

Fertigungstechnik - Erlangen

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. Manfred Geiger

Prof. Dr.-Ing. Klaus Feldmann

Oliver Kreis

133

Integrierte Fertigung -
Verfahrensintegration durch
Innenhochdruck-Umformen, Trennen
und Laserstrahlschweißen in
einem Werkzeug sowie ihre tele-
und multimediale Präsentation



Oliver Kreis

*Integrierte Fertigung -
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale
Präsentation*

www.integrierte-fertigung.de

Oliver Kreis

*Integrierte Fertigung -
Verfahrensintegration durch
Innenhochdruck-Umformen, Trennen
und Laserstrahlschweißen in einem
Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation*

Bericht aus dem Lehrstuhl für

Fertigungstechnologie

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. M. Geiger

LFT



Meisenbach Verlag Bamberg

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 24. Juni 2002
Tag der Promotion: 19. Dezember 2002
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Winnacker
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. Manfred Geiger
Prof. Dr.-Ing. Albert Weckenmann

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

ISBN 3-87525-176-8
ISSN 1431-6226

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdrucks
und der Vervielfältigung des Buches oder Teilen daraus,
vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des
Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein
anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichts-
gestaltung - mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG ausdrücklich
genannten Sonderfälle -, reproduziert oder unter Verwendung
elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder
verbreitet werden.

© Meisenbach Verlag Bamberg 2002
Herstellung: Gruner Druck GmbH, Erlangen-Eltersdorf
Printed in Germany

Vorwort

"Es lohnt sich, bei der Auswahl der wissenschaftlichen Werke, die man lesen möchte, einige Sorgfalt walten zu lassen [...], denn es gibt eine Unzahl von wissenschaftlichen Werken, die entweder überflüssig oder unlesbar sind."

Dietrich Schwanitz [0]

Die vorliegende Dissertation hofft, weder überflüssig noch unlesbar zu sein. Sie stellt vielmehr den Anspruch, sich zu "der Auswahl der wissenschaftlichen Werke" zu gesellen, die gelesen werden möchten. Um diese Lektüre angenehmer zu gestalten, kann der geneigte Leser die Ergebnisse meiner hier vorliegenden Dissertation auch in Form einer didaktisch wie methodisch differenzierten tele- und multimedialen Präsentation nachvollziehen. Auf diese Weise kann der von Schwanitz postulierte Vorwurf der Unlesbarkeit entkräftet werden. Was die von Schwanitz problematisierte Überflüssigkeit anbelangt, kann ich nur entgegnen, dass ich mit dieser Doktorarbeit hoffe, einen wichtigen Beitrag zu leisten im Bezug auf neue Erkenntnisse zur Verkürzung von Prozessketten, zur Erweiterung der Einsatzfelder des Laserstrahlschweißens und zur Verbreitung des Innenhochdruck-Umformens. Darüber hinaus kommt hierbei der Wissensvermittlung durch den Einsatz "neuer" Medien im Rahmen einer interdisziplinären Dimension eine wichtige Bedeutung zu. Überflüssig erscheint mir diese Arbeit daher nicht. Sie entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Assistent am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Wesentliche Teile der Arbeit wurden im Rahmen des Teilprojektes C3 "Integrierte Fertigung durch Umformen, Fügen und Trennen in einem Werkzeug" des Sonderforschungsbereiches 396 "Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile" von der Deutschen Forschungsgemeinschaft gefördert, der ich hierfür danken möchte.

Mein besonderer Dank gilt dem Ordinarius des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. Manfred Geiger, für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit, mit der er mir eine eigenverantwortliche Bearbeitung des Forschungsthemas ermöglichte. Ganz besonders bedanke ich mich für das mir entgegengebrachte hohe Maß an Vertrauen und persönlicher Förderung. Dieses manifestierte sich auch in der Übertragung von Leitungsaufgaben als Koordinator Lehre des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie sowie als Studienfachberater für Maschinenbau und für den in Erlangen neu eingerichteten Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen. Ich konnte diese Aufgaben mit großer gestalterischer Freiheit erfüllen. Einige Aspekte dieser Tätigkeiten spiegeln sich auch in der vorliegenden Arbeit wider.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Albert Weckenmann danke ich für die spontane Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats und Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Günther Kuhn und Herrn Professor Dr.-Ing. Heinrich Niemann für ihre Mitwirkung als Vorsitzender bzw. fachfremder Gutachter in der mündlichen Promotionsprüfung.

Darüber hinaus gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für die sehr kollegiale Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich an dieser Stelle vor allem Herrn

Dipl.-Ing. Martino Celeghini, Herrn Dr.-Ing. Philipp Hein und Herrn Dipl.-Ing. Maximilian Euringer, mit denen ich gemeinsam das Teilprojekt bearbeitete. Herrn Dipl.-Ing. (FH) Gerd van der Heyd, Herrn Dipl.-Ing. (FH) Horst Trägler und Herrn Reinhold Peter danke ich stellvertretend für alle technischen Mitarbeiter für ihre konstruktive Hilfestellung bei den systemtechnischen Herausforderungen dieser Arbeit. Danken möchte ich auch den Oberingenieuren Frau Dr.-Ing. Marion Merklein und Herrn Dr.-Ing. Stefan Novotny für die kritische Durchsicht des Manuskripts. Mein Dank gilt ebenso den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern in Metallografie, Grafik und Design, Buchhaltung und Sekretariat.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen studentischen Mitarbeitern, insbesondere bei den Herren Dipl.-Ing. Claus Falkner, Michael Koch, Martin Stief und Peter Schott sowie bei den Herren cand.-ing. Henning Völlm, Christoph Schmitt, Bernd Eichenhüller, Thomas von Chiari und Heiko Thiel.

Meinen Eltern danke ich an dieser Stelle sehr herzlich, denn sie haben mir diesen akademischen Werdegang überhaupt erst ermöglicht. Ein besonderes Anliegen ist es mir abschließend, meiner Frau Marion sehr herzlich für ihre stetige und liebevolle Unterstützung zu danken. Sie hat dadurch wesentlich zum erfolgreichen Abschluss dieser Arbeit beigetragen.

Erlangen, im Dezember 2002

Oliver Kreis

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Einleitung und Motivation | 9 |
| 2 | Zielsetzung und Gliederung | 11 |
| 3 | Stand der Technik und methodisch-didaktische Grundlegung | 13 |
| 3.1 | Einleitung und Überblick | 13 |
| 3.2 | Innenhochdruck-Umformen (IHU)..... | 13 |
| 3.2.1 | Verfahren..... | 13 |
| 3.2.2 | IHU-Medium und Schmierstoff..... | 16 |
| 3.2.3 | Prozessketten mit Innenhochdruck-Umformen..... | 17 |
| 3.3 | Laserstrahlschweißen..... | 19 |
| 3.3.1 | Verfahren..... | 19 |
| 3.3.2 | Bahnplanungsstrategien | 21 |
| 3.4 | Methodisch-didaktische Grundlegung der tele- und multimedialen Präsentation..... | 23 |
| 3.4.1 | Grundlegende Definitionen | 24 |
| 3.4.1.1 | Wissensstufen | 24 |
| 3.4.1.2 | Lernen und Didaktik | 26 |
| 3.4.1.3 | Lernparadigmen: Behaviorismus, Kognitivismus und Konstruktivismus..... | 26 |
| 3.4.1.4 | Instruktions- und Problemlösungsparadigma | 29 |
| 3.4.1.5 | Exploratives Lernen | 29 |
| 3.4.1.6 | Selbstgesteuertes Lernen..... | 29 |
| 3.4.2 | Lehr-Lern-Prozess | 30 |
| 3.4.3 | Unterrichtsprinzipien..... | 31 |
| 3.4.3.1 | Strukturierung und fundierende Unterrichtsprinzipien..... | 32 |
| 3.4.3.2 | Regulierende Unterrichtsprinzipien | 35 |
| 3.4.4 | Mediendidaktik..... | 37 |
| 3.4.4.1 | Grundlegende Definitionen..... | 37 |
| 3.4.4.2 | Typologie rechnergestützter Lernprogramme..... | 40 |
| 3.4.4.3 | Rezeption von Text und Bild | 43 |
| 4 | Modellierung | 49 |
| 4.1 | Einleitung und Überblick | 49 |
| 4.2 | Entwicklung einer Methodik zur Prozesskettenmodellierung | 50 |
| 4.3 | Systemtheoretische Modellierung der Prozesskette..... | 52 |
| 4.3.1 | Konventionelle Prozesskette zur Herstellung flächiger Leichtbauteile | 52 |
| 4.3.2 | Konzeption und Modellierung der integrierten Prozesskette..... | 54 |
| 4.3.2.1 | Variantenbewertung..... | 54 |
| 4.3.2.2 | Modellierung der zu realisierenden integrierten Prozesskette | 60 |
| 4.4 | Prozesstechnische Modellierung des Fügeprozesses | 63 |
| 4.5 | Systemtechnische Modellierung des Fügeprozesses | 69 |
| 5 | Versuchseinrichtungen | 77 |
| 5.1 | Einleitung und Überblick..... | 77 |
| 5.2 | Integriertes Werkzeug und Presse..... | 77 |
| 5.3 | Entwurf und Ausarbeitung des integrierten Fügeroboters | 78 |
| 5.4 | Laser, Bearbeitungsoptiken und Strahlparameter | 89 |
| 5.5 | Werkstoffe, IHU-Medien und Schmierstoffe..... | 91 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6 | Experimentelle Untersuchungen | 93 |
| 6.1 | Einleitung und Überblick | 93 |
| 6.2 | Modell- und Grundlagenuntersuchungen | 96 |
| 6.2.1 | Korrelation von Einschweißtiefe, Zugkraft und Porenbildung | 100 |
| 6.2.2 | Bestimmung der zulässigen Toleranz | 108 |
| 6.2.3 | Zusammenfassung der Modell- und Grundlagenuntersuchungen..... | 109 |
| 6.3 | Optimierung des Fügeprozesses in der integrierten Prozesskette..... | 113 |
| 6.3.1 | Optimierung der Schweißbahn..... | 113 |
| 6.3.2 | Dichtheit der Schweißnaht | 120 |
| 6.3.3 | Optimierung der Schweißstrategie und Detaillierung des Prozessfensters | 124 |
| 6.3.4 | Referenzreihe | 125 |
| 6.3.5 | Umformbarkeit der Schweißnaht | 129 |
| 6.4 | Zusammenfassung..... | 132 |
| 7 | Implementierung der tele- und multimedialen Präsentation | 135 |
| 7.1 | Einleitung und Überblick | 135 |
| 7.2 | Methodische Vorgehensweise | 135 |
| 7.3 | Anwendung..... | 138 |
| 7.3.1 | Gliederung der Dissertation und der Präsentation..... | 138 |
| 7.3.2 | Exemplarische Darstellung der Entwicklung einer Seite..... | 139 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 143 |
| 9 | Summary | 147 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 149 |
| | Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen | 165 |
| | Anhang | 167 |

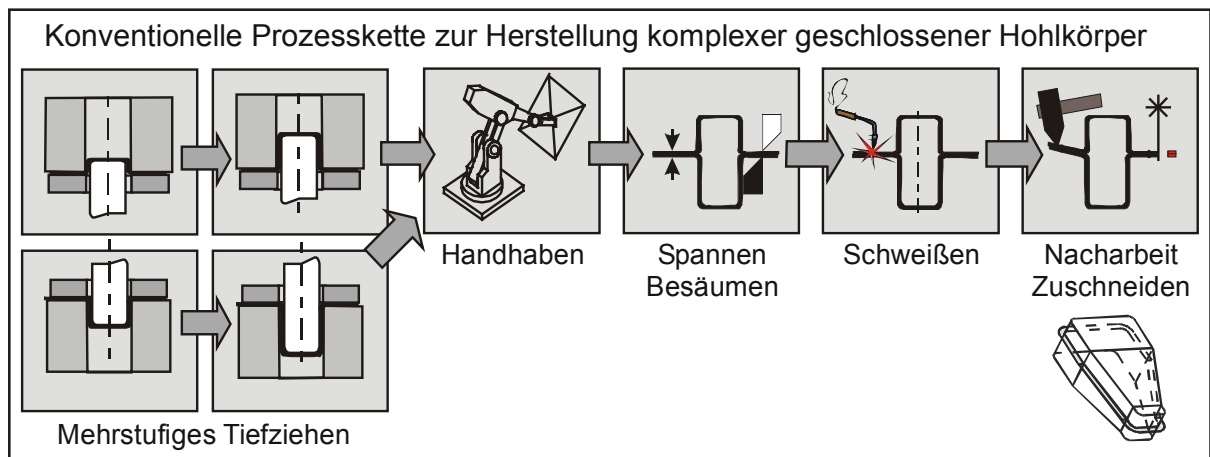
1 Einleitung und Motivation

"Unser Wissenschaftssystem ist auf langen institutionellen Wegen in beängstigender Weise unübersichtlich geworden." [1] Nach Mittelstraß umfasst der Fächerkatalog des deutschen Hochschulverbandes über 4.000 Fächer und verdeutlicht damit die Atomisierung der Disziplinen. Die heutigen Probleme jedoch orientieren sich nach Zimmerli gerade nicht mehr am Zuschnitt dieser wissenschaftlichen Disziplinen [2]. Ihre Lösung kann deshalb nur durch eine interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Fachrichtungen erfolgen [3]. Hier gilt es, mehrere Wissensbereiche zu verknüpfen, um auf diese Weise innovativ und effizient Visionen umzusetzen, zumal wissenschaftlicher Fortschritt heute meist nicht mehr im Zentrum einer Wissenschaft, sondern an ihren Rändern entsteht [1].

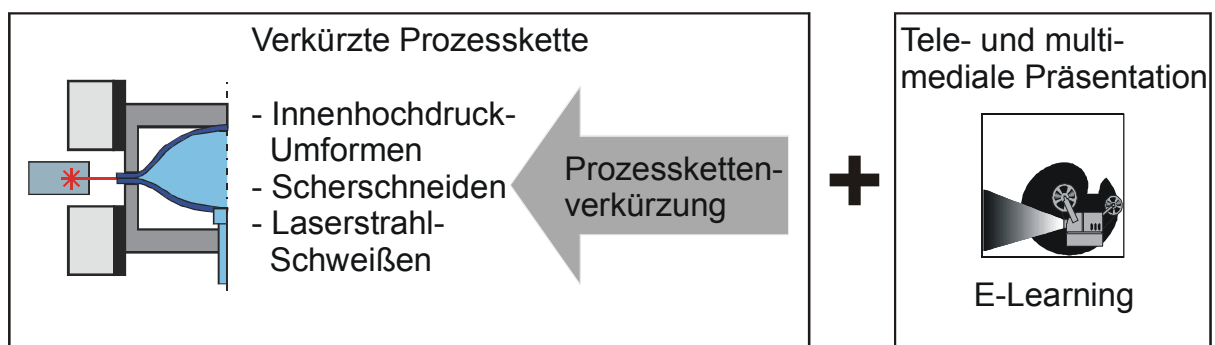
Übertragen auf den Forschungsbereich dieser Dissertation bedeutet dies, dass auch hier sowohl in einer bereichsübergreifenden wie auch in einer interdisziplinären Dimension gearbeitet werden soll. Bezogen auf die erste, bereichsübergreifende Dimension soll durch die Verbindung innovativer Fertigungsprozesse eine Verkürzung der Prozesskette zur Herstellung technischer Produkte bei gleichzeitiger Beibehaltung oder Erhöhung der Bauteilqualität und -komplexität erreicht werden. Dies ermöglicht das Aufzeigen von Einsparungspotenzialen durch die Reduzierung von Einzelprozessen. Das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren ist ein innovatives Verfahren zur Herstellung komplexer flächiger Bauteile [4]. Die homogenere Dehnungsverteilung ermöglicht im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen eine Erweiterung der Formgebungsgrenzen. Fügeverfahren mit Laserstrahlung nehmen heute aufgrund der außerordentlichen Fertigungsqualität, der hohen Flexibilität und des großen Automatisierungspotenzials eine Schlüsselstellung im Bereich der Hochtechnologien ein [5]. Deshalb soll in der hier vorliegenden Arbeit ein Beispiel für die Entwicklung einer robusten, verkürzten Prozesskette dargestellt werden, die diese beiden innovativen Fertigungsverfahren vereint und die Einsatzfelder des Laserstrahlschweißens erweitert. Die Arbeit folgt der Vision des Sonderforschungsbereiches 396 "Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile" an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg [6]. Durch die Anwendung innovativer Verfahren und Methoden in Planung, Fertigung und Montage lassen sich Prozessketten zur Herstellung hochwertiger Produkte unter Beibehaltung oder Erhöhung der Robustheit gegenüber Störgrößen verkürzen [7]. Dadurch werden sowohl ökologische und ökonomische als auch qualitätsbezogene Vorteile genutzt.

