excellence in Metallworking Technology: New ways of thinking to support new ways of fighting
<https://www.navy.mantech.com/news/ArchivedNews/NCEMT_2003AnnualReport.pdf>, S. 7. – Stand: 1.2.2005.

OKI ET AL. 2006

Oki, S.; Tsujikawa, M.; Okawa, Y.; Chung, S. W.; Higashi, K.: Tolerance of tool position and posture in FSW. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

OOSTERKAMP & HEURTAUX 2006

Oosterkamp, L. D.; Heurtaux, F.: New polymorph friction-stir-welded aluminium liquid petroleum gas tank. Journal of Automobile Engineering 220 (2006) 1, S. 27-35.

PALMETAL. 2003

Palm, F.; Steiger, H.; Henneboehle, U.: The origin of particle (oxide) traces in friction stir welds. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Friction Stir Welding Symposium. Park City (Utah/USA), 14.-16.5.2003.

PEPÉ ET AL. 2006

Pepé, N.; Vilaca, P.; Reis, L.; de Freitas, M.: Fatigue behavior of shipbuilding aluminium alloy welded by friction stir welding. 9th International Fatigue Congress. Atlanta (Georgia/USA), 14.-19.5.2006.

PEW 2008

Pew, J.; BYU Bingham Young University: Effects of Spindle Speed on Welding Forces
<http://www.et.byu.edu/groups/fsw/pdf/process_effects.pdf> - Stand: 21.1.2008.

PKM 2008

PKMTricept Homepage <<http://www.pkmtricept.com/>> - Stand: 8.4.2008.

PRDIN EN ISO 25239

E DIN EN ISO 25239, Blatt 1-5 (Entwurf): Rührreischweißen - Aluminium. Berlin: Beuth 2007.

POLAR ET AL. 2005

Polar, A.; Rumiche, M.; Indacochea, J. E.: Friction Stir Welding of Copper: Metallurgical Characterization and Corrosion Resistance. Proceedings of the 7th International Conference on Trends in Welding Research. Pine Mountain (Georgia/USA), 16.-20.5.2005, S. 431-436.

REEK 2000

Reek, A.: Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen. Dissertation, Technische Universität München. München: Utz 2000. ISBN: 3-89675-730-X. (*iwb* Forschungsberichte Band 138).

REYNOLDS 2008

Reynolds, A. P.: Flow visualization and simulation in FSW. Scripta Materialia 58 (2008) 5, S. 338-342.

RIFTEC 2008

RIFTEC - Anlagen <<http://www.riftec.de/leistungen/anlagen.html>> - Stand: 8.4.2008.

ROCKENSCHAUB ET AL. 2006

Rockenschaub, H.; Pabel, T.; Geier, G.; Holzer, H.; Hopfinger, M.: Neue Wärmebehandlung für beste mechanische Eigenschaften im Aluminium-Druckguss. Giesserei 93 (2006) 7, S. 20-33.

SAECHTLING ET AL. 2004

Saechtling, H.; Oberbach, K.; Baur, E.; Brinkmann, S.; Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 29. Aufl. München: Carl Hanser 2004. ISBN: 3-446-22670-2.

SAPA 2003

Sapa Group: Sales right on track
<http://www.sapa.se/pages/12834/Shape_1_01-20_ENG.pdf>, S.2 – Stand: 2.1.2005.

SAVOLAINEN ET AL. 2006A

Savolainen, K.; Mononen, J.; Hänninen, H.: State-of-the-Art of friction stir processing. Steel Research International 77 (2006) 5, S. 370-376.

SAVOLAINEN ET AL. 2006B

Savolainen, K.; Mononen, J. T.; Saukkonen, T.; Hänninen, H.: A preliminary study on FSW of dissimilar metal joints of Cu and Al. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

SCHILLING & STROMBECK 2005

Schilling, C.; von Strombeck, A.: Aluminium und Edelstahl vakuumdicht reibrührschweißen. Blech InForm. o Jg. (2005) 5, S. 47-49.

SCHUTZRECHT EP1415753

Schutzrecht EP1415753 Patent (27.10.2003). Murakami, K.; Mazda Motor. Pr.: JP2002313018 (28.10.2002). Friction agitation welding apparatus.

SCHUTZRECHT EP1437193

Schutzrecht EP1437193 Patent (17.10.2002). Nagao, Y.; Kawasaki Heavy Industries Ltd. Pr.: JP2001319479 (17.10.2001). Frictional agitating connection device and robot with the device.

SCHUTZRECHT EP1690628

Schutzrecht EP1690628 Patent (16.8.2006). Schilling, Ch.; dos Santos, J.; GKSS Forschungszentrum Geesthacht GmbH. Pr.: DE19955737 (18.11.1999). Verfahren und Vorrichtung zum Verbinden von wenigstens zwei aneinanderliegenden Werkstücken nach der Methode des Reibschweißens.

SCHUTZRECHT US6758382

Schutzrecht US 6758382 Patent (6.7.2004). Carter, R.; NASA - National Aeronautics and Space Administration. Auto-adjustable tool for self-reacting and conventional friction stir welding.

SCHUTZRECHT WO0002699

Schutzrecht WO 0002699 Patent (8.7.1999). Campbell, C. L.; Fullen, M. S.; Skinner, M. J.; MTS System Corp. Pr.: US60092332 (9.7.1998). Welding head.

SCHUTZRECHT WO9310935

Schutzrecht WO 9310935 Patent (27.11.1992). Thomas, W. M.; TWI Ltd. Pr.: GB19910025978 (6.12.1991). Improvements relating to Friction Welding.

SCHUTZRECHT WO9526254

Schutzrecht WO 9526254 Patent (5.1.1995). Midling, O. T.; Morley, E. J.; Sandvik, A.; Norsk Hydro. Pr.: NO941144 (28.3.1994). Friction Stir Welding.

SHEIKHI & DOS SANTOS 2006

Sheikhi, S.; dos Santos, J. F.: Robotergestütztes Rührreibschweißen. Bearbeiten mit Industrierobotern, Technologien - Anwendungen - Trends, Bd. 131. Stuttgart, 21.7.2006, S. 16-23.

SHINODA ET AL. 2001

Shinoda, T.; Tokisue, H.; Enomoto, M.; Hori, H.; Koga, S.; Kumagai, M.; Matsumoto, K.; Okamura, H.; Tsuchiya, K.: Recent Trends of Research and Development of FSW Technology in Japan. In: Proceedings of the 3rd Friction Stir Welding Symposium. Kobe (Japan), 27.-28.9.2001.

SHINODA 2003

Shinoda, T.: Recent topics of FSW technology in Japan. Welding in the world 47 (2003) 11-12, S. 18-23.

SKILLINGBERG 2007

Skillingberg, M.: Aluminum applications in the rail industry. Light metal age 65 (2007) 5, S. 8-12.

SMITH 2000

Smith, C. B.: Robotic Friction Stir Welding using a Standard Industrial Robot. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Friction Stir Welding Symposium. Gothenburg (Schweden), 26.-28.6.2000.

SMITH ET AL. 2003A

Smith, C. B.; Hinrichs, J. F.; Crusan, W. A.: Robotic Friction Stir Welding: The State of the Art. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 4th International Friction Stir Welding Symposium. Park City (Utah/USA), 14.-16.5.2003.