Die zweite Dimension dieser Arbeit verfolgt einen interdisziplinären Ansatz zwischen den Disziplinen der Ingenieurwissenschaft, Psychologie und Pädagogik. Auf dem Weg in die Wissensgesellschaft des 21. Jahrhunderts gewinnt das sogenannte E-Learning, also die Aus- und Weiterbildung mit elektronischen Medien, immer mehr an Bedeutung. Bereits 1995 wurde "Multimedia" zum Wort des Jahres gewählt [8] und schon heute findet jede siebte Bildungsstunde in Großkonzernen im Internet statt [9]. Aus diesen Gründen erfolgt die Darstellung im Rahmen eines interdisziplinären Ansatzes zusätzlich als tele- und multimediale Präsentation [10]. Die Potenziale einer derartigen Präsentation gehen weit über die reine Distribution der gedruckten Arbeit als elektronisches Dokument hinaus (vergleiche beispielsweise [11]). E-Learning eignet sich sehr gut zur Vermittlung von Fakten- und

Basiswissen. Die Lernenden können jederzeit überall auf die Daten zugreifen und ihre Lerngeschwindigkeit selbst bestimmen. Der Einsatz multimedialer Elemente erhöht die Anschaulichkeit und die Lernwirksamkeit. Über das Internet können die Informationen schnell und kostengünstig publiziert und aktualisiert werden. Auch im Hochschulbereich gewinnt E-Learning immer mehr an Bedeutung, wie beispielsweise die "Virtuelle Hochschule Bayern" [12] oder Förderprogramme des Bundesministeriums für Bildung und Forschung eindrucksvoll zeigen. Da die Präsentation dem Anspruch der Wissenschaftlichkeit genügen soll, erfordert sie eine vorangestellte methodisch-didaktische Grundlegung, um eine hohe Lernwirksamkeit sicherzustellen.



- Verbindung innovativer Fertigungsverfahren
- Erweiterung der Einsatzfelder des Laserstrahlschweißens
- Verkürzung von Prozessketten



- Erhöhung der Qualität und Komplexität technischer Produkte
- Erschließung von Einsparungspotenzialen
- Förderung der Wissensvermittlung durch den Einsatz neuer Medien

Bild 1-1: Motivation und Zielsetzung der Arbeit

2 Zielsetzung und Gliederung

In der vorliegenden Arbeit soll die fertigungstechnische Fragestellung einer Integration mehrerer innovativer Fertigungsverfahren in einem Werkzeug wissenschaftlich untersucht werden. Dabei erfolgt eine Fokussierung auf die Integration und Optimierung eines Fügeprozesses in einem Umformprozess. Die Konstruktion des Umformwerkzeugs und die Optimierung des Umformprozesses sind nicht Thema dieser Arbeit. Die Ergebnisse werden sowohl in der konventionellen Form einer schriftlichen Dissertation als auch in einer tele- und multimedialen Präsentation dargestellt.

Zunächst werden im Stand der Technik die verwendeten Fertigungsverfahren vorgestellt und eine methodisch-didaktische Grundlegung für die tele- und multimediale Präsentation entwickelt. Anschließend erfolgt die Realisierung einer verkürzten Prozesskette im Rahmen eines methodischen Konstruktionsprozesses. Dieser gliedert sich auf in die Phasen Planen/Klären der Aufgabenstellung, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten.

Im Rahmen der Modellierung wird zunächst eine Systematik zur Prozess- und Prozesskettenmodellierung dargestellt. Anschließend erfolgt in einer systemtheoretischen Modellierung die Konzeption der verkürzten Prozesskette. Danach werden in einer prozesstechnischen Modellierung alle relevanten Ein- und Ausgangsgrößen des Fügeprozesses ermittelt. Im Rahmen einer systemtechnischen Modellierung werden der Fügeprozess a priori konzipiert und die Schweißbahn simuliert.

Das integrierte Werkzeug wird im Kapitel "Versuchseinrichtungen" vorgestellt. Die Entwicklung des integrierten Fügeroboters stellt einen Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten dar. Aufgrund der Komplexität wird nicht der gesamte Umfang der Phasen Entwerfen und Ausarbeiten des methodischen Konstruktionsprozesses wiedergegeben. Es werden vielmehr nur die speziellen Aspekte zur Integration des Laserstrahlschweißens in einem Umformwerkzeug unter besonderer Berücksichtigung der Vorgaben "Robustheit" und "Prozesskettenverkürzung" dargestellt.

Zielsetzung umfassender experimenteller Modelluntersuchungen mit einem vorhandenen Knickarmroboter ist der prinzipielle Nachweis der Eignung des Laserstrahlschweißens zur Integration in einem IHU-Prozess sowie die Gewinnung von Daten für die Realisierung und gezielte Optimierung dieses Fügeprozesses. Dazu werden die signifikanten Ein- und Ausgangsgrößen experimentell untersucht und optimale Prozessparameter abgeleitet. Mit den gewonnenen Ergebnissen können Schweißprozess und Systemtechnik so ausgelegt werden, dass sie hinsichtlich der Anforderungen in der integrierten Prozesskette zu einem möglichst robusten Prozess und zu einer hohen Bauteilqualität beitragen.

Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des integrierten Werkzeugs werden zunächst Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, um die Übertragbarkeit der in den Modelluntersuchungen ermittelten Daten sicherzustellen. Zur besseren Diskussion der Versuchsergebnisse werden die Modelluntersuchungen mit dem vorhandenen Knickarmroboter und die Grundlagenuntersuchungen mit dem neu entwickelten integrierten

Schweißroboter nicht in ihrer chronologischen Reihenfolge, sondern gemeinsam in Abschnitt 6.2 dargestellt. Anschließend erfolgt eine Optimierung des Fügeprozesses in mehreren Stufen, um alle eingangs definierten Anforderungen und Wünsche an den Schweißprozess und die Schweißnahtqualität zu erfüllen. Ein vertieftes Prozessverständnis wird durch systematische Untersuchung der Korrelationen der Ein- und Ausgangsgrößen erarbeitet.

Die Implementierung der tele- und multimedialen Präsentation erfolgt anschließend nach dem systematischen Schema der Prototypenentwicklung. Die Umsetzung wird exemplarisch an einer Bildschirmseite dargestellt.

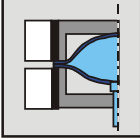
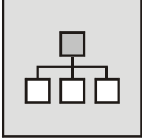
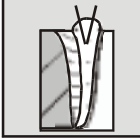

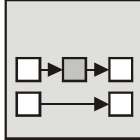
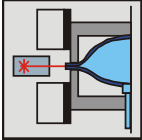
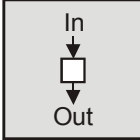
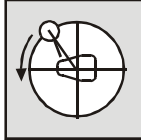
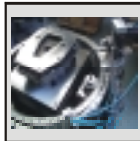
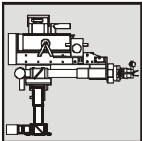
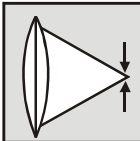


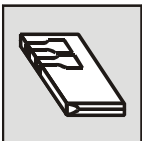
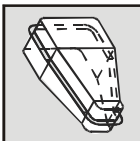
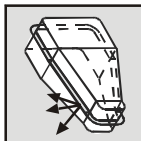
| | | | |
|---|---|--|---|
| 1. Einleitung | | | |
| 2. Zielsetzung | | | |
| 3. Stand der Technik und methodisch-didaktische Grundlegung | | | |
|  |  |  |  |
| IHU | Prozessketten | Laserstrahlschweißen | Methodisch-didaktisch |
| 4. Modellierung | | | |
|  |  |  |  |
| Methodik | Systemtheoretisch | Prozesstechnisch | Systemtechnisch |
| 5. Versuchseinrichtungen | | | |
|  |  |  |  |
| Integriertes Werkzeug | Integrierter Füge-roboter | Laser Optik | Werkstoffe Hilfsstoffe |
| 6. Experimentelle Untersuchungen | | | |
|  |  |  |  |
| Modell | Grundlagen | Bahnoptimierung | Dichtheit |
| 7. Präsentation | | | |
| 8. Zusammenfassung | | | |

Bild 2-1: Struktur der Arbeit

3 Stand der Technik und methodisch-didaktische Grundlegung

3.1 Einleitung und Überblick

In diesem Kapitel werden die in der integrierten Prozesskette realisierten innovativen Fertigungsverfahren Innenhochdruck-Umformen (IHU) und Laserstrahlschweißen kurz dargestellt. Das Verfahren Scherschneiden, das ebenfalls im Umformwerkzeug realisiert wird, ist bei Lange ausführlich beschrieben [13]. Daran schließt sich die methodisch-didaktische Grundlegung der tele- und multimedialen Präsentation an.

3.2 Innenhochdruck-Umformen (IHU)

3.2.1 Verfahren

Das Innenhochdruck-Umformen von Hohlprofilen ist ein Umformverfahren, das besonders im Automobilbereich verbreitet ist [14]. Neben Abzweigen für Abgaskomponenten, die zunehmend entsprechende Gussbauteile ablösen, werden durch IHU von Rohren Träger- und Strukturbauteile wie Vorder- oder Hinterradträger [15] weltweit in großen Stückzahlen gefertigt [14], [16], [17], [18]. Die Vorteile liegen in verbesserten Bauteileigenschaften, einer Reduzierung der Bauteilanzahl und einer Erhöhung der Bauteilkomplexität [19], [20], [21], [22], [23], [24]. Das Innenhochdruck-Umformen von Blechen wurde bereits vertieft in wissenschaftlichen Arbeiten untersucht [4], [20], [25], [26], [27], [28], [29], befindet sich aber noch nicht im industriellen Einsatz [30], [31].

Einteilung

Das IHU ist den Umformverfahren mit flexiblen Medien zuzuordnen. Darüber hinaus zählt es nach VDI 3146 [32] zu den Innenhochdruck-Verfahren, zu denen neben dem Innenhochdruck-Trennen auch das Innenhochdruck-Fügen gehört (Bild 3-1). Das IHU gliedert sich nach dem verwendeten Halbzeug in die Untergruppen IHU von Hohlprofilen und IHU von Blechen [33].

Die DIN 8582 [34] unterteilt die Umformverfahren anhand der bei der Umformung auftretenden Spannungen. Danach kann das IHU von Blechen in die Verfahrensvarianten Innenhochdruck-Tiefziehen (Zug-Druck-Umformung nach DIN 8584-1 [35]) und Innenhochdruck-Streckziehen (Zug-Umformung nach DIN 8585-1 [36]) eingeteilt werden [4], [37]. Während beim Innenhochdruck-Streckziehen der Flansch des Bauteils fest eingespannt ist, kann beim Innenhochdruck-Tiefziehen ein Blecheinzug aus dem Flanschbereich in die Umformzone erfolgen [20], [38].

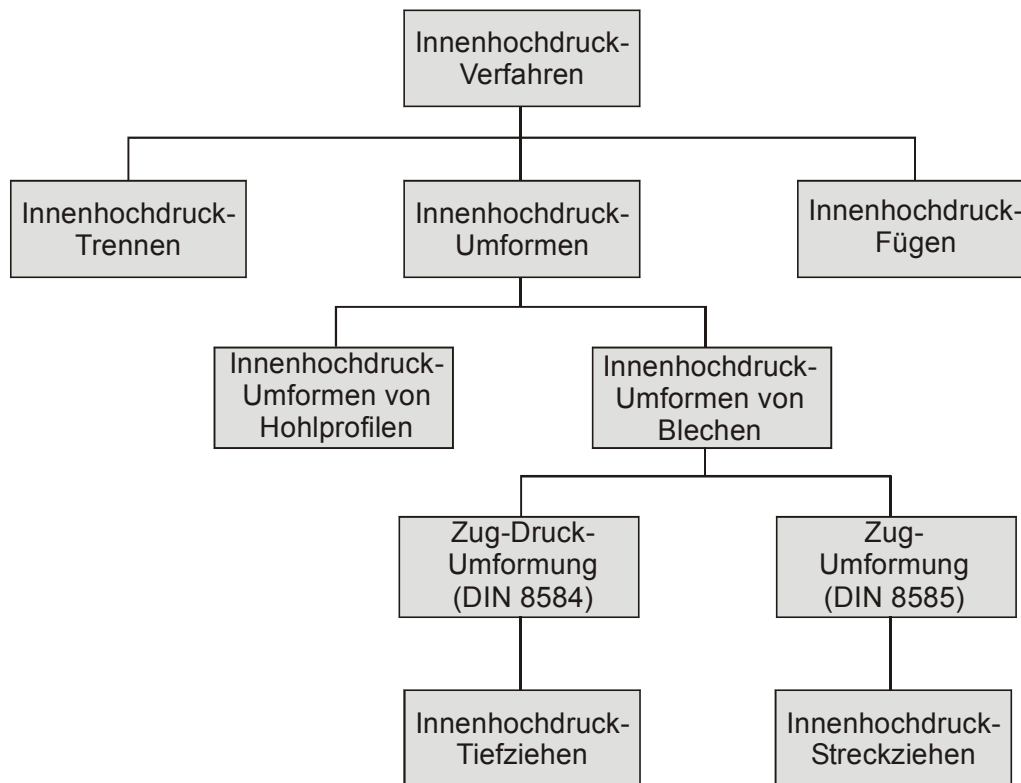


Bild 3-1: Einordnung des Innenhochdruck-Umformens nach VDI 3146 [32]

IHU von Hohlprofilen

Beim IHU von Hohlprofilen wird das Rohteil (in der Regel ein Rohr) in ein Formwerkzeug eingelegt (Bild 3-2 links). Die Bauteilenden werden abgedichtet und mit einem Andocksystem verbunden. Nach dem Schließen des Werkzeugs erfolgt eine Beaufschlagung des Rohteils mit einem Innendruck durch ein flüssiges Medium, um es in der Werkzeugkavität aufzuweiten. Meist wird über Axialstempel eine Axialkraft aufgebracht, die zum Abdichten und zum Nachschieben von Material in die Umformzone dient. Der IHU-Prozess lässt sich durch die Axialkraft und den Innendruck steuern.

IHU von Blechpaaren

Beim IHU von Blechpaaren werden zwei vorab gefügte oder ungefügte Bleche in ein Formwerkzeug eingelegt (Bild 3-2 rechts). Nach dem Schließen der Presse werden sie über ein Andocksystem mit einem Innendruck beaufschlagt und umgeformt. Blecheinzug und Umformung lassen sich durch die Regelung von Niederhalterkraft und Innendruck steuern. Im Falle großer Niederhalterkräfte sind die Bleche fest durch das Werkzeug im Flansch eingespannt und es erfolgt eine Zug-Umformung (Streckziehen). Bei geringeren Niederhalterkräften kann Material aus dem Niederhalterbereich in die Werkzeugkavität eingezogen werden und es findet eine Zug-Druck-Umformung (Tiefziehen) statt.