SMITH ET AL. 2003B

Smith, C.B.; Hinrichs, J.F.; Crusan, W.A.; Leverett, J. SME Society of Manufacturing Engineers: FSW Stirs Up Welding Process Competition
<<http://www.sme.org/cgi-bin/get-mag.pl?&03fef001&000007&2003/03fef001&ARTFF&SME&>> - Stand: 2.1.2005.

SMITH & HINRICHS 2006

Smith, C. B.; Hinrichs, J.: Deeper FSW penetration expands use of robotic FSW and processing. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

SORON 2007

Soron, M.: Robot System for Flexible 3D Friction Stir Welding. Dissertation. Örebro University (2007). Intellecta DocuSys 2007. ISBN: 978-91-7668-563-2.

SORON & KALAYKOV 2006

Soron, M.; Kalaykov, I.: A Robot Prototype for Friction Stir Welding. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics, Automation and Mechatronics. Bangkok (Thailand), 7.-9.6.2006.

STAHL 2005

Stahl, A.; BYU Bingham Young University: Experimental Measurements of Load Distributions on Friction Stir Weld Pin Tools
<http://www.et.byu.edu/groups/fsw/pdf/process_experimental_measurements.pdf> - Stand: 7.1.2005.

STROMBECK ET AL. 2000

von Strombeck, A.; Schilling, C.; dos Santos, J. F.: Robotic Friction Stir Welding - Tool Technology and Applications. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 2nd International Friction Stir Welding Symposium. Gothenburg (Schweden), 26.-28.6.2000.

STROMBECK 2007

von Strombeck, A.: Durch Rührreibschweißen hergestellte Tailored Blanks aus Aluminium für den Sportwagen "Audi R8". Der Praktiker 59 (2007) 7-8, S. 238-241.

SYKATEK 2004

Sykatec: Kühlkörperbearbeitung
<<http://www.sykatec.de/de/leistungen/kuehlkoerper.htm>> - Stand: 3.1.2005.

TWEEDY ET AL. 2006

Tweedy, B.; Sellmeyer, S.; Jahn, A.; Burford, D.: Static strength comparison of riveted versus friction stir welded stiffened panels. In: 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Bd. 11. Newport (Rhode Island/USA), 1.-4.5.2006. 2006, S. 7959-7973. ISBN: 1-56347-808-0.

TWI 2008

TWI Ltd.: Friction Stir Welding at TWI Yorkshire
<http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/twi_yorks_fsw.html> - Stand: 31.3.2008.

TWI 2009

TWI Ltd.: Known friction stir welding patents and patent applications
<http://www.twi.co.uk/j32k/unprotected/band_1/fswpatents.html> - Stand: 30.4.2009.

VAIDYA ET AL. 2006

Vaidya, W.-V.; Horstmann, M.; Seib, E.; Toksoy, K.; Kocak, M.: Assessment of fracture and fatigue crack propagation of laser beam and friction stir welded aluminium and magnesium alloys. Advanced Engineering Materials 8 (2006) 5, S. 399-405.

VAN HAVER ET AL. 2006

van Haver, W.; Stassart, X.; Verwimp, J.; de Meester, B.; Dhooge, A.: Friction Stir Welding and Hybrid Laser Welding applied to 6056 alloy. Welding in the World 50 (2006) 11/12, S. 65-77.

VDI RICHTLINIE 2860

VDI Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth 1990.

VOELLNER ET AL. 2006

Voellner, G.; Zaeh, M. F.; Kellenberger, O.; Lohwasser, D.; Silvanus, J.: 3D FSW using a modified high payload robot. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

VOELLNER ET AL. 2007

Voellner, G.; Zaeh, M. F.; Silvanus, J.; Kellenberger, O.: Potential of robotic friction stir welding using the example of aeronautics. *Welding & Cutting* 6 (2007) 6, S. 348-351.

WEIGOLD 2008

Weigold, M.: Kompensation der Werkzeugabdrängung bei der spanenden Bearbeitung mit Industrierobotern. Dissertation. Technische Universität Darmstadt (2008). Aachen: Shaker 2008. ISBN: 978-3-8322-7178-7.

WIDENER ET AL. 2006A

Widener, C.; Tweedy, B.; Burford, D.: Effect of fit-up tolerances on the strength of friction stir welds. In: 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Bd. 11. Newport (Rhode Island/USA), 1.-4.5.2006. 2006, S. 7756-7764. ISBN: 1-56347-808-0.

WIDENER ET AL. 2006B

Widener, C.; Talia, J. E.; Tweedy, B.; Burford, D.: High-rotational speed FSW with a fixed shoulder. In: TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Friction Stir Welding Symposium. Saint-Sauveur (Kanada), 10.-13.10.2006. ISBN: 1-903761-05-0.

WILDEN ET AL. 2006

Wilden, J.; Bergmann, J. P.; Luhn, T.: Potenzial des Rührreibschweißens zum Fügen von Thermoplasten. Thüringer Werkstofftag 2006 "Polymere in Thüringen". S. 136-141.

WILDEN ET AL. 2007

Wilden, J.; Bergmann, J. P.; Luhn, T.: Rührreibschweißen von dünnen Aluminium- und Stahlblechen. In: DVS (Hrsg.): Große Schweißtechnische Tagung 2007, Bd. 244. Düsseldorf: DVS-Verlag 2007, S. 133-138.

WULFSBERG ET AL. 2004A

Wulfsberg, J.; Loitz, H.; dos Santos, J. F.: Robotergestuetztes Reibrührschweißen. In: VDI (Hrsg.): ROBOTIK 2004, Leistungsstand - Anwendungen - Visionen - Trends, VDI/VDE-Gesellschaft Mess- u. Automatisierungstechnik. München, 17.-18. Juni 2004. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004, S. 3-10. ISBN: 3-18-091841-1.

WULFSBERG ET AL. 2004B

Wulfsberg, J.; Loitz, H.; dos Santos, J. F.: Roboterreibrührschweißen. Roboterbasierte Anlagentechnik zum Fügen durch Reibrührschweißen. wt Werkstattstechnik online o. Jg. (2004) 9, S. 462-466.

YAN ET AL. 2007

Yan, J. H.; Sutton, M. A.; Reynolds, A. P.: Processing and banding in AA2524 and AA2024 friction stir welding. Science and Technology of Welding & Joining 12 (2007) 5, S. 390-412.

ZHAO ET AL. 2007

Zhao, X.; Kalya, P.; Landers, R. G.; Krishnamurthy, K.: Design and implementation of a nonlinear Axial Force Controller for Friction Stir Welding processes. Proceedings of the 2007 American Control Conference. New York City (Pennsylvania/USA), 11.-13.7.2007.