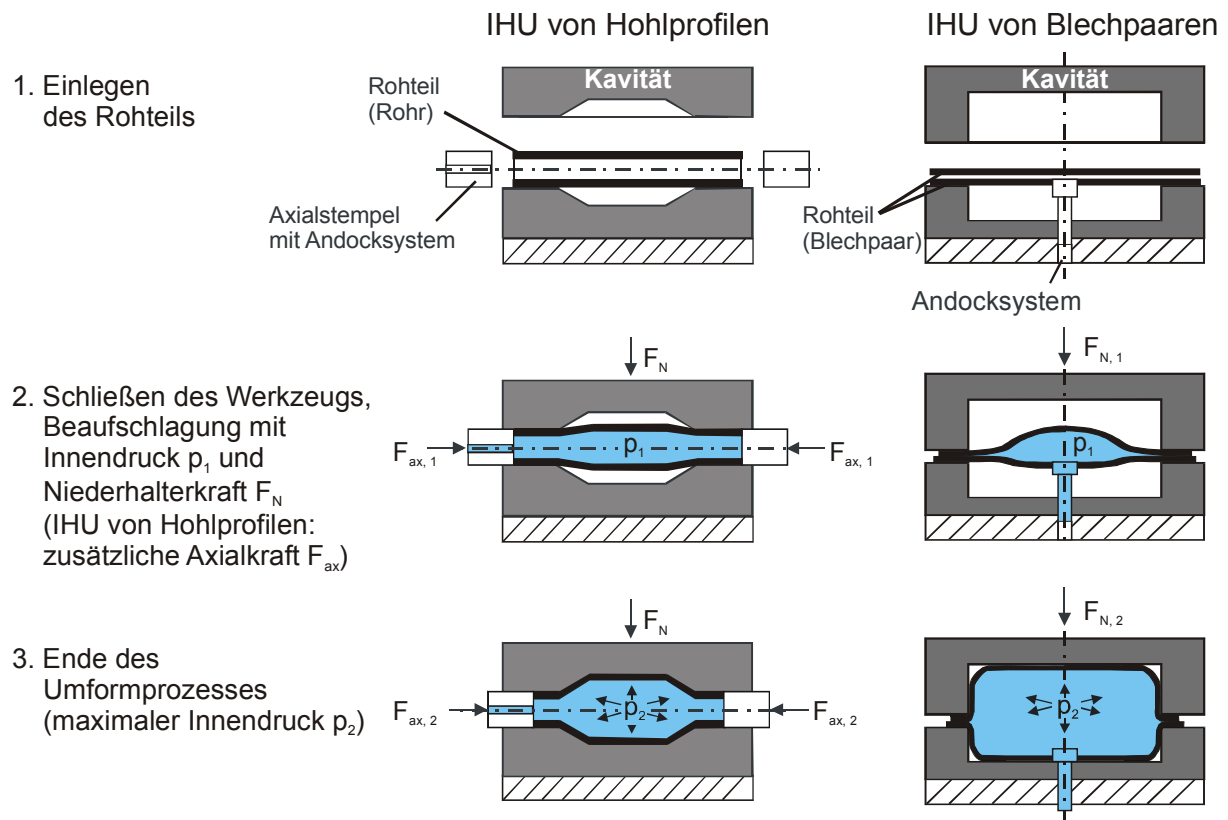


Bild 3-2: Prinzipieller Verfahrensablauf des IHU von Hohlprofilen und unverschweißten Blechpaaren

Verglichen mit dem IHU von Rohren, bei dem die größte Aufweitung des Bauteils hauptsächlich durch den Rohrausgangsdurchmesser bestimmt wird, kann das Teilespektrum durch den Einsatz von Blechen auf flächige Teile mit stark unterschiedlichen Querschnitten in einem Bauteil ausgeweitet werden [39]. Die Vorteile des IHU von Blechpaaren liegen in einer Verkürzung der Prozesskette und in einer Verbesserung der Bauteileigenschaften. Hier sind vor allem eine höhere Festigkeit und Maßgenauigkeit im Vergleich zum mehrstufigen Tiefziehen von zwei Halbschalen aufzuführen. Die homogenere Dehnungsverteilung ermöglicht im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen eine Erweiterung der Formgebungsgrenzen [4]. Durch die Einsparung von Logistik-, Handhabungs- und Umformschritten verringert sich der Aufwand für den Werkzeugbau und die Anlagenbereitstellung. Es können zwei Bleche gleichzeitig umgeformt werden, wobei diese unterschiedliche Werkstoffqualitäten und Blechdicken aufweisen können.

Als typische potenzielle Anwendungen für die Innenhochdruck-Umformung von Blechen sind vor allem hohlförmige Strukturbauteile wie Quer- und Längsträger, A-, B- und C-Säulen oder Tanks zu nennen [20], [40]. Eine weitere Erhöhung der Bauteilfestigkeit und eine Reduzierung des Bauteilgewichts lassen sich durch den Einsatz von Werkstoffen mit höherem Leichtbaupotenzial wie hochfesten Stählen oder Aluminiumlegierungen erreichen [19], [41], [42], [43].

IHU ungefügter und gefügter Blechpaare

Beim IHU von Blechpaaren, die nicht miteinander verbunden sind, erfolgt eine kraftschlüssige Abdichtung durch die Niederhalterkraft der Presse [4], [20], [25], [37]. Da die

Bleche nur über die Reibkraft miteinander gekoppelt sind, ist eine Relativbewegung zwischen ihnen möglich. Für Ober- und Unterteil lassen sich verschiedene Ziehtiefen realisieren.

Alternativ kann zur Gewährleistung der Dichtheit das Blechpaar vor dem Umformen mit einer linienförmigen Verbindung gefügt werden. Dazu bieten sich Löt- [44] oder Schweißverfahren an [45]. Das IHU verschweißter Blechpaare wurde bei der prototypenhaften Herstellung eines PKW-Hilfsrahmens realisiert [46], [47]. Flüssigkeits- und Gastanks, die aus Einzelblechen verschweißt werden, lassen sich erfolgreich mit Innenhochdruck kalibrieren [48], [49], [50], [51]. Auch beim Einsatz als Tailored Blanks lassen sich Bleche mit Schweißnähten ohne Nahtversagen gut umformen [52]. Durch die starre Kopplung verschweißter Blechpaare besteht beim IHU die Gefahr des Berstens oder der Faltenbildung, wenn beide Hälften unterschiedliche Ziehtiefen aufweisen [4], [20].

Das IHU von rotationssymmetrischen Blechen sowie von verschweißten und unverschweißten Blechpaaren wurde bereits am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie grundlegend untersucht [4], [53], [54], [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65]. Auch zum IHU der in dieser Arbeit hergestellten kastenförmigen Hohlkörper existieren mehrere Veröffentlichungen [43], [66], [67]. Eine optimierte Prozessführungsstrategie besteht nach Hein [4] darin, in einem ersten IHU-Schritt bei einer freien Aufweitung des Blechpaares durch einen geringen Niederhalterdruck ein Nachfließen von Material zuzulassen. Die Umformung erfolgt hauptsächlich durch Tiefziehen (Bild 3-2 rechts Mitte). Wenn ein großer Bereich der Bleche in der Kavität anliegt, wird in einem zweiten Schritt das Bauteil bei hohem Druck und hoher Niederhalterkraft ohne Flanscheinzug durch Streckziehen kalibriert (Bild 3-2 rechts unten).

3.2.2 IHU-Medium und Schmierstoff

Verunreinigungen mit IHU-Medium und Schmierstoff können sich negativ auf die Schweißnahtqualität auswirken. Deshalb ist eine experimentelle Untersuchung des Einflusses auf den Schweißprozess erforderlich.

Beim Innenhochdruck-Umformen kommt als Druckmedium meist eine Mischung aus Wasser und geringen Mengen einer Hydraulikflüssigkeit (circa 2-10 %) zum Einsatz. Die Hydraulikflüssigkeit dient zur Verbesserung von Schaumverhalten, mikrobiologischer Stabilität und zum Korrosionsschutz [68], [69].

Zur Verringerung der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück wird beim IHU meist ein Schmierstoff verwendet. Hauptsächlich kommen Ziehöle auf Basis unterschiedlicher Mineralölraffinate, tierischer und pflanzlicher Öle oder synthetische Stoffe zum Einsatz, die meist flüssig und nicht wassermischbar sind [68], [69]. Hochleistungsschmierstoffe sind oft mit polaren und chemisch aktiven Wirkstoffen zur Verbesserung des Druckaufnahmevermögens und zur Verminderung des Verschleißes legiert. Diese Wirkstoffe weisen eine chemische Affinität zu Metallen auf und haften deshalb sehr gut an metallischen Oberflächen. Als weitere Komponenten werden häufig Antinebelzusätze sowie Alterungs- und Korrosionsinhibitoren in die Schmierstoffformulierung eingebaut. Die Schmierstoffe liegen meist in einem Viskositätsbereich von 50-1.000 mm²/s [68], [69]. Beim Einsatz ist

darauf zu achten, dass Hydraulikflüssigkeit und Schmierstoff chemisch miteinander verträglich sind und keine Zersetzung oder ein Aufschäumen stattfindet.

3.2.3 Prozessketten mit Innenhochdruck-Umformen

Die Herstellung von Leichtbauteilen durch Innenhochdruck-Umformen führt in der Regel nicht zum einbaufertigen Bauteil, sondern erfordert vor oder nach dem IHU-Prozess weitere Fertigungsschritte. Wird die Entnahme eines komplett bearbeiteten Bauteils aus dem Umformwerkzeug angestrebt, so können zusätzliche Verfahrensschritte in den Ablauf des Innenhochdruck-Verfahrens integriert werden [70]. Die in diesem Zusammenhang bislang realisierten Prozessketten werden nachfolgend als Verfahrensfolge, Verfahrensintegration und Verfahrenskombination klassifiziert (Bild 3-3).

Verfahrensfolge

Eine Verfahrensfolge stellt eine Reihe nacheinander stattfindender Prozesse dar, wobei die Bearbeitung des Werkstücks in mehreren Aufspannungen erfolgt, die nicht direkt miteinander verkettet werden müssen. Da die Einzelprozesse weitgehend unabhängig voneinander agieren, kann keine Prozesskettenverkürzung erreicht werden.

Verfahrensfolgen finden sich in allen Bereichen der industriellen Fertigung. Sie stellen die klassische Form der Bauteilherstellung dar. Problemfelder ergeben sich insbesondere aus der hohen Zahl von Nebenprozessen für Handhabungs-, Spann- und Positionieraufgaben.

Verfahrensintegration

Die Integration einzelner Prozessschritte in übergeordneten Prozessen oder ihr Entfall bieten große Einsparungspotenziale [7], [71], [72], [73]. Eine Verfahrensintegration beim Innenhochdruck-Umformen ergibt sich bei Durchführung zusätzlicher Prozesse bzw. Fertigungsverfahren in einem IHU-Werkzeug. Durch die Bearbeitung des Werkstücks in einer einzigen Aufspannung entfallen Nebenprozesse, woraus eine Verkürzung der Prozesskette resultiert. Die Einsparung einer Positionieraufgabe für nachfolgende Fertigungsschritte kann weiterhin die Robustheit der Prozesskette erhöhen. Prinzipiell ist die Einbindung von Fertigungsverfahren aus allen Hauptgruppen der Fertigungstechnik möglich. In der Praxis werden vor allem Prozesse aus den Bereichen Trennen, Fügen und Umformen in den IHU-Verfahrensablauf integriert.

Eine Integration des Trennens in einem IHU-Prozess findet beim Innenhochdruck-Lochen statt [27], [70], [74], [75], [76], das auch zum Kragenziehen [77] und in Verbindung mit dem Flexformen angewandt wird [41], [78], [79]. Daneben führt die VDI 3146 [32] als weitere Verfahrensvarianten des Innenhochdruck-Trennens noch das IH-Einschneiden, das IH-Stechen, das IH-Durchsetzen (DIN 8587 [80]) und das mechanische Lochen (DIN 8588 [81]) im IHU-Werkzeug auf.

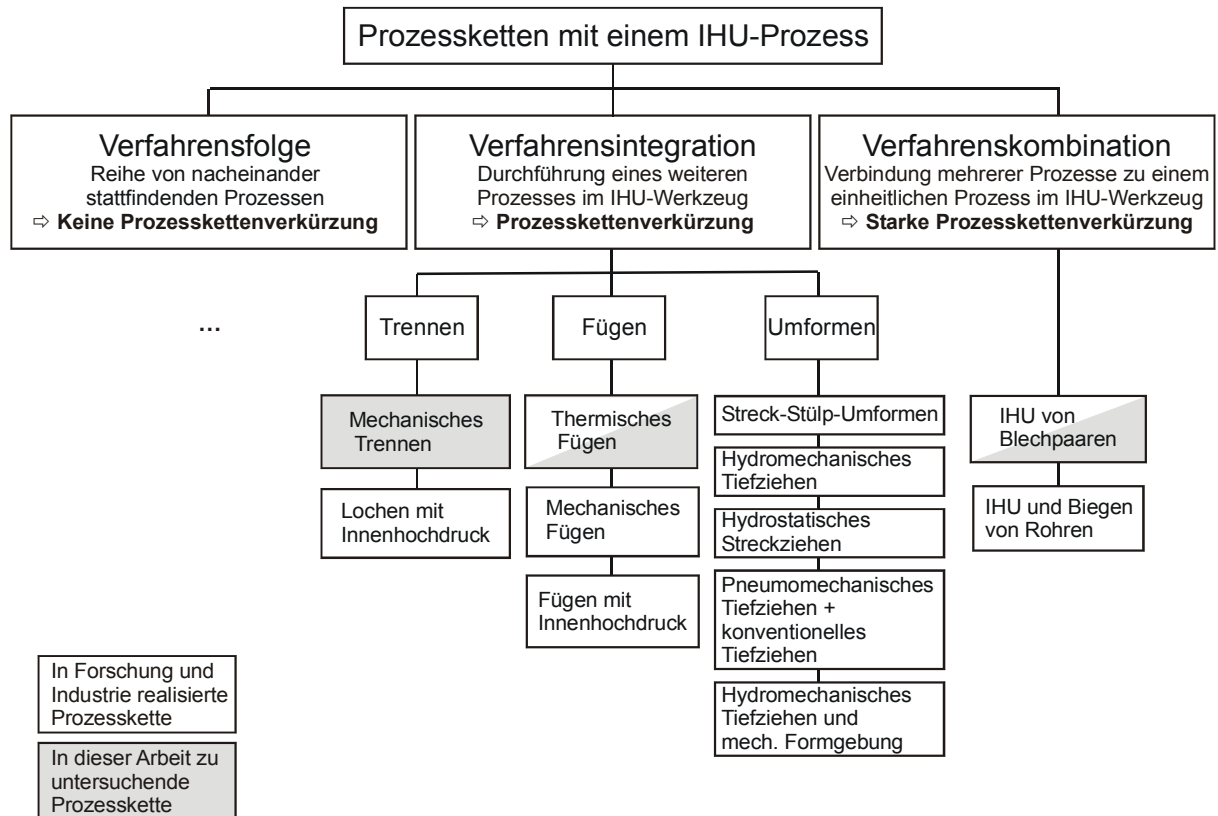


Bild 3-3: Klassifizierung von Prozessketten mit einem IHU-Prozess

Die Verbindung des IHU mit weiteren Umformverfahren ist besonders verbreitet. Hier sind die Streck-Stülp-Umformung [82], [83], [84], [85], das hydromechanische Tiefziehen [86], [87], [88] und das hydrostatische Streckziehen [78], [84], [89] zu nennen. Mit innovativen Pressenkonzepten werden Umformvorgänge mit IHU, konventionellem und hydromechanischem Tiefziehen/Tiefen, Stülpen [87], [90], [91], [92] und mechanischer Formgebung durchgeführt [93]. Beim pneumomechanischen Tiefziehen wird in einem ersten Umformschritt mit Hilfe eines gasförmigen Mediums eine Vorform generiert und in einem anschließenden konventionellen Tiefziehvorgang die endgültige Form des Bauteils hergestellt [76], [94].

Eine Integration von Fügeverfahren erfolgt mit mechanischen Fügeverfahren [95], [96] und durch Fügen mit Innenhochdruck [97], [98], [99]. Am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie können mit Innenhochdruck umgeformte Blechpaare im Werkzeug durch Widerstandspunktschweißen gefügt werden [4], [45]. Daneben gewinnen Füge- und Trennverfahren mit dem Laserstrahl eine zunehmende Bedeutung [100]. Diese sind bislang noch nicht in ein Umformwerkzeug integriert.

Im Bereich des IHU von Rohren existiert eine Verfahrenstechnologie zum IHU sogenannter "Thyssen Tailored Tubes" [101]. Tailored Blanks (maßgeschneiderte Platinen) aus Blechen, die auch aus unterschiedlichen Werkstoffen bestehen können, werden in einer Rundmaschine zu einem Spaltrohr umgeformt, mit Formrollen-Paaren zusammengedrückt und positioniert. Anschließend erfolgt das Fügen mit einem Nd:YAG-Laser in einer Durchlaufrohrschweißanlage. Schweißspritzer werden durch ein Absaugsystem vermieden. Angestrebt wird die direkte Verkettung mit einem nachfolgenden Vorbiege- und einem IHU-

Prozess in einer Fertigungslinie. Damit können diskontinuierlich individuell maßgeschneiderte Ausgangsrohre unmittelbar im Takt der IHU-Anlage produziert werden.

Verfahrenskombination

Eine weitere Verkürzung der Prozesskette und eine Verbesserung der Robustheit lassen sich erreichen, wenn einzelne bisher sequentiell stattfindende Umformprozesse zu einem einheitlichen Prozess im Umformwerkzeug zusammengefasst werden. Dies wird im Nachfolgenden als Verfahrenskombination bezeichnet. Hierzu zählen das bereits dargestellte IHU von Blechpaaren, bei dem zwei Bleche gemeinsam umgeformt werden, und die Kombination von IHU und Rohrbiegen [26], [102], [103].

3.3 Laserstrahlschweißen

3.3.1 Verfahren

Das Laserstrahlschweißen ist ein in Forschung und Industrie etabliertes Verfahren, das umfassend in zahlreichen Standardwerken beschrieben wird und deshalb hier nur kurz ausgeführt werden soll [104], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115].

Es handelt sich um ein Fügeverfahren, das sich durch eine sehr hohe Nahtqualität auszeichnet. Nur mit dem Elektronenstrahlschweißen, das im Vakuum stattfindet, lassen sich im industriellen Einsatz vergleichbare Energiedichten erzeugen wie mit dem Laserstrahlschweißen [105], [109]. Für die Materialbearbeitung werden meist CO₂-Laser mit Kohlendioxid als laseraktives, gasförmiges Medium und Festkörperlaser eingesetzt. Bei Festkörperlasern sind Nd:YAG-Laser mit in Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall dotierten Neodymionen als laseraktives, festes Medium und Diodenlaser verbreitet [110]. Infolge der Wellenlänge von 1,06 µm findet bei Nd:YAG-Lasern im Vergleich zu CO₂-Lasern mit ihrer Wellenlänge von 10,6 µm eine wesentlich bessere Einkopplung und Übertragung der Laserenergie auf das Werkstück statt. Die Gefahr einer Plasmaabschirmung bei hoher Laserleistung ist wesentlich geringer [110]. Die Strahlführung kann zudem mit einer Glasfaser erfolgen, wohingegen CO₂-Laserstrahlung nur über Spiegel geführt werden kann. Das Laserstrahlschweißen findet meist in einer Schutzgasatmosphäre aus Argon oder Helium statt [110].

Strahlparameter

Beim Nd:YAG-Laser wird der Laserstrahl meist über eine Glasfaser einer Bearbeitungsoptik zugeführt, die durch ein Führungssystem gegen das Werkstück verfahren wird. Der sich nach Auskopplung aus der Glasfaser aufweitende Strahl wird durch eine Kollimierlinse annähernd parallelisiert und mit einer Fokussierlinse auf den Fokuspunkt mit dem Durchmesser d_0 und dem Radius r_0 gebündelt (Bild 3-4).

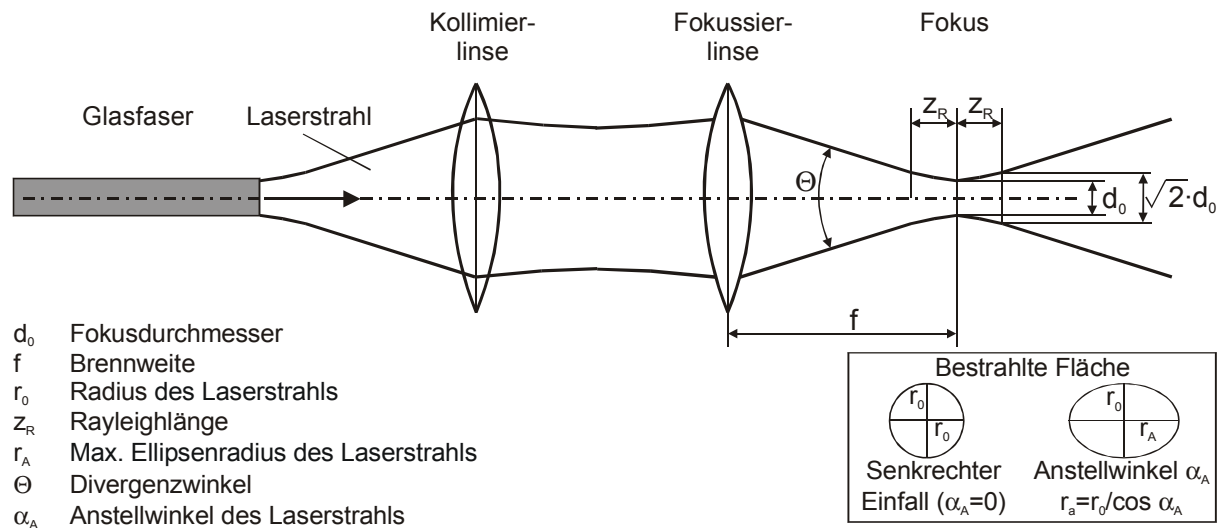


Bild 3-4: Schematischer Aufbau eines Bearbeitungskopfes und charakteristische Kenngrößen eines Laserstrahls nach Hügel [110]

Die Leistungsdichte I errechnet sich aus Laserleistung P_L und bestrahlter Fläche A nach Formel (1) [113].

$$I = \frac{P_L}{A} \quad (1)$$

$$\text{mit } A = r_0 r_A \pi \quad (2)$$

$$r_0 = \frac{d_0}{2} \quad (3)$$

Im allgemeinen Fall trifft der Laserstrahl mit einem Anstellwinkel α_A zur Senkrechten auf die Werkstückoberfläche. r_A berechnet sich, wie in Bild 3-4 dargestellt, nach Formel (4). Für senkrechte Bestrahlung gilt: $r_A = r_0$.

$$r_A = \frac{r_0}{\cos \alpha_A} \quad (4)$$

Eine charakteristische Größe für das Aufschmelzen des Materials ist die Streckenenergie S , die sich aus der Laserleistung P_L und der Vorschubgeschwindigkeit v ergibt.

$$S = \frac{P_L}{v} \quad (5)$$

Die Rayleighlänge bezeichnet den Abstand z_R von der Strahltaile, in dem sich die Querschnittsfläche des Laserstrahls verdoppelt. Damit halbiert sich die mittlere Leistungsdichte I_R . Eine große Rayleighlänge erfordert einen geringen Divergenzwinkel Θ . Der Abbildungsfaktor einer Optik gibt das Verhältnis der Durchmesser des in die Optik eingeleiteten und des auf den Fokus projizierten Laserstrahls wieder. Die Brennweite repräsentiert den Abstand zwischen Fokussierlinse und Fokus. Eine große Brennweite erlaubt einen guten Schutz der Optik vor Einflüssen des Schweißprozesses wie beispielsweise Metallspritzern, erfordert aber auch einen großen Einbauraum.

Absorptionsmechanismen

Ab einer bestimmten Energieeinbringung führt die Erwärmung zum Erreichen des Schmelzpunkts, wodurch das Material aufgeschmolzen wird. Dieser Prozess wird als Wärmeleitungsschweißen bezeichnet (vergleiche Bild 3-5). Bei einer noch höheren Leistungsdichte von circa 1 bis 10 kW/mm² (10⁵ bis 10⁶ W/cm²) bildet sich nach Erreichen der Verdampfungstemperatur in Verbindung mit einem laserinduzierten Plasma eine Dampfkapillare (Keyhole) aus [110]. Der Dampfdruck wirkt dem hydrostatischen Druck der Schmelze sowie ihrer Oberflächenspannung entgegen und verhindert das Schließen der Dampfkapillare. Durch Vielfachreflexion im Keyhole wird die Energie des Laserstrahls nahezu vollständig im Werkstück absorbiert. Aufgrund des Verhältnisses von Nahttiefe zu Nahtbreite von 1:1 bis 6:1 spricht man vom Tiefschweißen [110], [113]. Durch Wärmeleitung wird die in das Keyhole eingekoppelte Energie über die Schmelze an das feste Material weitergeleitet. An der Vorderfront des Keyholes wird deshalb Material aufgeschmolzen und verdampft. Das System aus Metaldampf, Kapillare und Schmelze folgt dem Laserstrahl entlang der Fügelinie. Ist die eingebrachte Energiemenge zu groß, so wird das Werkstück teilweise vor der Laserstrahlung durch eine über der Fügestelle entstehende Plasma-beziehungswise Metaldampfwolke abgeschirmt und Einschweißtiefe und Nahtqualität sinken.

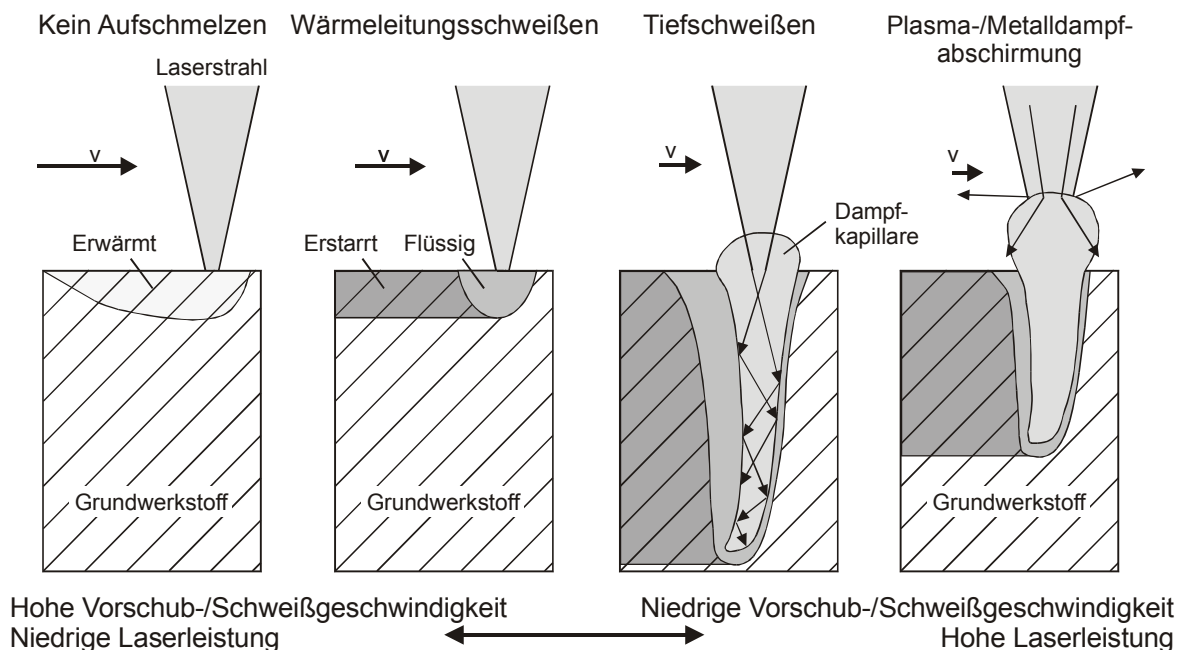


Bild 3-5: Absorptionsmechanismen beim Laserstrahlschweißen nach Hügel [110], Treiber [113], Otto [5]

3.3.2 Bahnplanungsstrategien

Bei vielen Einsatzgebieten für Roboter, wie beispielsweise beim Bahnschweißen, Schneiden oder Lackieren, besteht die Vorgabe des Roboters darin, den sogenannten Tool Center Point (TCP) - beim Laserstrahlschweißen den Fokus - auf einer vorgegebenen räumlichen Bahn mit einer bestimmten Orientierung zu bewegen. Dazu müssen meist mehrere Achsen des Roboters koordiniert und simultan verfahren werden. Während der TCP meist in einem globalen

kartesischen Koordinatensystem beschrieben wird, erfolgt die Beschreibung der einzelnen Roboterachsen in Maschinenkoordinaten wie beispielsweise Drehwinkel einer Rotations- oder Verfahrweg einer Linearachse [116].

Die Kinematik von Robotern kann grundsätzlich mit den beiden Verfahren Vorwärts- und Rückwärtstransformation beschrieben werden. Die Vorwärtstransformation errechnet aus gegebenen Maschinen- die resultierenden Raumkoordinaten. Die Raumkoordinaten werden meist durch ein globales kartesisches Koordinatensystem beschrieben. Die Berechnung erfolgt durch eine vorwärtsgerichtete Verkettung der n Achsen, wobei in der Regel der Drehpunkt einer rotatorischen ersten Achse in den Ursprung des Koordinatensystems gelegt wird. Der Anfangspunkt der Achse $i+1$ ($i=1..n$) ist mit dem Endpunkt der Achse i verbunden. In den Anfangspunkt der Achse i wird ein zur Beschreibung dieser Achse geeignetes lokales Koordinatensystem gelegt. Rotatorische Achsen werden meist in einem polaren und translatorische Achsen in einem kartesischen Koordinatensystem beschrieben [116].

Bei der Rückwärtstransformation handelt es sich um die Berechnung der Maschinenkoordinaten aus den gegebenen Raumkoordinaten unter Verwendung einer Koordinatentransformation. Die Achsstellungen des Roboters werden aus der Bewegungsbahn und der Orientierung des Bearbeitungskopfes (global oder relativ zum aktuellen Bahnstück) zu jedem Zeitpunkt ermittelt.

Die Maschinenkoordinaten können immer iterativ numerisch und oftmals auch analytisch geschlossen ermittelt werden. Zur Simulation ist es wünschenswert, statt einer rechenzeitintensiven iterativen numerischen Lösung eine explizite analytische Lösung zu finden, was jedoch nicht für alle Roboterkinematiken möglich ist. Die geschlossen lösbaren Klassen von Kinematiken sind in [117] aufgeführt.

In der Regel ermöglicht eine Führungsmaschine das Abfahren der Schweißbahn. Bei einer komplexen Bahn ist die Führungsmaschine oftmals nicht in der Lage, die erforderliche Umorientierung des Bearbeitungskopfes zum Verfahren des TCP mit konstanter Geschwindigkeit schnell genug auszuführen. Deshalb existieren verschiedene Optimierungsstrategien, um die Anforderungen an die Führungsmaschine zu reduzieren [118], [119]. Bei kleinen Konturelementen können entweder kleine Defokussierungen im Sinne einer Bahnverschleifung zugelassen werden (Bild 3-6) oder es kommt eine adaptive Optik zum Einsatz. In engen Radien ist ein Anstellen des Bearbeitungskopfes möglich. Nach Backes [119] und Schultz [120] ist ein Anstellwinkel von bis zu 30° ohne signifikante Verschlechterung der Schweißnahtqualität zulässig. Gelingt es nicht, die Vorschubgeschwindigkeit am TCP konstant zu halten, so kann die Laserleistung proportional zu ihr geregelt werden. Die gezielte Regelung der Laserleistung kann auch zur Verbesserung der Nahtqualität am Anfang und Ende einer Naht bzw. im Überschweißbereich eingesetzt werden, wie beispielsweise bei Otto [5] dargestellt ist.

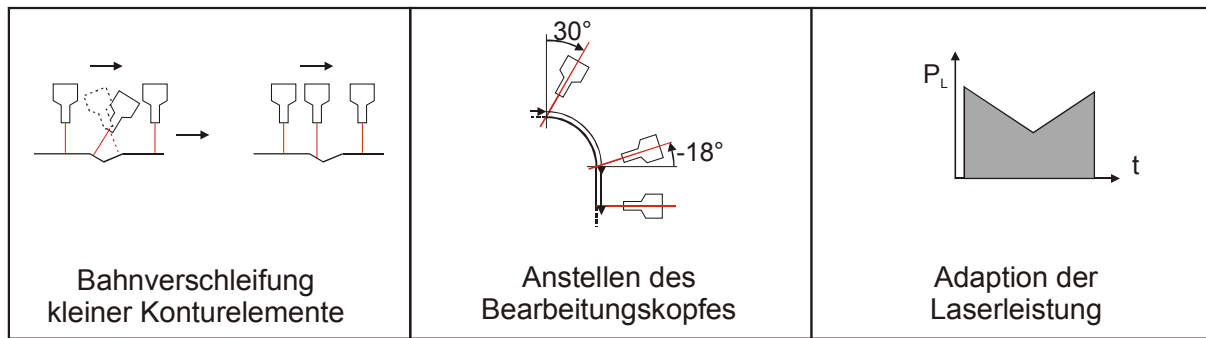


Bild 3-6: Bahnplanungsstrategien für die 3D-Laserstrahlbearbeitung nach Backes [119]

3.4 Methodisch-didaktische Grundlegung der tele- und multimedialen Präsentation

"Nichts ist praktischer als eine gute Theorie."