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Universal Welding System (UWS) zur Fertigung von Tankdomen (NCAM 2004)	3
Abbildung 2: Portalkinematik zur Fertigung der Rumpfstruktur des Flugzeuges Eclipse 500 (ECLIPSE 2004)	4
Abbildung 3: Links: Fertigung des Ford GT Mitteltunnels; rechts: Endprodukt (KALLEE 2005)	5
Abbildung 4: FSW-Werkzeug	9
Abbildung 5: Prozessablauf beim Rührreibschweißen	11
Abbildung 6: Zonen einer Rührreibschweißnaht im Querschnitt	14
Abbildung 7: Zugprüfung einer Schweißnaht (Querzugversuch)	18
Abbildung 8: Biegeprüfung nach DIN EN 910	19
Abbildung 9: Mögliche Merkmale und Fehler bei FSW-Nähten	22
Abbildung 10: Bezeichnung der Vickershärte HV	23
Abbildung 11: Schematischer Aufbau eines Industrieroboters und Weltkoordinatensystem, welches sich im Grundgestell des Roboters befindet	25
Abbildung 12: Überschleifbewegungen zwischen zwei Fahrbefehlen	27
Abbildung 13: Klassifizierung von FSW-fähigen Anlagen	30
Abbildung 14: Anlage zum Rührreibschweißen von Behältern für Nuklearabfall (CEDERQVIST 2006)	31
Abbildung 15: FSW-Versuchsanlage am TWI (KALLEE & WAYNE 2005)	32
Abbildung 16: Bobbin Tool mit gegenläufig rotierenden Schultern	38
Abbildung 17: Links: Robotergestütztes Rührreib-Punktschweißen; rechts: geschweißtes Bauteil (KALLEE & WAYNE 2005)	39
Abbildung 18: Versuchsanlage zum Herstellen Rührreibschweißverbindungen mit dem Roboter	46

Abbildung 19: Maximale statische Belastungen des Roboters in der xz-Ebene; links: Orientierung des Flansches senkrecht nach unten; rechts: Orientierung des Flansches horizontal nach -y im Weltkoordinatensystem des Roboters; Belastbarkeiten in kN	47
Abbildung 20: Verwendete FSW-Werkzeuge	50
Abbildung 21: Eingesetzte Schweißanlagen: oben links: ESAB SuperStir™; oben rechts: Heller CNC-Bearbeitungszentrum MCH-250; unten links: KUKA KR500-MT in PA-Position; unten rechts: KUKA KR500-MT in PC-Position	53
Abbildung 22: Entnahmeplan zur Bewertung der geschweißten Proben	58
Abbildung 23: Messungen der Prozesskräfte am Beispiel der Schweißung von 6 mm dickem AW-5083 mit dem Roboter in PC-Lage (ungefiltert)	59
Abbildung 24: Amplituden der Kräfte F_z	61
Abbildung 25: FFT-Analyse der Kraftaufzeichnungen eines Versuches, bei dem mit dem Roboter in PC-Lage 4 mm dickes AW-5083 geschweißt wurde	62
Abbildung 26: Nahtoberseiten geschweißter 6 mm dicker AW-5083-Proben; bei der in PA geschweißten Probe (links) ist ein Abschnitt vom Nahtanfang und -ende zu sehen; die Nahtoberfläche der mit der CNC-Anlage geschweißten Probe weist auf eine zu hohe Werkzeugeintauchtiefe hin.	63
Abbildung 27: Gleichwertige Nahtoberseiten bei allen geschweißten 8 mm dicken AW-6060-Proben	64
Abbildung 28: Nahtoberseiten geschweißter Gussproben	64
Abbildung 29: Endlöcher geschweißter 6 mm dicker AW-5083-Proben	65
Abbildung 30: Positiv drehend angetragene Momente in Drehrichtung der Gelenke des Roboters, die aus den Prozesskräften F_x , F_y und F_z in den Schweißlagen PA (links) und PC (rechts) resultieren	66

Abbildung 31: Makroschliffe vom Nugget geschweißter 6 mm dicker AW-5083-Proben	69
Abbildung 32: Makroschliffe geschweißter 4 mm dicker AW-6060-Proben mit sichtbaren flaws	70
Abbildung 33: Makroschliffe geschweißter 4 mm dicker AC-46000-Proben; Fehlstellen in der Schweißzone und im Grundwerkstoff durch Pfeile markiert	70
Abbildung 34: Zugfestigkeiten der geschweißten AW-5083-Werkstoffe im Vergleich zum Grundwerkstoff	72
Abbildung 35: Zugfestigkeiten der geschweißten AW-6060-Werkstoffe im Vergleich zum Grundwerkstoff; bei der Dicke von 8 mm konnten teilweise keine gültigen Werte ermittelt werden (s. S. 73).	74
Abbildung 36: Zugfestigkeiten der geprüften AC-46000-Proben (je sechs gezogene Proben) im Vergleich zum Grundwerkstoff (drei Proben)	75
Abbildung 37: Härteverläufe geschweißter 6 mm dicker AW-5083-Proben	76
Abbildung 38: Härteverläufe geschweißter 4 mm dicker AW-6060-Proben	77
Abbildung 39: Roboter-Rührreibschweißanlage mit elektrischer Spindel sowie Reflektoren und Markern	80
Abbildung 40: Schwingungen, gemessen am werkzeugnächsten Reflektor, beim Eintauchen mit einer Werkzeugdrehzahl von 400 min^{-1} (oben) sowie dazugehörige Prozesskräfte (unten); die Positionen wurden dabei auf den Werkzeugpin relativ zum Werkstück umgerechnet; Die Phasen I bis II entsprechen den programmierten Roboterbewegungen	83
Abbildung 41: Verlauf des Werkzeuganstellwinkels beim Schweißen vom Roboter weg (links) und zum Roboter hin (rechts); gut erkennbar sind die Veränderungen während des Eintauchens (Phase I), gefolgt von einem stabilen Endwert während des Schweißens (Phase III); die Kräfte und Drehmomente am Roboter sind jeweils in Wirkrichtung angetragen.	86

Abbildung 42: Gleiche Nahtcharakteristika hinsichtlich der Porosität im Vergleich der Anlagen; Prozessparameter siehe Tabelle 3; geringere Drehzahlen erzeugten fehlerfreie Schweißnähte; Schliffe poliert, ungeätzt	88
Abbildung 43: Zugfestigkeiten der geschweißten AW-2024-T3-Proben; sechs Proben je Parametersatz und Schweißanlage	89
Abbildung 44: Versuchskontur zum Schweißen stark gekrümmter Oberflächen	98
Abbildung 45: Oben: Rührreibschweißen in der Ebene; unten: theoretischer Kontakt ("Abdruck") des Werkzeuges auf dem Werkstück	99
Abbildung 46: Oben: Rührreibsschweißen auf zunehmend kleinen (Oberflächen-) Radien; unten sind jeweils die Kontaktflächen des Werkzeuges auf den Fügepartnern abgebildet.	100
Abbildung 47: Theoretische Aufrisse der Nahtquerschnitte bei steigenden Werkstückkrümmungen	101
Abbildung 48: Transport der Reibwärme von der Kontaktfläche in das Werkstück; links: ebenes Wersktück; rechts: gekrümmtes Werkstück	102
Abbildung 49: Probleme, die beim Rührreibschweißen über gekrümmte Flächen entstehen können	105
Abbildung 50: Veränderung der Werkzeugkontaktfläche (Draufsicht) bei Erhöhung des Werkzeuganstellwinkels; Schulterdurchmesser des Werkzeuges: 13 mm; Außenradius der gekrümmten Fläche: 14,5 mm	107
Abbildung 51: Geometrie zur Berechnung des Anstellwinkels, der für einen ausreichenden Kontakt der Schulter auf dem Werkstück notwendig ist	108
Abbildung 52: Notwendiger Anstellwinkel α in Abhängigkeit des Werkzeugschulterradius r_s für ausgewählte Werkstückradien	109
Abbildung 53: Für einen vollständigen Schulterkontakt notwendige reale Eintauchtiefe h in Abhängigkeit des Radius der	