Hilbert Meyer [121]

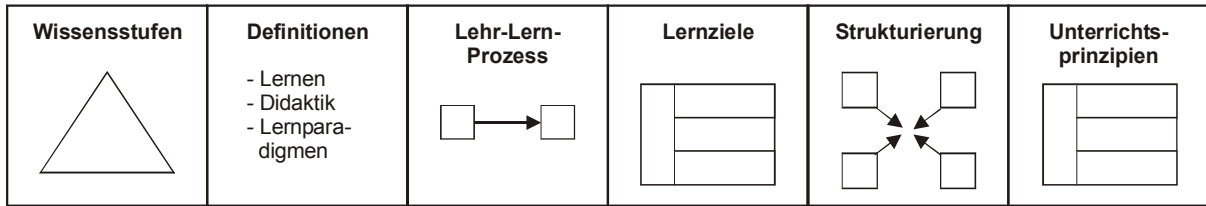
Eine methodisch-didaktische Grundlegung für eine multimediale, internetbasierte Präsentation mag auf den ersten Blick nicht notwendig erscheinen. Es gibt viele erfolgreiche Lehrbücher, die sich nie bewusst auf didaktische Theorien berufen. Der Philosoph und Pädagoge Friedrich Schleiermacher (1768-1834) verwies bereits vor 200 Jahren darauf, dass schon zwei Jahrtausende lang im europäischen Abendland systematisch sowie mit Erfolg erzogen und unterrichtet worden sei, ohne dass es eine pädagogisch-didaktische Theorie dafür gegeben habe [121]. Jeder Erwachsene hat ein Alltagsverständnis von Didaktik, da er selbst einmal in der Schule war. Dabei jedoch handelt es sich um implizite, subjektive Theorien, die sich nach Euler durch wissenschaftliche Betrachtung fast immer verbessern lassen [122]. Auch eine tele- und multimediale Präsentation kann nicht für sich wirken, sondern immer nur Teil und Hilfsmittel einer zu konzipierenden Lehr-Lern-Situation sein [123]. Effizient werden neue Medien nur dann eingesetzt, wenn ein didaktisches Problem damit optimal gelöst wird [8].

Aufgrund der Komplexität des Themas würde ein vollständiger Überblick über den Stand der Forschung im Bereich multimedialer Lernprogramme leicht den Umfang einer eigenen Dissertation ergeben. Deshalb erfolgt hier im Sinne einer Grundlegung eine gezielte Auswahl der in der Präsentation umgesetzten methodisch-didaktischen Themen mit den relevanten Definitionen und Paradigmen.

Nach der Definition elementarer didaktischer Begriffe wie Wissensstufen, Lernen, Didaktik und Lernparadigmen wird auf das dieser Arbeit zugrundeliegende Verständnis des Lehr-Lern-Prozesses eingegangen. Anschließend erfolgt eine knappe Darstellung der wichtigsten Unterrichtsprinzipien und die Extraktion der Grundzüge einer Mediendidaktik für das E-Learning aus der umfangreichen Literatur, die die wesentlichen Elemente Multimedia, Internet, Interaktion und Hypermedia beschreibt. Darüber hinaus wird eine Typologie rechnergestützter Lernprogramme dargestellt und die Rezeption von Text und Bild erläutert. Richtlinien und Empfehlungen zur Gestaltung von Texten und Bildern werden aufgrund der Komplexität des Themas nicht ausgeführt, sondern auf die verwendete Literatur verwiesen.

Die Programmentwicklung erfolgt nach dem Schema der Prototypenentwicklung, das in Kapitel 7 ausgeführt ist. Dort wird die Umsetzung der dargestellten methodisch-didaktischen Grundlegung exemplarisch an der Gestaltung einer Bildschirmseite verdeutlicht.

1. Allgemeine Didaktik



2. Mediendidaktik

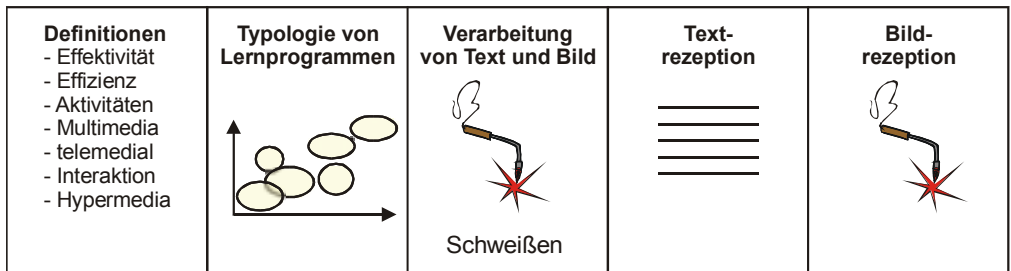


Bild 3-7: Gliederung der methodisch-didaktischen Grundlegung

3.4.1 Grundlegende Definitionen

3.4.1.1 Wissensstufen

In der heutigen pädagogischen Psychologie wird Lernen nicht mehr ausschließlich als Abspeicherung von Fakten gesehen, sondern in Funktion zum Aufbau von Handlungskompetenzen. Dazu wird das Wissen in Faktenwissen (deklaratives Wissen), Handlungswissen (prozedurales Wissen), Problemlösungswissen und Metakognition gegliedert [124], [125].



Bild 3-8: Die Wissenspyramide nach [124] und Baumgartner/Payr [125]

Deklaratives Wissen - Anfängertum

Die einfachste, statische Wissensform ist das sogenannte deklarative Wissen; "knowing that", wie es der Philosoph Gilbert Ryle 1969 bezeichnete [126]. Es handelt sich um Kenntnisse über Sachverhalte, Fakten, Ereignisse und Objekte. Handlungen, die lediglich in deklarativer Form gespeichert sind, können zwar erklärt, aber noch nicht selbst ausgeführt werden [123], [125].

Deklaratives Wissen lässt sich schnell aneignen: "Declarative knowledge can be acquired by simply being told." [127]. Die Speicherung erfolgt durch Beobachtung und externe Information. Diese Speicherung garantiert aber noch nicht die Abrufbarkeit der Information. Anwendung und Aufgabenlösung sind mühsam, da der Mensch auf einzelne niedrig vernetzte Konzepte des Langzeitgedächtnisses und auf inhaltsunspezifische Regeln zugreifen muss [123].

Prozedurales Wissen - Kompetenz

Zum Aufbau einer Handlungskompetenz ist deklaratives Wissen nicht ausreichend. Vielmehr muss ein dynamisches Wissen über die notwendigen Fertigkeiten aufgebaut werden. Dieses prozedurale Wissen nennt Ryle "knowing how". Eine Fertigkeit ist ein Verhalten, das aus einer komplexen Folge von Handlungen besteht und in festgelegter Weise wiederholt ausgeführt werden kann [124].

Problemlösungswissen und Metakognition - Expertentum

Problemlösungsstrategien sind spezielle Fertigkeiten hochkomplexer Art, für deren Ausbildung die Merkmale des Erwerbs prozeduralen Wissens gelten, und die nur über jahrelange Tätigkeit hinweg entwickelt werden ("The case is not in the book" [128]). Sie kennzeichnen die Wissensbasis eines Experten und sollen deshalb als separate Stufe mit aufgeführt werden. Unter Metakognition versteht man Wissen über die eigenen kognitiven Prozesse [124].

| Stufe | Lernelemente | Gespeichertes Wissen | Entscheidungsfähigkeit |
|----------------|---|--|------------------------|
| 3. Expertentum | Holistisches (ganzheitliches) Erkennen von Ähnlichkeiten in verschiedenen Problemstellungen | Deklarativ, Prozedural, Problemlösung, Metakognition | Intuitiv |
| 2. Kompetenz | Anwendung von Fakten und kontextfreien Regeln, Eigene Erfahrungen, "knowing how" | Deklarativ, Prozedural | Analytisch |
| 1. Anfängertum | Fakten und Regeln, "knowing that" | Deklarativ | Keine |

Tabelle 3-1: Wissens- und Lernstufen nach [124] und Baumgartner/Payr [125]

3.4.1.2 Lernen und Didaktik

Die Begriffe Pädagogik, Didaktik und Lernen werden in der Literatur nicht einheitlich verwendet. Bereits durch die Definition wird eine bestimmte gesellschaftlich-politische Einstellung oder Geisteshaltung wiedergegeben. Tabelle 3-2 zeigt die für diese Arbeit relevanten Definitionen.

| | |
|-----------|---|
| Pädagogik | – Verbindung von Praxis und Wissenschaft der Erziehung [129] |
| Didaktik | – Griechisch: didaskein = lehren, belehren, unterweisen, lernen [121] – Theorie und Praxis des Lehrens und Lernens [121] – Wissenschaft vom Unterricht [130] – "Didaktik als Wissenschaft vom Lehren und Lernen befasst sich vornehmlich mit der Erforschung, Initiierung, Förderung und Ergebnissen von Lehr-Lern-Prozessen sowie mit der Umsetzung deskriptiver Sätze in präskriptive Handlungsempfehlungen." [131] – Didaktik ist eine Methode, die Effektivität des Lernprozesses zu erhöhen. [121] |
| Lernen | – Erwerb von Wissen und Handlungskompetenz [132] – Zielgerichtete, relativ stabile Erweiterung von Handlungskompetenz [122] – Lernen ist ein aktiver Prozess der Konstruktion von Wissen und der Herausbildung kognitiver Fertigkeiten [131]. |

Tabelle 3-2: Definitionen von Pädagogik, Didaktik und Lernen

Die Didaktik beschäftigt sich somit mit der Gestaltung des Lehrens und Lernens. Zur Wissenschaft wird sie aber erst, wenn sie dies nicht nur auf der Ebene eines Regelwerks oder Lehrbuches tut, sondern auch darüber reflektiert und geeignete Modelle sowie Gesamtentwürfe aufstellt. Jank/Meyer [121] führen drei Ebenen der Didaktik auf:

- **Metaebene:** Verallgemeinerbare Reflexion über grundsätzliche Strukturmomente von Unterrichtsprozess, -planung, -analyse und ihre Rahmenbedingungen
- **Analyse** (Deskription) und **Planung** (Präskription) von Unterrichtsprozessen und Rahmenbedingungen
- **Prozessebene:** Konkrete Durchführung von Unterrichtsprozessen

3.4.1.3 Lernparadigmen: Behaviorismus, Kognitivismus und Konstruktivismus

Auf der obersten Ebene der Didaktik existieren drei große lerntheoretische Paradigmen, die nach Baumgartner/Payr [125] gleichzeitig die wichtigsten erkenntnistheoretischen Ansätze des 20. Jahrhunderts bilden.

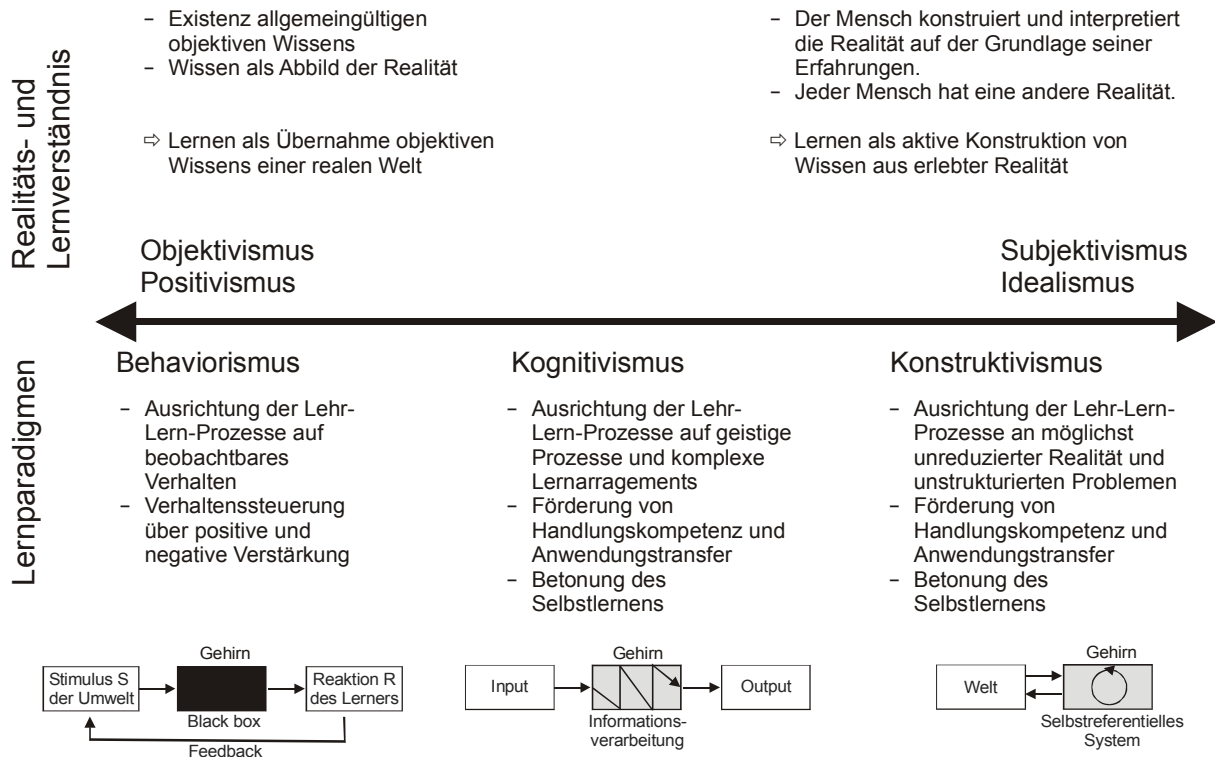


Bild 3-9: Realitätsverständnis und Lernparadigmen nach Baumgartner/Payr [125], [133]

1. Behaviorismus

Der Behaviorismus war das bestimmende Paradigma der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Behavioristische Lernstrategien gehen davon aus, dass Lernen als konditionierter Reflex durch Adaption erworben wird. In der Mediendidaktik muss ein Lehrprogramm nur den richtigen Stimulus präsentieren, um ein bestimmtes Verhalten hervorzurufen. An bewussten kognitiven Prozessen ist der Behaviorismus nicht interessiert. Dies resultiert nicht zuletzt aus der Sichtweise, dass man Probanden nicht "in die Köpfe schauen", sondern lediglich ihr Verhalten messen kann. Auch heute ist die Funktionsweise des Gehirns weitgehend ungeklärt und kann aus den messbaren komplexen verteilten Neuronenaktivitäten nicht erschlossen werden. Deshalb wird das Gehirn als Black Box angenommen und Fragestellungen zu seiner Funktionsweise den Philosophen überlassen. Ziel des Lernens ist es, auf eine Fragestellung die richtige Antwort geben zu können. Heutzutage wird diese Lerntheorie zur Erreichung kognitiver Lernziele (siehe Abschnitt 3.4.2) kaum noch verwendet, da das Reiz-Reaktions-Schema für den komplexen menschlichen Lernprozess viel zu einfach erscheint. Dagegen ist sie für das Trainieren körperlicher Fertigkeiten wie Maschinenschreiben oder Klavierspielen sehr erfolgreich anwendbar.

2. Kognitivismus

Der heute in der Anwendung verbreitete Kognitivismus berücksichtigt im Gegensatz zum Behaviorismus die inneren Prozesse der Informationsverarbeitung des menschlichen Gehirns. Da die Gehirnfunktionen nicht direkt beobachtbar sind, werden adäquate Wissensrepräsentationen gesucht, die auf einer abstrakten Ebene menschliche Denkprozesse wie Erinnern, Vergessen oder Lernen erklären können. Im Gegensatz zum Behaviorismus

steht nicht mehr die einzig "richtige" Antwort auf eine Fragestellung im Vordergrund, sondern das Erlernen von Methoden zur Problemlösung, deren Anwendung dann die "richtige" Antwort erzeugt.