Werkzeugschulter; die programmierte Eintauchtiefe h' beträgt konstant 0,1 mm.	110
Abbildung 54: Erhöhung des Anstellwinkels durch Verzögerung der Radiusbewegung; die verschobene Bahn ist gestrichelt dargestellt.	111
Abbildung 55: Werkzeugabdrücke mit Querschnittsprofil auf einer Oberfläche mit $r_a = 14,5$ mm; links: flache Schulter, Eintauchtiefe 0,5 mm; Mitte: Schulter mit Riefen, Eintauchtiefe 0,5 mm; rechts: Schulter mit Riefen, Eintauchtiefe 0,1 mm	112
Abbildung 56: Nahtwölbung (Welligkeit) in Abhängigkeit des Werkzeuganstellwinkels bei unterschiedlichen Schultergeometrien; Werte aus dem CAD-Modell	114
Abbildung 57: Verzögerung der Umschwenkbewegung durch den Wert V ; die gestrichelte Linie beschreibt die programmierte Schweißbahn.	116
Abbildung 58: Resultierender realer Anstellwinkel des Werkzeuges bei verschiedenen Verzögerungen V der Schweißbahn	117
Abbildung 59: Zustellbewegungen der Kraftregelung bei verschiedenen Verzögerungen der Schweißbahn	118
Abbildung 60: Relative Geschwindigkeit des TCP auf der Originalkontur bei verschiedenen Verzögerungen der Schweißbahn	119
Abbildung 61: Sich einstellende Anstellwinkel des Werkzeuges an charakteristischen Punkten auf dem Radius ($r_a = 14,5$ mm) in Abhängigkeit der Richtung, in der die Schweißbahn gegenüber der realen Kontur verschoben ist	121
Abbildung 62: Realer Werkzeuganstellwinkel bei einer horizontalen Verschiebung der Schweißbahn um 2 mm gegenüber einer Kontur mit dem Außenradius $r_a = 14,5$ mm	123
Abbildung 63: Veränderung des programmierten Radius gegenüber der realen Kontur in Kombination mit einer horizontalen Verschiebung der Schweißbahn	124

Abbildung 64: Erhöhung der relativen TCP-Geschwindigkeit bei unterschiedlich vorgegebenen Radien r_{prog}	125
Abbildung 65: Spannvorrichtung zur Untersuchung des Rührreibschweißens an gekrümmten Oberflächen; das Bild zeigt den Aufbau mit einem Radius der Vorrichtung von 50 mm.	129
Abbildung 66: Bestimmung des Werkzeuganstellwinkels gegen die reale Kontur bei Probefahrten ohne Prozesskraft über den Versuchsradius $r_a = 14,5$ mm	132
Abbildung 67: Nahtober- und Wurzelseiten (Radiusbereich) bei theoretisch exakter Bahnführung des Werkzeuges durch den Roboter; geschweißt wurde jeweils von links nach rechts; geschweißter Werkstoff: AW-5083	136
Abbildung 68: Mit Verzögerung geschweißte Bleche der Legierung AW-5083 in unterschiedlichen Radien	137
Abbildung 69: Berechnete Anstellwinkel des Werkzeuges bei einer Verzögerung der Einschwenkbewegung von 5,5 mm; angenommene Abdrängung aus $C_{\text{tang}} = 600$ N/mm und $F_x = 976$ N; Messungen aus dem realen Versuch; Versuchsmaterial: AW-5083	138
Abbildung 70: Querschliffe aus dem Radiusbereich von Versuchsblechen, die mit den Prozessparametern aus Abbildung 68 geschweißt wurden	140
Abbildung 71: Vergleich der Nahtoberseiten einer verzögerten (links) und einer horizontal verschobenen (rechts) Schweißbahn; Werkstoff: AW-6082	142
Abbildung 72: Theoretischer Verlauf des Anstellwinkels bei einer horizontalen Verschiebung von $V_x = 5$ mm und einem programmierten Radius von $r_{\text{prog}} = 10,5$ mm beim Schweißen des Radius $r_a = 14,5$ mm; angenommene Abdrängung aus $C_{\text{tang}} = 600$ N/mm und $F_x = 976$ N; Vergleich mit Messergebnissen	143

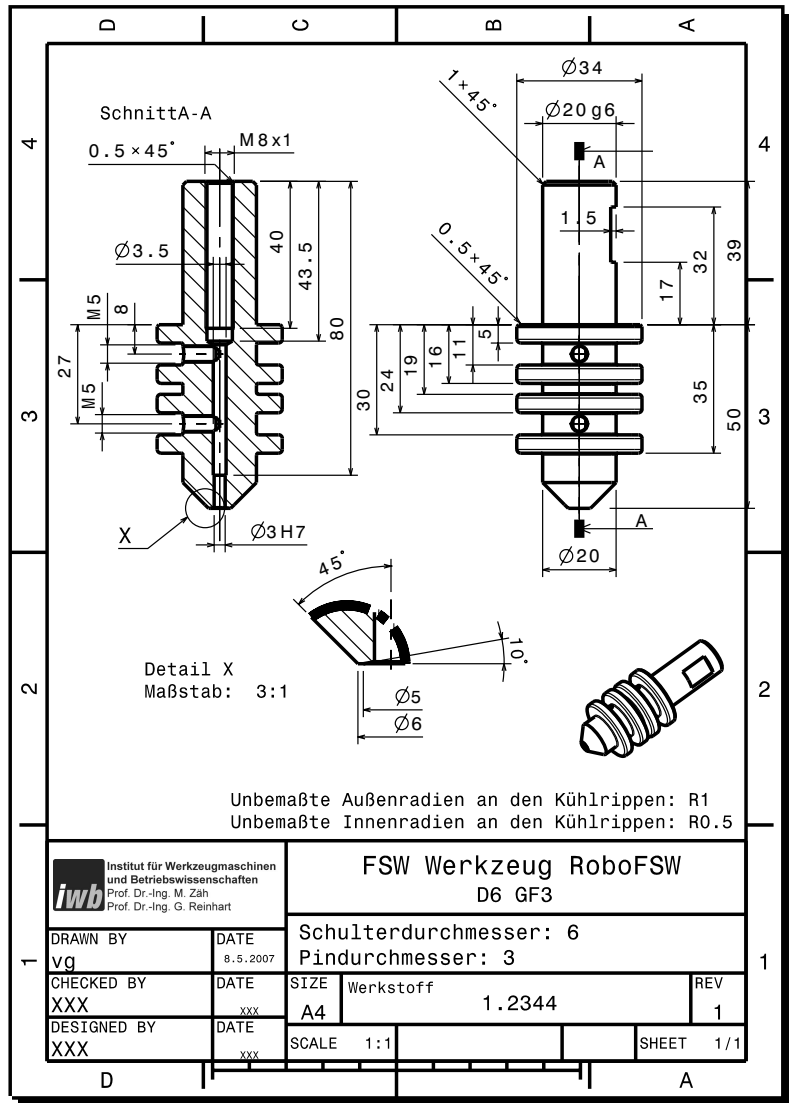
Abbildung 73: Nahtfehler aufgrund zu geringer Wärmeeinbringung über dem Radius; Material: AW-6083; $r_a = 14,5 \text{ mm}$; $r_{\text{prog}} = 10,5 \text{ mm}$; $V_x = 4 \text{ mm}$; Schweißparameter siehe Tabelle 4	144
Abbildung 74: Querschliffe von Schweißnähten über den Versuchsradius $r_a = 14,5 \text{ mm}$, die mit ebener Werkzeugschulter geschweißt wurden; Werkstoffe: links AW-5083, rechts AW-6082	145
Abbildung 75: Stoßgeometrie mit Unterstützung	149