3. Konstruktivismus

Seit Mitte der neunziger Jahre des 20. Jahrhunderts beherrscht der Begriff des Konstruktivismus die didaktische Diskussion. Nach den Paradigmen des Konstruktivismus ist es dem Menschen nicht möglich, die Realität unabhängig und objektiv wahrzunehmen (vergleiche Watzlawick [134]). Vielmehr konstruiert sich jeder Mensch durch Beobachtung seine eigene subjektive Wirklichkeit. Dies entspricht der Drei-Welten-Theorie nach Popper [135]. Lernen ist ein aktiver Prozess, in dem das Wissen nicht nach behavioristischem Verständnis transportiert wird, sondern der Mensch sein Wissen in Beziehung zu seinem Vorwissen in komplexen realen Lebenssituationen konstruiert. Lernziel ist nicht das Lösen von Problemen, die den Lernenden präsentiert werden, sondern die eigenständige Definition und Konstruktion von Problemen mit ihren Lösungen. Die Leistung eines Experten besteht gerade darin, in einer unbekanntem Situation zunächst die Probleme und Aufgaben zu konkretisieren, um sie dann lösen zu können. Der Konstruktivismus verspricht insbesondere den Aufbau von Wissen über Problemlösungsstrategien. Nach Kerres [123] wirkt der Begriff des Konstruktivismus allerdings wenig präzise. Es handelt sich um eine Verbindung von Ansätzen und Methoden zur Wahrnehmungs- und Lernpsychologie sowie zur Wissenschafts- und Erkenntnistheorie, die eher eine Weiterentwicklung des Kognitivismus als einen spezifischen Neuansatz darstellt. Die Lernparadigmen sind in Tabelle 3-3 zusammenfassend dargestellt.

| Kategorie | Behaviorismus | Kognitivismus | Konstruktivismus |
|-------------------------|--------------------------------------|--|---|
| Definition des Gehirns | Black Box | Informationsverarbeitendes Gerät | Informationell geschlossenes System |
| Wissen wird ... | gespeichert | verarbeitet | konstruiert |
| Definition von Wissen | Korrekte Eingabe-Ausgabe-Relation | Adäquater interner Verarbeitungsprozess | Mit einer Situation operieren können |
| Lernziele | Richtige Antworten | Richtige Methoden zur Antwortfindung | Komplexe Situationsbewältigung |
| Angestrebtes Wissen | Deklaratives und Prozedurales Wissen | Deklaratives und Prozedurales Wissen, Problemlösungswissen | Deklaratives und Prozedurales Wissen, Problemlösungswissen, Metakognitives Wissen |
| Paradigma | Reiz-Reaktion | Problemlösung | Konstruktion |
| Lehrstrategie | Lehren | Beobachten und Helfen | Kooperieren |
| Rolle des Lehrprogramms | Autorität | Tutor | Coach, Trainer |

Tabelle 3-3: Lernparadigmen von Behaviorismus, Kognitivismus und Konstruktivismus nach Baumgartner/Payr [125]

3.4.1.4 Instruktions- und Problemlösungsparadigma

Nach dem Instruktionsparadigma erfolgt Lernen am besten durch Anleitung und systemgesteuertes Lernen. Dieses Paradigma ist damit dem Behaviorismus und dem Kognitivismus zuzuordnen. Demgegenüber betont das Problemlösungsparadigma die eigenständige Bearbeitung komplexer Aufgaben zur Förderung aktiven selbstgesteuerten Lernens sowie zum Aufbau von Handlungskompetenzen unter Hilfestellung. Das Problemlösungsparadigma ist damit nach Euler [122] dem Kognitivismus und dem Konstruktivismus zuzuordnen.

3.4.1.5 Exploratives Lernen

Unter Explorativem Lernen wird ein entdeckender, forschender und autonomer Lernprozess verstanden. Er basiert auf dem menschlichen Neugiermotiv und wird durch neue, überraschende, inkongruente oder komplexe Informationen aktiviert. Er wird oft nicht als Lernaktivität erlebt, wenn Lernen in einem laienhaften Verständnis als langweilig und mühsam aufgefasst wird, während das eigene Erforschen mit großem Engagement scheinbar mühelos erfolgt. Exploratives Lernen zeichnet sich nach Kerres [123] und [136] durch folgende Merkmale aus:

- Lernende stecken sich selbst ein Lernziel
- Lernende initiieren verschiedenartige Handlungen
- Lernen erfolgt nicht als linearer Prozess, sondern spiralförmig
- Vollzug wird als befriedigend erlebt

Dem Explorativen Lernen stehen weitverbreitete subjektive Lerntheorien entgegen, die von einer reproduktiven Lernkonzeption ausgehen (behavioristisches Kopiermodell des Wissens). Weiterhin fördert die gängige Prüfungspraxis an Hochschulen die Reproduktion von zuvor auswendig Gelerntem und honoriert oft nicht die eigenständige Auseinandersetzung [123]. So bevorzugt ein großer Teil der Studierenden Lernsituationen, in denen selbständiges Lernen nicht erforderlich ist.

3.4.1.6 Selbstgesteuertes Lernen

Selbststeuerung ist die Fähigkeit der Lernenden, ihre Lernhandlung eigenständig zu steuern und zu kontrollieren. Nach Arzberger [137] finden dabei folgende Lernaktivitäten statt:

- Planung (Ort, Zeit, Hilfsmittel)
- Ausführung (bewusster Einsatz verschiedener Strategien)
- Kontrolle (Überwachung)
- Motivation (eigenständiges Setzen von Lernzielen, Aufrechterhalten der Motivation)

3.4.2 Lehr-Lern-Prozess

"Lehren ist weder eine notwendige noch eine hinreichende Bedingung für Lernprozesse."

Michael Kerres [123]

Lernen wird in dieser Arbeit nach Euler [122] im Sinne des Kognitivismus als ein innerer Prozess der Lernenden verstanden, der von außen nicht kausal-deterministisch geregelt, sondern nur durch Impulse gefördert werden kann. Lehren ist damit eine lernzielorientierte Gestaltung der Lernsituation. Zunächst werden Lehrziele festgelegt, die in statisch-finaler Betrachtungsweise in Lernziele transformiert werden (Bild 3-10). In dynamisch-prozessualer Betrachtung wird der Weg zur Erreichung eines Lernziels unter Berücksichtigung der Lernvoraussetzungen in Einzelschritte unterteilt. Dieser Lernprozess wird in den Lehrprozess rücktransformiert. Die Kopplung beider Prozesse erfolgt durch Kommunikation. Die Schnittmenge zwischen Lernergebnis und Lernziel stellt den Lernerfolg dar.

1. Festlegen von Lehrzielen

Lehrziel 1

Lehrziel 2

2. Transformation in Lernziele

(statisch-finaler Betrachtungsweise)

Wissensstufen:

1. Deklarativ
2. Prozedural
3. Problemlösungswissen
4. Metakognitives Wissen

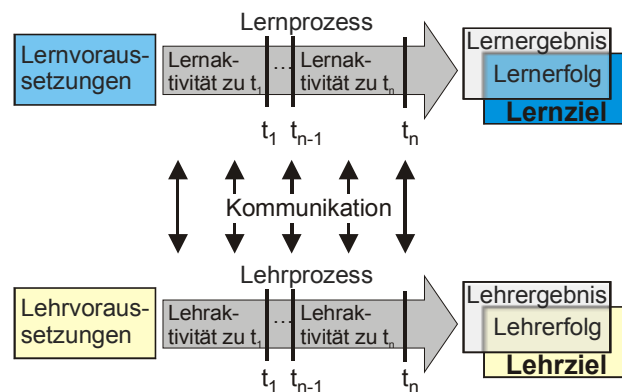
Lernziel 1

Lernziel 2

3. Konzeption des Lernprozesses

(dynamisch-prozessuale Betrachtungsweise)

- Unterteilen des Lernziels in Einzelschritte
- Klärung der Lernvoraussetzungen



4. Rücktransformation in den Lehrprozess

Verbindung von Lern- und Lehrprozess durch Kommunikation (Medien)

5. Messung des Lernerfolgs

Bild 3-10: Gestaltung eines kommunikativen Lehr-Lern-Prozesses nach Euler [122]

Lernziele

Lernziele lassen sich in die Rubriken kognitiv (geistig), affektiv (Emotionen, Empfindungen) und psychomotorisch untergliedern. Ferner kann eine Einteilung in Richt-/Leitziele (Kurs), Grobziele (Kapitel) und Feinziele (Lernschritte) erfolgen. Jank/Meyer [121] definieren Lernziele als sprachlich artikulierte Vorstellung über die zu bewirkende gewünschte Verhaltensdisposition der Lernenden. Für diese Arbeit am bedeutendsten sind kognitive Lernziele, die sich wie in Tabelle 3-4 einteilen lassen.

| Stufe | Bezeichnung |
|-------|-------------|
| 6 | Evaluation |
| 5 | Synthese |
| 4 | Analyse |
| 3 | Anwendung |
| 2 | Verstehen |
| 1 | Wissen |

Tabelle 3-4: Kognitive Lernziel-Hierarchie nach Jank/Meyer [121], Glöckel [130] und Schröder [138]

3.4.3 Unterrichtsprinzipien

Zur Gestaltung des Lehr-Lernprozesses richtet sich diese Arbeit nach universellen Unterrichtsprinzipien, die bei Schröder [138] und Glöckel [130] ausgeführt sind. Unterrichts- oder didaktische Prinzipien sind allgemeine Aussagen und in knappster Form ausgedrückte Handlungsanweisungen, die sich auf die Auswahl und Aufbereitung von Unterrichtsinhalten beziehen. "Prinzipien sind flexibler als Regeln und weniger zwingend als Gesetze, sie fordern ein bewegliches Entscheiden gemäß der Situation." (Glöckel [130]).

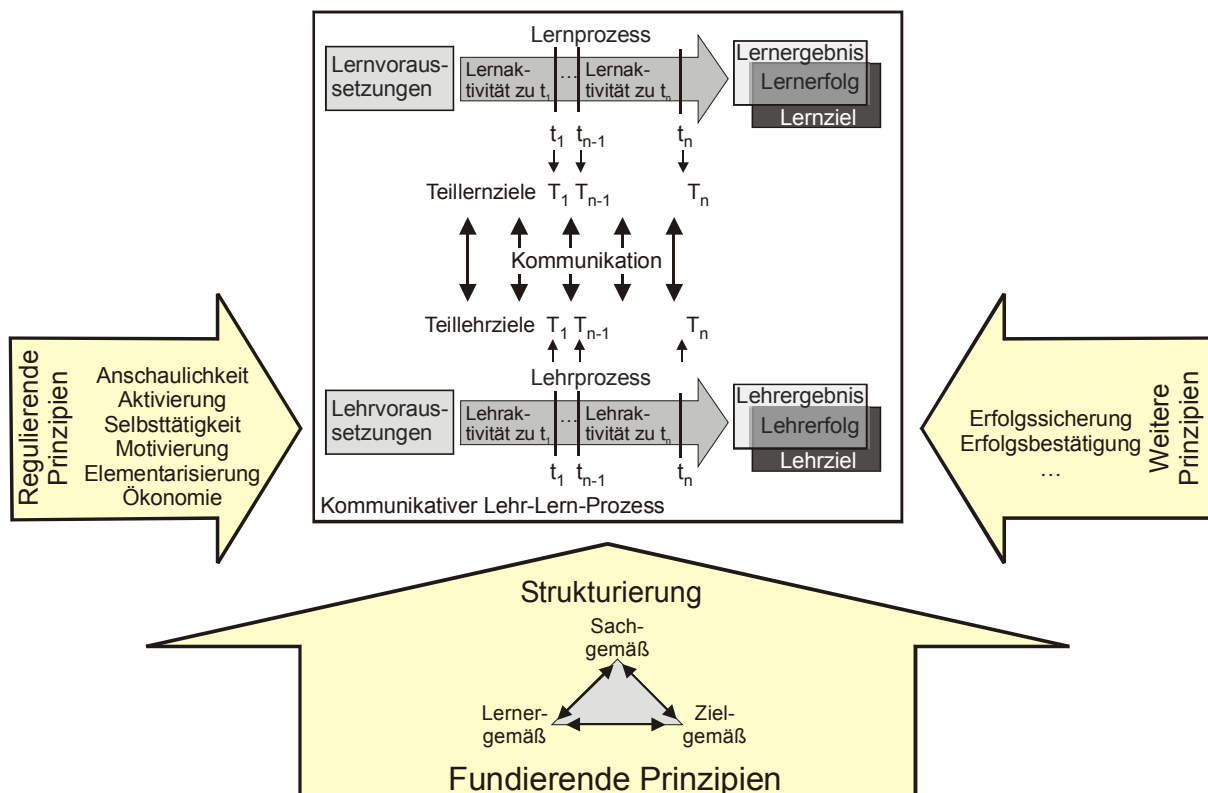


Bild 3-11: Kommunikative Lehr-Lern-Situation und Gestaltung durch Unterrichtsprinzipien (in Anlehnung an Schröder [138], Glöckel [130], Euler [122])

3.4.3.1 Strukturierung und fundierende Unterrichtsprinzipien

Zur Strukturierung einer Folge von Unterrichtseinheiten wie Vorlesungen, Lehrgängen oder Kursen existieren nach Glöckel [130] verschiedene Grundtypen, die sich, wie in Bild 3-12 dargestellt, visualisieren lassen. In der Praxis werden meist mehrere Grundtypen in verschiedenen Abschnitten des Unterrichts kombiniert. Aufgrund der Komplexität der Thematik erfolgt die Darstellung der Strukturierungsmöglichkeiten nachstehend in kompakter Tabellenform. Für weitergehende Ausführungen sei auf Glöckel [130] und Schröder [138] verwiesen.

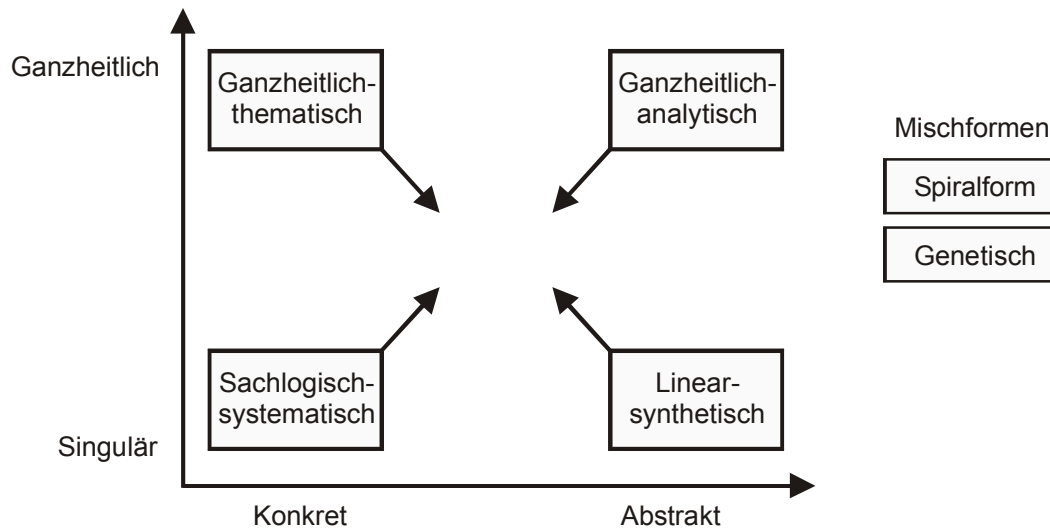


Bild 3-12: Möglichkeiten der Unterrichtsstrukturierung

Unter den fundierenden Unterrichtsprinzipien versteht man die Orientierung am Lerngegenstand (sachgemäß), an den Lernenden (lernergemäß) und am Lernziel (zielgemäß). Die wichtigsten regulierenden Unterrichtsprinzipien sind Anschaulichkeit, Aktivierung und Selbsttätigkeit, Motivierung, Elementarisierung durch Reduktion und Restitution sowie Ökonomie. Um eine knappe und prägnante Darstellung zu ermöglichen, werden diese Prinzipien aufgrund ihrer Komplexität nachfolgend in Tabellenform dargestellt. Für weitergehende Ausführungen wird auf die angegebene Literatur verwiesen.