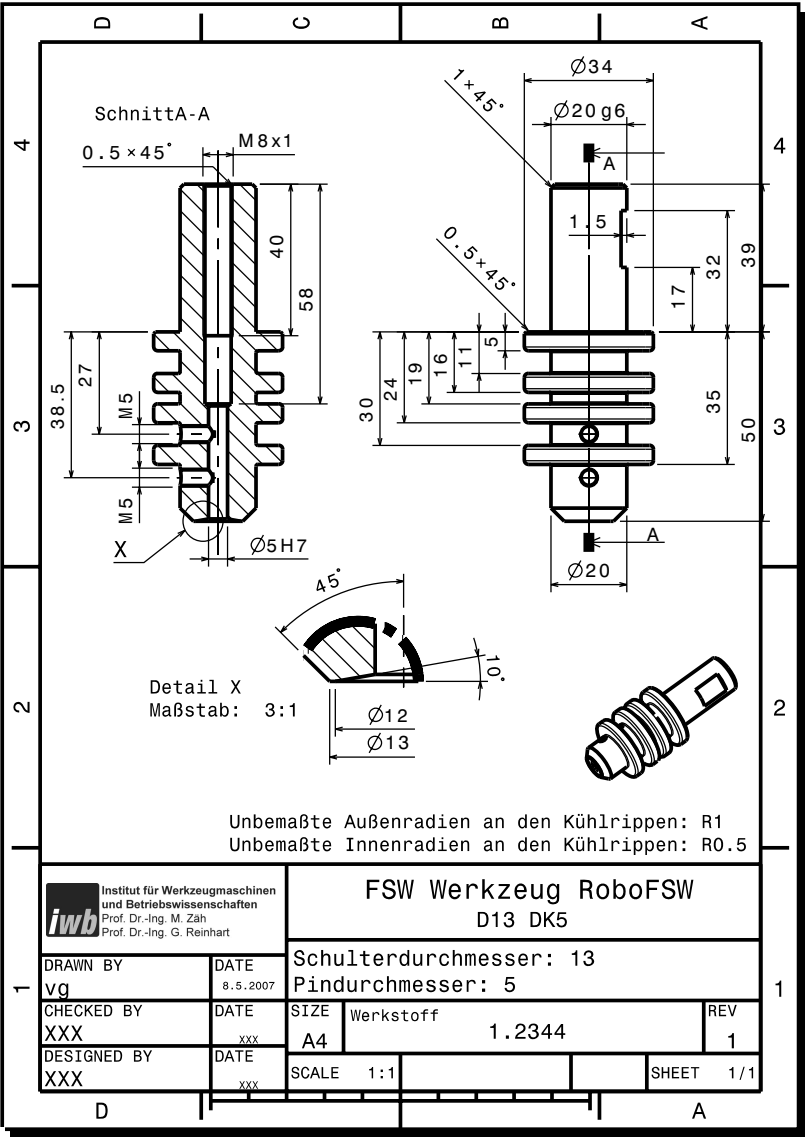
10 Tabellenverzeichnis

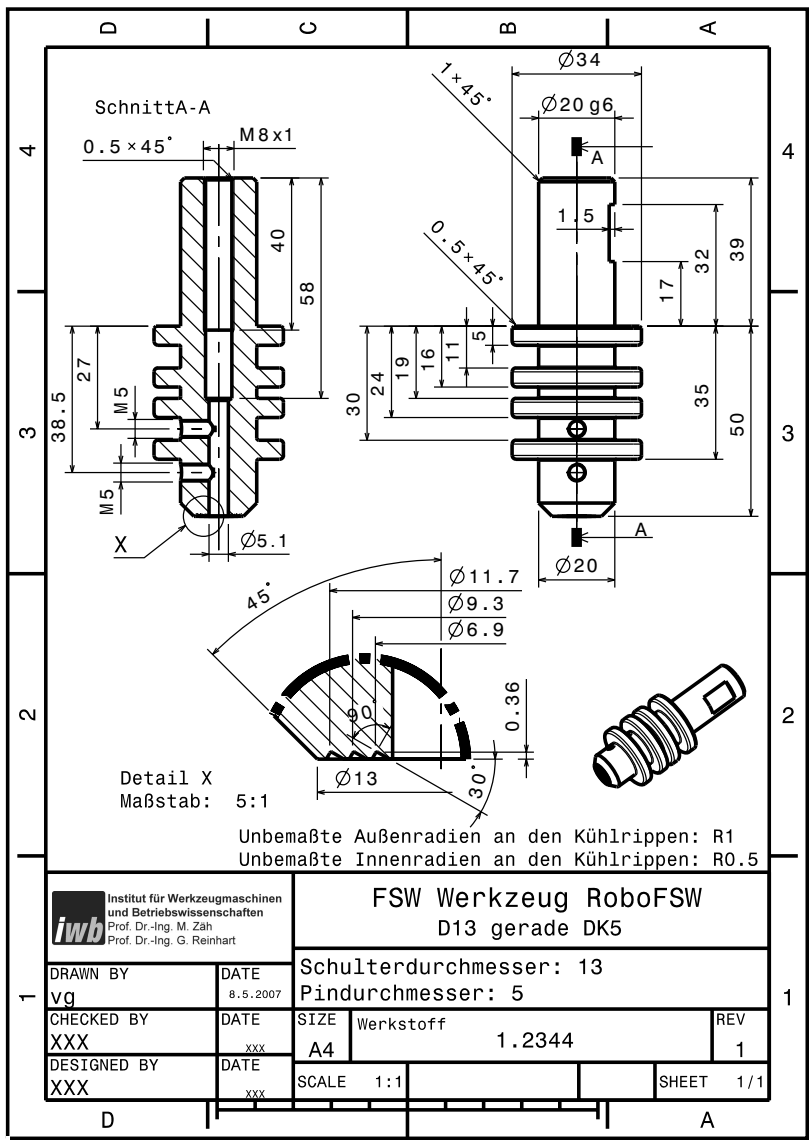
Tabelle 1:	Startpositionen der Roboterschweißnähte sowie zum Vergleich die jeweils maximale Ausladung in x-Richtung	52
Tabelle 2:	Prozessparameter, die für die Schweißversuche verwendet wurden	56
Tabelle 3:	Prozessparameter zum Fügen der AW-2024-T3-Legierung	79
Tabelle 4:	Prozessparameter zum Verschweißen der untersuchten Legierungen	133
Tabelle 5:	Mittlere Prozesskräfte beim Schweißen des Blechmaterials	134
Tabelle 6:	Steifigkeiten des Roboters in unterschiedlichen Orientierungen	134
Tabelle 7:	Mittlere Zugfestigkeiten geschweißter ebener Bleche im Vergleich zum Grundwerkstoff; je Wert mindestens zwei Proben	135
Tabelle 8:	Zugfestigkeiten von Radien, die nur mit einer verzögerten Umschwenkbewegung geschweißt wurden	140