Neben den aufgeführten Unterrichtsprinzipien existieren noch weitere Grundsätze wie die Erfolgssicherung durch Aufarbeitung, Wiederholung, Übung, Anwendung und Lernerfolgskontrolle sowie die Erfolgsbestätigung durch Vermittlung von Kenntnissen über Erfolg oder Misserfolg des Lernverhaltens. Diese Grundsätze werden in der angegebenen Literatur erläutert.

Von den fundierenden Unterrichtsprinzipien abzugrenzen ist der Begriff des "didaktischen Dreiecks", der beispielsweise zur Skizzierung einer Hochschuldidaktik verwendet werden kann. Lehre und Studium werden dabei in einem Dreieck aus Lehrenden, Lernenden und wissenschaftlichem Wissen lokalisiert. Für weitere Ausführungen vergleiche [139].

| | | |
|---------------------------------|------------|--|
| Linear-synthetisch | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Das Gesamtwissen wird analytisch in Einzelbausteine zerlegt. Diese werden in systematischer, linearer Abfolge vermittelt, um aus den Bausteinen immer größere Einheiten zu bilden. – "Synthetisch" wird in seiner griechischen Bedeutung "Zu einem Ganzen zusammensetzen" verwendet. – Der Aufbau ist an der Sache orientiert. – "Prinzip Legosteine" [130] |
| | Beispiel | <ul style="list-style-type: none"> – Beispiel: Buchstaben- und Schreibmaschinenlernen – Höhere Mathematik: Lernen einzelner Verfahren zur Lösung von Differentialgleichungen ohne konkrete Anwendung |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Der Aufbau ist durchsichtig, konsequent, zielstrebig und auch von weniger gut ausgebildeten Lehrenden anwendbar. – Die Lösung komplexer Probleme wird erleichtert, wenn zunächst das notwendige "Handwerkszeug" erlernt wird. |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Die Lernenden verstehen die Einzelbausteine noch nicht. – Der logisch richtige Ablauf ist nicht immer der psychologisch richtige. – Es findet ein "Vorratslernen" zunächst unverstandener Elemente statt. – Lernende dürfen keinen Lernschritt versäumen. |
| Ganzheitlich-analytisch | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Zunächst werden die fundamentalen, ganzheitlichen Grundprinzipien ("Basiskonzepte") und die Struktur eines Fachgebiets vermittelt und aus diesen die Teilsachverhalte und Einzelelemente abgeleitet. – "Analyse" wird in seiner griechischen Bedeutung "In Bestandteile zerlegen" verwendet. |
| | Beispiel | <ul style="list-style-type: none"> – Darstellung einer Hauptgruppe (z.B. Fügen) und ihrer gemeinsamen Kenngrößen; dann Übergang auf einzelne Fertigungsverfahren (z.B. Laserstrahlschweißen) |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – In der anfangs erlernten Grundstruktur eines Faches lassen sich die Unterthemen leicht einordnen und verankern. |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Geringe Anschaulichkeit der ganzheitlichen abstrakten Sachverhalte – Schlechte Motivation der Lernenden |
| Ganzheitlich-thematisch | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Gewinnung fachspezifischer Einsichten aus gründlicher Vertiefung in einzelne aus dem Fach oder der Lebenswirklichkeit gewählte problemhaltige Themen – An einzelnen Fällen wird das komplexe Ganze erkannt. |
| | Beispiel | <ul style="list-style-type: none"> – Orientierung an konkreten "Case studies" (Planspielen) in MBA-Studiengängen im Gegensatz zur eher abstrakten Orientierung in BWL-Studiengängen (z.B. Vorlesung Personal, Vorlesung Marketing, Vorlesung Logistik, ...) |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Vermittlung von Handlungskompetenz; anschaulich und interessant |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Eine systematische Ableitung des abstrakten ganzheitlichen Wissens ist schwierig. |
| Sachlogisch-systematisch | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Vermittlung eines abgegrenzten Gesamtrahmens in systematisch-planmäßigem Aufbau |
| | Beispiel | <ul style="list-style-type: none"> – Darstellung einzelner Fertigungsverfahren (z.B. Laserstrahlschweißen mit Nd:YAG-Laser, Kleben von Kunststoffen, Lötten von SMDs) und daraus Ableitung der Hauptgruppe "Fügen" und ihrer Charakteristika ohne Bezug auf die anderen Hauptgruppen |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Vermittlung von Grundbegriffen und Zusammenhängen – Strukturierung der Wirklichkeit |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Das Aufbauprinzip wird aus der Sache gewonnen und nicht aus Lernvoraussetzungen. – Die Lernenden dürfen keinen Lernschritt versäumen. |

Tabelle 3-5: Grundtypen der Unterrichtsstrukturierung nach Glöckel [130]

Sonder-/Mischformen

| | | |
|-------------------|------------|--|
| Genetisch | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Nachvollzug des Entwicklungsgangs im Lehrgangsaufbau – Realgenetisch: Chronologische Entwicklung (Beispiel Geschichtsunterricht) – Problemgenetisch: Werdegang der menschlichen Erkenntnis des Lerngegenstands |
| | Beispiel | – Erklärung der Gesetze der Mechanik: klassisch - Newton - Einstein |
| | Vorteile | – Das laienhafte Verständnis entspricht oft älteren Theorien, die psychologisch näher liegen. Wird dagegen ausschließlich das heutige Verständnis unterrichtet, bleibt das wissenschaftliche Weltbild fremd. |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Oft existiert keine geradlinige Entwicklung. – Das Wissen über frühere Entwicklungen ist heute nur begrenzt relevant. |
| Spiralform | Definition | – Mehrmaliger Durchgang eines Fachgebietes, Ergänzung und Vertiefung des Bekannten auf höherem Verständnisniveau |
| | Beispiel | <ul style="list-style-type: none"> – Mehrfacher Ablauf des Geschichtsunterrichts von der Urzeit bis in die Gegenwart in der Mittel- und in der Oberstufe einer Schule – Überblicksorientierte Darstellung der Umformtechnik in einer Vorlesung des Grundstudiums; Detaillierung und Fokussierung auf einzelne Verfahren mit einfachen Berechnungen im Pflichtfach des Hauptstudiums; weitere Durchdringung dieser Verfahren im Vertiefungsfach |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Der Aufbau ist an den Lernenden orientiert. – Der Lernprozess entspricht dem Lernen im Leben. – Eine Anknüpfung an das Vorwissen der Lernenden ist leicht möglich. |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Es erfolgt keine vollständige Abhandlung eines Sachgebiets. – Der sachlogische Aufbau wird zerrissen. – Wiederholungen – "Wenn das Lernen wie im Leben genüge, bedürfte es der Schule nicht." [130] |

Tabelle 3-6: Mischtypen der Unterrichtsstrukturierung nach Glöckel [130]

| | |
|---------------|--|
| Sachgemäß | <ul style="list-style-type: none"> – Ausrichtung am zu vermittelnden Sachverhalt – Wissenschaftsorientiert – Klare Methodik – Gegen Überbetonung der psychologisch-didaktischen Elemente im Unterricht |
| Lernergemäß | <ul style="list-style-type: none"> – Abgestimmt auf die Zielgruppe: Gestaltung des Unterrichts ausgehend von Entwicklung, Lebensraum, Individualität der Lernenden – Gegen Überbetonung des Sachanspruchs – Angemessenheit und Passung durch Verbesserung der Techniken, Methoden, Formen, Lehrpläne – Didaktische Vereinfachung – Betonung der Lebensnähe gegenüber der Abstraktion – Bildung des Theorieverständnisses – Lernergemäßheit kann durch Differenzierung entstehen (z.B. Auflösung einer heterogenen Gruppe in Gruppen mit homogenen Lernvoraussetzungen). |
| Zielgemäßheit | <ul style="list-style-type: none"> – Jeder Unterricht soll auf mehreren Ebenen Ziele verfolgen. – Beispiele: Orientierung an einem Bildungsideal; Vermittlung von Handlungskompetenz – Anwendung von Lernziel-Hierarchien (siehe Tabelle 3-4) |

Tabelle 3-7: Fundierende Unterrichtsprinzipien nach Glöckel [130]

3.4.3.2 Regulierende Unterrichtsprinzipien

| | | |
|--|------------|---|
| Anschaulichkeit | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Anschaulichkeit wird erreicht, indem der Lehrstoff so dargeboten wird, dass die Lernenden ihn mit ihren Sinnesorganen entsprechend ihrer Auffassungsfähigkeit umfassend und zutreffend erkennen können (Schröder [138]). – Grundgedanke: Die äußere und innere Wahrnehmung erfolgt über die Sinne, denn Verben wie "einsehen, erfassen, begreifen" zeigen, dass Denken ohne sinnliche Wahrnehmung nicht möglich ist. |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Orientierung am natürlichen Erkenntnisvorgang der Lernenden – Erleichterung des Verständnisses |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Anschaulichkeit (Wirklichkeitsnähe, Vorstellungsklarheit) führt auch zum "Hängenbleiben" am Detail. Abstraktion hebt dagegen das Wesentliche heraus und schafft Strukturen, führt aber zur Gegenstandsferne. – Erkenntnis wächst nur im Wechsel von Konkretion und Abstraktion, von Analyse und Synthese, von Induktion und Deduktion, von genetischem Aufbau und systematischer Ordnung. |
| | Methoden | <ul style="list-style-type: none"> – Präsentation realer Gegenstände, Bauteile – Modelle – Bildhafte Darstellung (Zeichnung, Foto, Animation, Film) – Verwendung von Schemata und Symbolen – Didaktische Regeln <ul style="list-style-type: none"> • Lenkung der Beobachtung • Keine Übersättigung • Vertiefung (nicht nur oberflächliche Betrachtung) • Eigeninitiative: Sachverhalte selbst erkunden • Hilfsmittel: Nutzung von Medien |
| Aktivierung und Selbsttätigkeit | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Aktivierung heißt, die Lernenden anzuregen und ihnen die Möglichkeit zu geben, im tätigen Umgang mit den Dingen Lernerfahrungen zu erwerben (Schröder [138]). – Die Tätigkeit der Lernenden wird schon im Behaviorismus vorausgesetzt. – Denken wird durch Handeln verursacht (Schröder [138]). |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Höhere Motivation, besseres Verstehen und größerer Lernerfolg durch selbst erarbeitete Sachverhalte |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Gefahr der Überforderung der Lernenden – Gefahr, Lernziele nicht zu erreichen – Selbständiges Lernen erfordert viel Zeit und Energie und ist damit unökonomisch. |
| | Methoden | <ul style="list-style-type: none"> – Einbeziehen der Lernenden in den Lehrprozess – Fragen an die Lernenden – Aufgaben zur Eigenbearbeitung – Exploratives Lernen |

Tabelle 3-8: Regulierende Unterrichtsprinzipien nach Glöckel [130] (1)

| | | |
|--------------------------|------------|---|
| Motivierung | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – "Weckung und Berücksichtigung von Lern- und Leistungsbedürfnissen der Lernenden." (Schröder [138]) – Grundgedanke: Man kann die Lernenden nicht motivieren, sondern nur Motivationshilfen anbieten, die sie annehmen oder ablehnen können. – Unterteilung: intrinsische, persönliche Motivation (z.B. Interesse, Herausforderung, Befriedigung) und extrinsische Motivation (Motivation durch externe Faktoren, z.B. Lob, Strafe, Gehalt) |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Motivierung ist Voraussetzung für das Lernen. |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Gefahr der Übersättigung – Vernachlässigung der Selbstverantwortung der Lernenden |
| | Methoden | <ul style="list-style-type: none"> – Weckung der Aufmerksamkeit, Erhaltung, Differenzierung im Schwierigkeitsgrad; Steigerung von allgemeiner Lernbereitschaft und speziellem Interesse für einzelne Sachverhalte – Interessanter Unterrichtsbeginn, der die Lernenden zügig an die Sache heranführt – Kleine Hilfen zur Erhaltung und Steigerung des Interesses auf den trockenen und schwierigen Stufen – Durchtragende Leitgedanken, folgerichtiger Aufbau, klare Gliederung – Gründliche, aber nicht langatmige Arbeit an der Sache, Festhalten der Teilergebnisse, Bestätigung von Teilerfolgen – Richtiges Maß an neuem Stoff, das weder langweilt noch überfordert – Positiv gestimmter Abschluss mit Rückblick auf das Gelernte, Bestätigung des guten Verlaufs und Erfolgs, Ausblick auf das Kommende |
| Elementarisierung | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Elementarisierung besteht aus Reduktion und Restitution. – Unter didaktischer Reduktion versteht man eine Vereinfachung und Elementarisierung der Lerninhalte durch Herausarbeiten von Prinzipien und Weglassen von Details. – Gegenprinzip: didaktische Restitution |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Erleichterung des Verständnisses |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Zu starke Vereinfachung |
| | Methoden | <ul style="list-style-type: none"> – Reduktion: Prägnantes Beispiel - Weglassen von Details - Darstellung am konkreten Fall - Strukturierung - Schematisierung - sprachliche Vereinfachung – Restitution: Ausweitung auf schwierige Fälle - Hinzufügen weggelassener Elemente - Füllung des Schemas mit Details - Verallgemeinerung - Überführen auf höhere Abstraktionsebene - Fachsprache |
| Ökonomie | Definition | <ul style="list-style-type: none"> – Optimierung des Aufwands für die Lehrenden (Vorbereitung, Erstellung der Medien) und für die Lernenden (Zeitaufwand, einzusetzende Ressourcen) – Unterscheidung zwischen Effektivität und Effizienz (siehe Abschnitt 3.4.4.1) – Ziel des Unterrichts ist nicht die Maximierung, sondern die Optimierung von Aufwand und Ertrag des Lehr-Lern-Prozesses. |
| | Vorteile | <ul style="list-style-type: none"> – Eine unverhältnismäßige Steigerung des Lehr- und Lernaufwands wird vermieden. |
| | Nachteile | <ul style="list-style-type: none"> – Der Nutzen des Lernens ist nur schwer messbar. Damit kann der Lehr- und Lernaufwand nicht genau bewertet werden. |
| | Methoden | <ul style="list-style-type: none"> – Kalkulation der materiellen und personellen Mittel sowie der eingesetzten Zeit |

Tabelle 3-9: Regulierende Unterrichtsprinzipien nach Glöckel [130] (2)

3.4.4 Mediendidaktik

Die traditionelle Medienforschung vergleicht die Lernwirksamkeit verschiedener Medien miteinander. Dabei lässt sich meist nicht die Lernwirksamkeit von Medien an sich untersuchen, sondern nur von "treatments", also von Lehrmethoden mit bestimmten Medien [132]. Eine hohe didaktische Qualität kommt zustande, wenn ein Bildungsproblem durch Konzeption, Entwicklung und Einführung des Mediums als Element einer Lernumgebung gelöst wird. Die Ziele des Medieneinsatzes liegen nach Kerres [123] in einer Steigerung des Lernerfolgs und einer Reduktion des Lehr-Lern-Aufwands. Im Lehr-Lern-Prozess erfüllen die Medien folgende Aufgaben: [123], [132]

- Wissens(re)präsentation: Darstellung und Organisation von Wissen
- Wissensvermittlung: Steuerung und Regelung des Lernprozesses
- Wissenswerkzeug: Medien- und Kommunikationstechniken als Werkzeug zur Erarbeitung, Sammlung, Aufbereitung und Kommunikation von Wissen