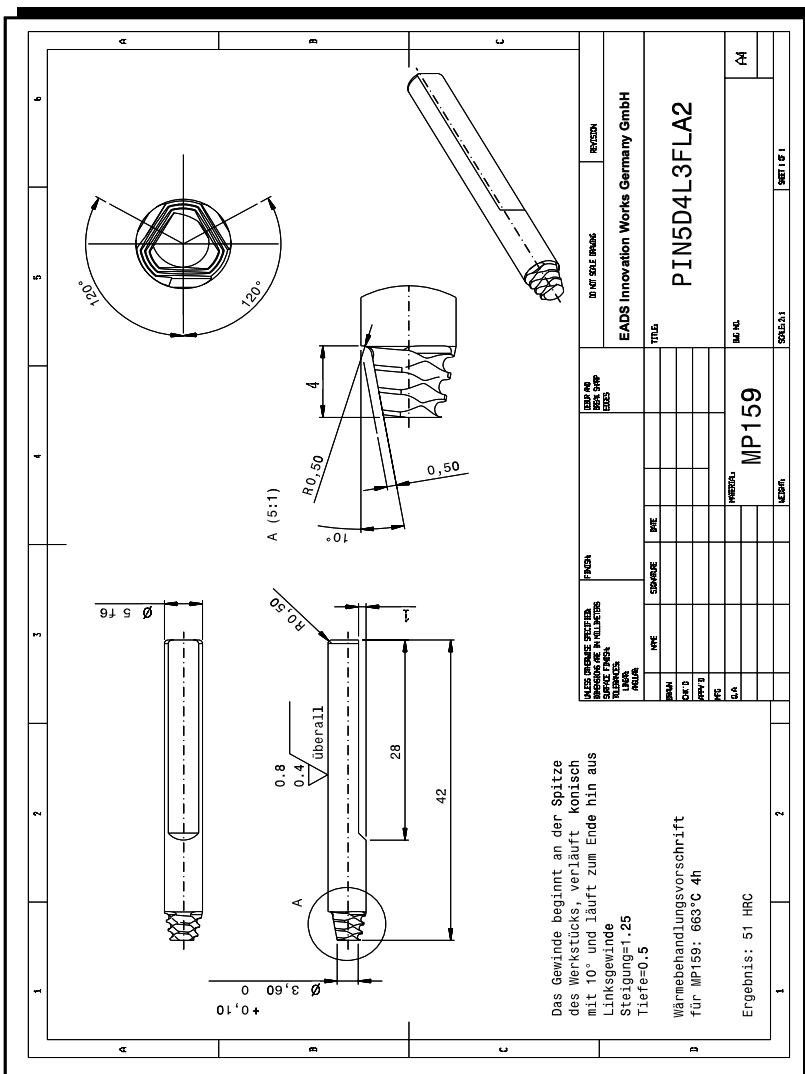
Anhang

A1 Werkzeugzeichnungen









A2 Legierungszusammensetzungen der geschweißten Werkstoffe

Sämtliche Werte sind in Gewichtsprozent angegeben. Die Knetlegierungen orientieren sich an DIN EN 573-3, die Gusslegierung nach DIN EN 1706.

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Andere	Rest
AW-2024	0,50	0,50	3,80 — 4,90	0,30 — 0,90	1,20 — 1,80	0,10	0,25	0,15	Max. 0,15	Al
AW-5083	0,40	0,40	0,10	0,40 — 1,00	4,00 — 4,90	0,05 — 0,25	0,25	0,15	—	Al
AW-6060	0,30 — 0,60	0,10 — 0,30	0,10	0,10	0,35 — 0,60	0,05	0,15	0,10	—	Al
AW-6082	0,70 — 1,30	0,50	0,10	0,40 — 1,00	0,60 — 1,20	0,25	0,20	0,10	Max. 0,15	Al
AC-46000	8,00 — 11,0	0,80	2,00 — 3,50	0,10 — 0,50	0,10 — 0,50	—	1,20	0,15	Pb 0,10 Sn 0,10 Ni 0,30	Al

A3 Ergebnisse der Kraftmessungen


Roboter in PA	Fx				Fy				Fz			
	Min	Mittel	Max	Amplitude	Min	Mittel	Max	Amplitude	Min	Mittel	Max	Amplitude
5-1	168 N	255 N	350 N	55 N	-120 N	91 N	276 N	152 N	2.486 N	2.861 N	3.123 N	210 N
5-4	1.251 N	1.590 N	1.966 N	240 N	-387 N	352 N	1.238 N	711 N	6.646 N	7.536 N	8.259 N	544 N
5-6	1.813 N	2.686 N	3.427 N	618 N	-227 N	1.063 N	1.795 N	557 N	5.326 N	7.518 N	9.907 N	1.659 N
6-2	-29 N	159 N	308 N	45 N	-20 N	159 N	472 N	145 N	2.972 N	3.319 N	3.755 N	293 N
6-4	243 N	539 N	759 N	113 N	-125 N	338 N	776 N	372 N	3.743 N	4.270 N	4.743 N	339 N
6-6	615 N	970 N	1.323 N	311 N	131 N	450 N	804 N	282 N	4.040 N	4.729 N	5.470 N	558 N
6-8	819 N	1.035 N	1.247 N	145 N	132 N	457 N	700 N	243 N	3.668 N	4.766 N	5.593 N	787 N
G-4	749 N	998 N	1.436 N	142 N	-352 N	785 N	1.940 N	769 N	3.219 N	4.274 N	5.484 N	847 N

Roboter in PC	Fx				Fy				Fz			
	Min	Mittel	Max	Amplitude	Min	Mittel	Max	Amplitude	Min	Mittel	Max	Amplitude
5-1	89 N	288 N	512 N	164 N	-33 N	104 N	202 N	68 N	2.577 N	2.866 N	3.201 N	211 N
5-4	751 N	1.572 N	2.431 N	653 N	-124 N	395 N	882 N	443 N	5.595 N	7.572 N	9.218 N	1.547 N
5-6	2.216 N	2.534 N	2.841 N	194 N	378 N	822 N	1.333 N	336 N	6.994 N	7.606 N	8.225 N	407 N
6-2	-37 N	240 N	458 N	159 N	-125 N	49 N	239 N	127 N	2.749 N	3.325 N	3.791 N	410 N
6-4	160 N	458 N	685 N	181 N	54 N	285 N	535 N	172 N	3.568 N	4.257 N	4.926 N	560 N
6-6	785 N	980 N	1.141 N	91 N	255 N	400 N	617 N	125 N	4.467 N	4.716 N	5.003 N	145 N
6-8	964 N	1.222 N	1.466 N	137 N	370 N	617 N	976 N	250 N	4.280 N	4.665 N	4.978 N	261 N
G-4	526 N	930 N	1.393 N	155 N	152 N	560 N	879 N	150 N	3.685 N	4.225 N	4.811 N	419 N


 1. Ziffer/Buchstabe: Legierungsbezeichnung: 5 = AW-5083-H111, 6 = AW-6060-T66, G = AC-46000
 2. Ziffer: Dicke der Schweißprobe in mm

FSW-Anlage	Fx			Fy			Fz		
	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max
5-1	1 N	296 N	607 N	239 N	-353 N	-38 N	268 N	2.762 N	3.365 N
5-4	1.131 N	1.544 N	1.935 N	256 N	-98 N	350 N	328 N	6.904 N	7.577 N
5-6	2.204 N	2.532 N	2.909 N	225 N	330 N	854 N	330 N	6.918 N	7.626 N
6-2	-84 N	225 N	557 N	199 N	-243 N	41 N	175 N	2.672 N	3.360 N
6-4	132 N	532 N	939 N	340 N	-172 N	256 N	343 N	3.964 N	4.417 N
6-6	339 N	884 N	1.218 N	269 N	-85 N	423 N	333 N	4.180 N	4.833 N
6-8	510 N	1.029 N	1.423 N	276 N	-23 N	401 N	358 N	4.286 N	4.883 N
G-4	249 N	837 N	1.473 N	315 N	8 N	551 N	371 N	3.156 N	3.840 N

CNC-Anlage	Fx			Fy			Fz		
	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max	Min	Mittel	Max
5-1							3.427 N	3.651 N	3.862 N
5-4							5.951 N	7.461 N	8.071 N
5-6							9.094 N	9.882 N	10.656 N
6-2							3.831 N	4.195 N	4.413 N
6-4							5.271 N	5.673 N	5.920 N
6-6							4.101 N	4.774 N	5.124 N
6-8							4.763 N	5.418 N	5.853 N
G-4							4.775 N	5.742 N	6.447 N


 Legende:

1. Ziffer/Buchstabe: Legierungsbezeichnung: 5 = AW-5083-H111, 6 = AW-6060-T66, G = AC-46000
2. Ziffer: Dicke der Schweißprobe in mm

A4 Ergebnisse der Zugversuche

R _m [Mpa]	FSW-Anlage						CNC-Anlage						Roboter vertikal (R-PA) H02						Roboter horizontal (R-PC) H02						Grund- werkstoff (GW)		
	H01		H02		H03		H01		H02		H03		H01		H02		H03		H01		H02		H03		1	2	3
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D			
G-4	252	172	223	251	198	188	241	269	218	234	180	214	176	177	179	162	207	250	218	225	223	188	144	232	195	236	193
5-1	293		293		291		284		287		286		293		295		289		293		292		292		289	297	296
5-4	308	307	306	307	306	307	308	308	307	306	307	307	310	309	312	307	306	306	308	311	308	308	308	307	312	312	310
5-6	313	321	314		321		319		316		318		314		318		316		314		307		316		324	324	
6-2	158	168	155	157	159	152	153	152	154	153	155	156	157	158	157	158	158	159	152	158	155	156	166	168	200	199	199
6-4	170	169	171	172	168	169	175	173	175	166	167	170	170	171	175	175	171	171	174	174	177	175	178	177	237	236	
6-6	198		198		196		197		200		204		200		200		199		203		202		195		234	235	235
6-8	168	169					165	166	165	166			167	168													

Bruchlage	FSW-Anlage						CNC-Anlage						Roboter vertikal (R-PA)						Roboter horizontal (R-PC)						Grund- werkstoff (GW)		
	H01		H02		H03		H01		H02		H03		H01		H02		H03		H01		H02		H03		1	2	3
	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D	C	D			
G-4	GW	GW	adv.	adv.	ret.	ret.	GW	adv.	GW	ret.	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	ret.	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW
5-1	GW		GW		GW		Naht		Naht		Naht		GW		GW		GW		GW		GW		GW		GW	GW	GW
5-4	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW	GW
5-6	GW		GW		GW		GW		GW		GW		GW		GW		GW		GW		GW		GW		GW	GW	GW
6-2	adv.	adv.	adv.	adv.	adv.	adv.	Naht		Naht	Naht	Naht	Naht	Naht	Naht	Naht	Naht	Naht	adv.	Naht	adv.	Naht	Naht	Naht	GW	GW	GW	GW
6-4	adv.	adv.	adv.	adv.	adv.	adv.	ret.	ret.	adv.	adv.	ret.	ret.	adv.	adv.	adv.	adv.	adv.	adv.	ret.	ret.	adv.	adv.	adv.	ret.	GW	GW	GW
6-6	ret.		adv.		ret.		ret.		adv.		ret.		ret.		adv.		ret.		ret.		ret.		ret.		GW	GW	GW
6-8	adv.	adv.					ret.	ret.	adv.	adv.			ret.	ret.													

Legende:

1. Ziffer/Buchstabe: Legierungsbezeichnung: 5 = AW-5083-H111, 6 = AW-6060-T66, G = AC-46000
2. Ziffer: Dicke der Schweißprobe in mm

Hinweis: Die D-Proben sind lediglich Ersatzproben, deshalb sind hier einige Felder leer.

A5 Berechnete Roboterbelastungen

Schweißlage PA des Roboters am Nahtende

Koordinaten der Gelenkpunkte der Basis, der Achsen A ₁ bis A ₆ und des Werkzeuges im Welt-KOS in m								
	Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug
x	0,0000	0,0000	0,4863	1,0102	1,3736	1,6040	1,6040	1,6040
y	0,0000	0,0000	0,1164	0,2418	0,3288	0,3840	0,3840	0,3840
z	0,0000	0,5750	1,0450	2,2281	1,7619	1,4030	1,1130	0,7670

Kräfte und Momente an der Basis, an den Achsen A ₁ bis A ₆ und am Werkzeug im jeweiligen Orts-KOS								
Anteil aus der Kraft F _x								
	Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug
F _x	2.686,0 N	2.612,2 N	1.082,5 N	1.439,1 N	-2.180,0 N	0,0 N	2.686,0 N	-2.686,0 N
F _y	0,0 N	-625,4 N	2.377,3 N	-2.180,0 N	-625,4 N	-2.612,2 N	0,0 N	0,0 N
F _z	0,0 N	0,0 N	-625,4 N	-625,4 N	1.439,1 N	-625,4 N	0,0 N	0,0 N
M _x	0,0 Nm	120,1 Nm	-726,2 Nm	-184,7 Nm	600,8 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm
M _y	2.060,2 Nm	501,5 Nm	139,6 Nm	972,9 Nm	-2.598,8 Nm	397,7 Nm	929,4 Nm	0,0 Nm
M _z	-1.031,4 Nm	-1.031,4 Nm	-726,2 Nm	-3.816,7 Nm	-219,1 Nm	-1.661,4 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm

Kräfte und Momente an der Basis, an den Achsen A ₁ bis A ₆ und am Werkzeug im jeweiligen Orts-KOS								
Anteil aus der Kraft F _y								
	Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug
F _x	0,0 N	-247,5 N	-102,6 N	-136,3 N	206,5 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
F _y	-1.063,0 N	-1.033,8 N	-225,2 N	206,5 N	-1.033,8 N	247,5 N	1.063,0 N	1.063,0 N
F _z	0,0 N	0,0 N	-1.033,8 N	-1.033,8 N	-136,3 N	-1.033,8 N	0,0 N	0,0 N
M _x	815,3 Nm	198,5 Nm	-1.200,0 Nm	-305,4 Nm	993,2 Nm	0,0 Nm	-367,8 Nm	0,0 Nm
M _y	0,0 Nm	-47,5 Nm	230,8 Nm	1.608,3 Nm	246,2 Nm	657,5 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm
M _z	-1.705,1 Nm	-1.705,1 Nm	68,8 Nm	361,6 Nm	-362,2 Nm	157,4 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm

Kräfte und Momente an der Basis, an den Achsen A ₁ bis A ₆ und am Werkzeug im jeweiligen Orts-KOS								
Anteil aus der Kraft F _z								
	Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug
F _x	0,0 N	0,0 N	6.842,1 N	-6.274,2 N	-4.141,8 N	-7.518,0 N	0,0 N	0,0 N
F _y	0,0 N	0,0 N	-3.115,5 N	-4.141,8 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
F _z	7.518,0 N	7.518,0 N	0,0 N	0,0 N	-6.274,2 N	0,0 N	-7.518,0 N	7.518,0 N
M _x	2.887,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm
M _y	-12.059,0 Nm	-12.400,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	-1.781,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm
M _z	0,0 Nm	0,0 Nm	-8.641,0 Nm	-4.590,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm

Kräfte und Momente an der Basis, an den Achsen A ₁ bis A ₆ und am Werkzeug im jeweiligen Orts-KOS								
Gesamtbelastung aus F _x , F _y , F _z								
	Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug
F _x	2.686,0 N	2.364,7 N	7.822,0 N	-4.971,4 N	-6.115,3 N	-7.518,0 N	2.686,0 N	-2.686,0 N
F _y	-1.063,0 N	-1.659,1 N	-963,4 N	-6.115,3 N	-1.659,1 N	-2.364,7 N	1.063,0 N	1.063,0 N
F _z	7.518,0 N	7.518,0 N	-1.659,1 N	-1.659,1 N	-4.971,4 N	-1.659,1 N	-7.518,0 N	7.518,0 N
M _x	3.702,0 Nm	319,0 Nm	-1.927,0 Nm	-490,0 Nm	1.594,0 Nm	0,0 Nm	-368,0 Nm	0,0 Nm
M _y	-9.999,0 Nm	-11.946,0 Nm	370,0 Nm	2.581,0 Nm	-4.134,0 Nm	1.055,0 Nm	929,0 Nm	0,0 Nm
M _z	-2.736,0 Nm	-2.736,0 Nm	-9.298,0 Nm	-8.046,0 Nm	-581,0 Nm	-1.504,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm

Schweißlage PC des Roboters am Nahtende

Koordinaten der Gelenkpunkte der Basis, der Achsen A ₁ bis A ₆ und des Werkzeuges im Welt-KOS in m								
Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug	
x	0,0000	0,0000	0,4765	1,2593	1,5535	1,7320	1,7320	1,7320
y	0,0000	0,0000	0,1513	0,3999	0,4933	0,5500	0,2600	-0,0860
z	0,0000	0,5750	1,0450	2,0527	1,5411	1,1540	1,1540	1,1540

Kräfte und Momente an der Basis, an den Achsen A ₁ bis A ₆ und am Werkzeug im jeweiligen Orts-KOS								
Anteil aus der Kraft F _x								
Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug	
F _x	2.686,0 N	2.560,0 N	1.617,3 N	1.115,0 N	148,3 N	0,0 N	2.686,0 N	-2.686,0 N
F _y	0,0 N	-812,9 N	1.984,4 N	-2.304,4 N	-2.439,1 N	-1.124,8 N	0,0 N	0,0 N
F _z	0,0 N	0,0 N	-812,9 N	-812,9 N	1.115,0 N	-2.439,1 N	0,0 N	0,0 N
M _x	0,0 Nm	470,7 Nm	550,1 Nm	-1.493,0 Nm	844,3 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm
M _y	3.099,6 Nm	1.482,3 Nm	-334,0 Nm	89,2 Nm	-651,6 Nm	1.551,3 Nm	929,4 Nm	0,0 Nm
M _z	231,0 Nm	231,0 Nm	279,0 Nm	-2.300,7 Nm	-1.537,8 Nm	-715,4 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm

Kräfte und Momente an der Basis, an den Achsen A ₁ bis A ₆ und am Werkzeug im jeweiligen Orts-KOS								
Anteil aus der Kraft F _y								
Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug	
F _x	0,0 N	0,0 N	824,0 N	-956,9 N	-127,2 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
F _y	0,0 N	0,0 N	-671,6 N	-463,0 N	-445,2 N	965,3 N	1.063,0 N	1.063,0 N
F _z	1.063,0 N	1.063,0 N	0,0 N	0,0 N	-956,9 N	-445,2 N	0,0 N	0,0 N
M _x	-91,4 Nm	-644,4 Nm	-407,1 Nm	-280,6 Nm	154,1 Nm	0,0 Nm	-367,8 Nm	0,0 Nm
M _y	-1.841,1 Nm	-1.727,1 Nm	-499,5 Nm	580,0 Nm	559,2 Nm	283,1 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm
M _z	0,0 Nm	0,0 Nm	-1.195,6 Nm	-322,6 Nm	-280,6 Nm	613,9 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm

Kräfte und Momente an der Basis, an den Achsen A ₁ bis A ₆ und am Werkzeug im jeweiligen Orts-KOS								
Anteil aus der Kraft F _z								
Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug	
F _x	0,0 N	2.275,4 N	1.437,5 N	991,0 N	-7.452,4 N	-7.518,0 N	0,0 N	0,0 N
F _y	7.518,0 N	7.165,4 N	1.763,8 N	-2.048,2 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N	0,0 N
F _z	0,0 N	0,0 N	7.165,4 N	7.165,4 N	991,0 N	0,0 N	-7.518,0 N	7.518,0 N
M _x	-8.676,0 Nm	-4.149,0 Nm	6.823,0 Nm	-394,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm
M _y	0,0 Nm	1.317,0 Nm	-6.568,0 Nm	-7.345,0 Nm	-3.205,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm
M _z	13.021,0 Nm	13.021,0 Nm	248,0 Nm	-2.045,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm

Kräfte und Momente an der Basis, an den Achsen A ₁ bis A ₆ und am Werkzeug im jeweiligen Orts-KOS								
Gesamtbelastung aus F _x , F _y , F _z								
Basis	A1	A2	A3	A4	A5	A6	Werkzeug	
F _x	2.686,0 N	4.835,4 N	3.878,8 N	1.149,2 N	-7.431,4 N	-7.518,0 N	2.686,0 N	-2.686,0 N
F _y	7.518,0 N	6.352,5 N	3.076,7 N	-4.815,7 N	-2.884,3 N	-159,5 N	1.063,0 N	1.063,0 N
F _z	1.063,0 N	1.063,0 N	6.352,5 N	6.352,5 N	1.149,2 N	-2.884,3 N	-7.518,0 N	7.518,0 N
M _x	-8.767,0 Nm	-4.322,0 Nm	6.966,0 Nm	-2.168,0 Nm	998,0 Nm	0,0 Nm	-368,0 Nm	0,0 Nm
M _y	1.259,9 Nm	1.073,0 Nm	-7.402,0 Nm	-6.675,0 Nm	-3.297,0 Nm	1.834,0 Nm	929,0 Nm	0,0 Nm
M _z	13.252,0 Nm	13.252,0 Nm	-669,0 Nm	-4.668,0 Nm	-1.818,0 Nm	-101,0 Nm	0,0 Nm	0,0 Nm

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, J.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibler automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wiba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht forms stabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wissbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeeinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrieroboteinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelman, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen**
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
**Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zettlmeier, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindt, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanger, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
**Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme**
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in
mittelständischen Unternehmen**
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgel leitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Seminarberichte iw b sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung
86 Seiten · ISBN 3-931327-06-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungs montage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikroteilen
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapselfur zur aseptischen Ampulle
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnernverbünden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Hohn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer
Ganzeitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsender Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breiting
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
 2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
 2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
 2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
 2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
 2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
 2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
 2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
 2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
 2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
 2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
 2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
 2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
 2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
 2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
 2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
 2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Gribsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
 2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
 2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickenrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfabrbewegungen
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansorge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
 2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
 2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
 2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
 2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
 2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
 2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
 2009 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht
Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg
Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
 2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 Ulrich Munzert
Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
 2010 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 Georg Völlner
Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
 2010 · 230 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0955-0