3.4.4.1 Grundlegende Definitionen

Effektivität und Effizienz

Informationen werden immer in einem Symbolsystem übermittelt (Code). Medien strukturieren dieses Symbolsystem ihren Eigenschaften entsprechend. In der Medienkonzeption muss deshalb eine explizite und vollständige Planung des Lehr-Lern-Prozesses stattfinden. Daraus ergibt sich eine deutlich aufwendigere Planung als bei personalem Unterricht. Zu unterscheiden ist nach Kerres [123] zwischen der **Effektivität** mediengestützten Lernens, die den absoluten Lernerfolg kennzeichnet (beispielsweise "Rechnereinsatz ist besser als andere Maßnahmen"), und ihrer **Effizienz**, die ein Maß für den relativen Lernerfolg darstellt (beispielsweise "Mit welchem Gesamtaufwand kann im Vergleich zu anderen Maßnahmen der relativ größte Effekt erzielt werden?"). Diese Begrifflichkeit wird auch in [140] und in der DIN 9241-11 [141] verwendet. Wenn der Aufwand für den Rechnereinsatz wesentlich geringer ist als für konventionellen Unterricht, kann auch ein geringerer Lernzuwachs akzeptiert werden. Umgekehrt kann ein Rechnereinsatz zwar effektiv, aber nicht effizient sein, wenn einem Lernzuwachs gegenüber konventionellem Unterricht ein sehr hoher Programmieraufwand und für die Lernenden ein hoher Lernaufwand gegenübersteht. Darunter fallen beispielsweise zeitliche Dauer, mentaler Aufwand und Gewöhnung an mediengestütztes, selbstgeregeltetes Lernen. So nimmt Kerres [123] folgende Schätzwerte für die Erstellung von Lernmedien an:

- 20-248 Arbeitsstunden und 10.000-30.000 Euro Aufwand pro Lernstunde (ohne Videos und Computeranimation)
- 1.000-2.000 Euro pro Minute für hochwertiges Video
- 500 Euro pro Sekunde für hochwertige Computeranimation

Lehr-Lern-Aktivitäten

Mediale Lernumgebungen sind nach Kerres [123] planmäßig gestaltete Arrangements, in denen auf Grundlage technischer Medien möglichst lernförderliche Bedingungen geschaffen werden. Es handelt sich um eine Sammlung unterschiedlicher Arten von Medien und Hilfsmitteln, die so aufbereitet sind, dass der Lernprozess und die Eigenaktivität der Lernenden gefördert werden. Die bewusste Planung und Regelung des Lernprozesses ist Teil der gestalteten Lernumgebung. Nach Gagné [142] lässt sich erfolgreiches Lehren und Lernen durch neun zielgerichtete Aktivitäten der Lernenden darstellen, die durch korrespondierende Aktivitäten des Lehrsystems ausgelöst werden (vergleiche Tabelle 3-10).

| | Aktivität Lehrsystem | Aktivität Lernsystem |
|---|--|---|
| 1 | Aufmerksamkeit erzielen | Konzentration mobilisieren |
| 2 | Lehrziele mitteilen | Realistische Erwartungen über Lernergebnis aufbauen |
| 3 | An Vorwissen anknüpfen | Langzeitgedächtnis aktivieren |
| 4 | Lernmaterial präsentieren | Lernmaterial wahrnehmen |
| 5 | Lernhilfen anbieten | Übernahme in Langzeitgedächtnis durch semantische Enkodierung fördern |
| 6 | Gelerntes anwenden | Rückschlüsse auf Lernergebnisse ermöglichen |
| 7 | Rückmeldung geben | Diagnostische Information und Verstärkung geben |
| 8 | Leistung testen | Hinweise zur Verfügung haben, die bei der Erinnerung benötigt werden |
| 9 | Behaltensleistung und Lerntransfer fördern | Leistung in neuen Situationen erproben |

Tabelle 3-10: Instruktionale Ereignisse für erfolgreiches Lehren und Lernen nach Gagné [142]

Tele- und Multimedia

"Multimedia ist sicherlich kein Allheilmittel gegen jede Art von Problemen der Informationsvermittlung [...], es ist aber auch kein Placebo. Multimedia beinhaltet vielmehr eine auf Digitalisierung und Kompression beruhende integrative Medientechnik, die vielfältige Nutzungsmöglichkeiten schafft. Für Informationsvermittlung und Lernen nach dem Grundkonzept des aktiven Wissenserwerbs eignet sich Multimedia [...] besonders" (Issing/Klimsa [143]). Notwendige Bedingung für den erfolgreichen Einsatz von Multimedia ist die Berücksichtigung psychologisch-didaktisch fundierter Lehr-Lernmethoden. Für "Medien" und "Multimedia" existiert eine Vielzahl von Definitionen, beispielsweise bei Schröder [138], Glöckel [130], Weidenmann [132] oder Issing/Klimsa [143]. "Alle Definitionsversuche werfen allerdings mehr Fragen auf, als sie Antworten zu geben vermögen" (Kerres [123]). Der Medienbegriff ist doppeldeutig: Er kann sowohl für den Träger von Informationen ("delivery system") als auch für die übermittelten Informationen selbst stehen ("media content") [123]. Ferner nehmen manche Autoren auch Komponenten wie Interaktivität und verschiedene Anwendungsdimensionen in den Überbegriff Multimedia auf. Für die vorliegende Arbeit soll daher als kleinster gemeinsamer Nenner die nachfolgend aufgeführte Definition gelten.

Multimedia ist eine technische Darstellungsform, die verschiedene Medien verknüpft und elektronisch präsentiert. Als Medien werden verstanden:

- Texte
- Bilder (Abbilder und symbolische Bilder)
- Audiomedien
- Videomedien (Filme und Computeranimationen)
- Audiovisuelle Medien

Die Einzelmedien übernehmen nach Issing/Klimsa [143] Funktionen, die im herkömmlichen Unterricht vom Lehrer wahrgenommen werden. In motivationaler Hinsicht soll eine allgemeine Lernbereitschaft durch zielgerichtete Entwicklung intrinsischer Motivation gefördert werden. In kognitiver Hinsicht soll durch Konkretisierung der Lerngegenstände (beispielsweise durch Visualisierung und Animationen) eine Erweiterung des Erfahrungsbereichs der Lernenden erzielt werden. Durch den Einsatz von Multimedia werden folgende Vorteile erwartet: [123]

- Steigerung der didaktischen Qualität
- Steigerung der Effizienz der Bildungsarbeit
- Reorganisation (dezentrales, selbstgesteuertes Lernen)
- Erschließung neuer Zielgruppen
- Imageeffekte

Sind diese Einzelmedien über das Internet weltweit ohne Beschränkung telemedial verfügbar, wird ein Maximum an Flexibilität sowie selbstgesteuertem, orts- und zeitungebundenem Handeln erreicht. Dies schließt nicht aus, dass die Distribution der Medien zusätzlich auf Datenträgern wie CD-ROMs erfolgen kann. Damit stellt die tele- und multimediale Präsentation einer Dissertation eine wesentliche Erweiterung dar gegenüber der reinen Distribution einer gedruckten Arbeit über das Internet, wie sie beispielsweise der Shaker-Verlag anbietet [11].

Interaktion und Hypermedia

Der Begriff der Interaktion stammt aus dem Lateinischen (inter = zwischen und agere = handeln) und stellt eine Eigenschaft von Programmen dar, die dem Benutzer eine Reihe von Eingriffs- und Steuermöglichkeiten eröffnet [144]. Der Begriff Hypermedia beinhaltet eine Kombination von Hypertext und Multimedia. Der Grundgedanke des Hypertextes besteht darin, den Inhalt eines Gegenstandsbereichs in einzelne Informationseinheiten aufzugliedern und in Form von Knoten und Verbindungen in Netzwerkform zu repräsentieren. Während bei Hypertext lediglich das Medium Text dargeboten wird, können bei Hypermedia alle Arten von Medien verwendet werden [145]. Neben semantischen Verknüpfungen zur Exploration der Lerninhalte und der Durchführung konkreter Übungsaufgaben bestehen in einer Hypermedia-Lernumgebung pragmatische Verknüpfungen zur Orientierung, Steuerung und Hilfe. Für den Einsatz von Hypermedia-Systemen sprechen nach [144] aus didaktischer Sicht folgende Gründe:

1. Lerninhalt (Gegenstandsbereich)

- Wissensbereiche sind oft komplex und eine optimale Reihenfolge in der Rezeption kann nicht ermittelt werden. Die Wissensbereiche können gut mit verschiedenen Codierungen dargestellt werden.

2. Lerner-Komponente

- Die Navigation erfolgt selbstgesteuert. Sie ist geleitet durch individuelle Interessen und Ziele der Lernenden.
- Kognitive Plausibilität: Es bestehen gewisse Ähnlichkeiten zwischen Hypermedia und der menschlichen netzwerkartigen Wissensrepräsentation im Langzeitgedächtnis, auch wenn die Struktur des menschlichen Gedächtnisses wesentlich komplexer ist [123].
- Konstruktives, aktives Lernen wird gefördert.
- Kontextgebundenes Lernen: In kognitiven Strukturen werden Zwecke und Situationen mental repräsentiert, in denen das Wissen erfolgreich angewendet werden kann.

3. Pädagogisch-didaktisch

- Der Hypermedia-Einsatz ist sinnvoll, wenn keine klare Struktur besteht, eine Darstellung aus unterschiedlichen Fachdisziplinen sinnvoll ist oder eine fallorientierte Darstellung gewählt wird.
- Ermöglichung eines selbstgesteuerten, konstruktiven Lernens
- Förderung der kognitiven Flexibilität
- Die Wissensnutzung kann in praktischen Anwendungssituationen (beispielsweise fallbasiert) erfolgen.
- Interaktivität fördert die Handlungskompetenz und nicht nur den Erwerb deklarativen Wissens.
- Anpassungsfähigkeit an unterschiedliche Zielgruppen

4. Technologisch [123]

- Bildungspolitisch: Schaffung von Lernumgebungen zur Realisierung offenen und flexiblen Lernens
- Erwerb von Handlungskompetenz mit Hypermedia
- Ein Simultaneous Engineering des Systems durch mehrere Autoren wird wesentlich erleichtert.

3.4.4.2 Typologie rechnergestützter Lernprogramme

Moderne Lernprogramme können nach ihrer Zuordnung zum Kognitivismus oder Konstruktivismus eingeteilt werden. Die programmierte Unterweisung und Programme zum "drill & practice" folgten in den 60er Jahren ursprünglich dem Paradigma des Behaviorismus, orientieren sich aber heute weitgehend am Kognitivismus, da die inneren Prozesse der Lernenden bewusst bei der Lernprozessplanung mit einbezogen werden. Demgegenüber sind Simulationen stark am Konstruktivismus orientiert. In Anlehnung an Baumgartner/Payr [125] und Euler [146] lässt sich folgende Klassifikation von Lernsoftware (CBT Computer Based Training) ableiten:

| Variante | Beschreibung, Ziele, Vorteile, Beispiele |
|--|---|
| 6. Mikrowelt ("virtual reality") | <ul style="list-style-type: none"> – Nicht parametrisierte Entscheidungssituationen – Es wird keine vorgegebene Situation definiert, sondern die Lernenden müssen diese Situation selbst schaffen. |
| 5. Simulation | <ul style="list-style-type: none"> – Modellhaft verkürzte parametrisierte Entscheidungssituationen – Analyse, Suche nach Lösungen und Veränderung von Modellen, die mittels mathematischer Relationen und Parametern zur Problemlösung beschrieben werden – Beispiel: LASIM-Lasersimulator für die Ausbildung (Bereich Anwendung) [147], [148] |
| 4. Tutorensystem ("tutorial") | <ul style="list-style-type: none"> – Vermittlung neuer Inhalte eines Fachgebiets und Überprüfung des Lernerfolgs nach dem Instruktionsparadigma – Vermittlung und Einübung vorwiegend prozeduralen Wissens (Regeln und ihre Anwendung) – Beispiel: LASIM-Lasersimulator für die Ausbildung (Bereich Ausbildung) [147], [148] |
| 3. Drill- und Testsoftware ("drill & practice") | <ul style="list-style-type: none"> – Einübung und Festigung vorhandenen Wissens durch einen Aufgabenpool nach dem Anwendungsparadigma – Beispiele: Vokabeltrainer, Maschinenschreibtrainer, Lernprogramm zur Führerscheinprüfung |
| 2. Tele- und multimediale Präsentation | <ul style="list-style-type: none"> – Verwandt mit Präsentations- und Visualisierungssoftware; ergänzt durch interaktive Möglichkeiten der Darstellung – Standardisiertes Hypermedia-System zur Navigation – Zeit- und ortsungebundener Zugriff auf alle Informationen – Nutzung von frei verfügbaren Standardprogrammen ("browsern", "viewern") zur Darstellung |
| 1. Präsentationsprogramm | <ul style="list-style-type: none"> – Weiterentwicklung der statischen Darstellung mit Overheadfolien und Dias – Nur geringe Möglichkeiten der Interaktion – Leichtere Handhabung: Integration aller Medien in ein Präsentationsprogramm – Verbesserung der Rezeption und Memorierung der Lerninhalte |

Tabelle 3-11: Typologie rechnergestützter Lernprogramme (in Anlehnung an Baumgartner/Payr [125] und Euler [146])

Ordnet man in Anlehnung an Bodendorf [149] diese Varianten den Kategorien Lernerinitiative, Lernparadigma und Systemflexibilität/Programmieraufwand zu, so ergeben sich die in Bild 3-13 dargestellten Ordnungen. Eine hohe Lernerinitiative geht durch die Förderung von Rezeption und Memorierung mit einem hohen didaktischen Nutzen einher. Eine hohe Systemflexibilität erfordert auch einen hohen Programmieraufwand und muss sich der Frage der Ökonomie und Effizienz stellen.

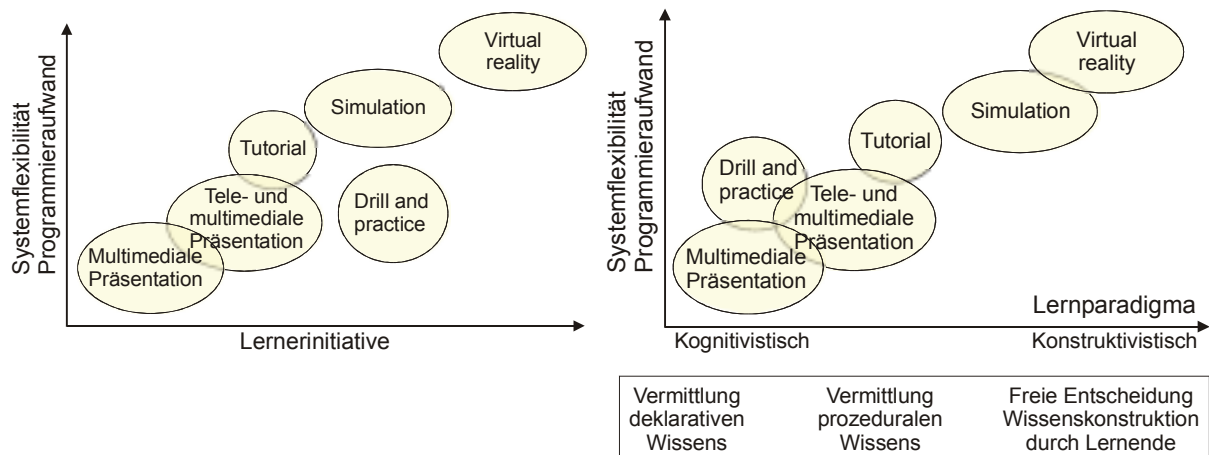


Bild 3-13: Klassifizierung von Lernsystemen nach Lernerinitiative, Lernparadigma und Systemflexibilität/Programmieraufwand (in Anlehnung an Bodendorf [149])

Eine Erhöhung der Lernerinitiative kann beispielsweise durch die Förderung Explorativen Lernens oder mit Hilfe von Kontrollfragen erreicht werden. Regelmäßige obligatorische Lerntests werden allerdings oft von den Lernenden abgelehnt. Eine höhere Akzeptanz besteht bei hypertextuellen Aktionsräumen und bei Einbettung der Tests in eine Anwendung [123].

Während die Lernprogramme, die in Tabelle 3-11 auf den unteren Ebenen angeordnet sind, sich eher für die "niedrigeren" Lernzielhierarchien eignen, sind Simulationen und die Erzeugung einer "virtual reality" zum Erwerb von prozeduralem und Problemlösungswissen besonders geeignet. Eine Simulation jedoch darf in einem Lehr-Lern-Prozess nicht alleine stehen, sondern ihr muss die Vermittlung des notwendigen deklarativen und prozeduralen Wissens vorangehen. Den Zusammenhang zwischen Wissensstufen und Lernprogramm-Typologie verdeutlicht Bild 3-14.

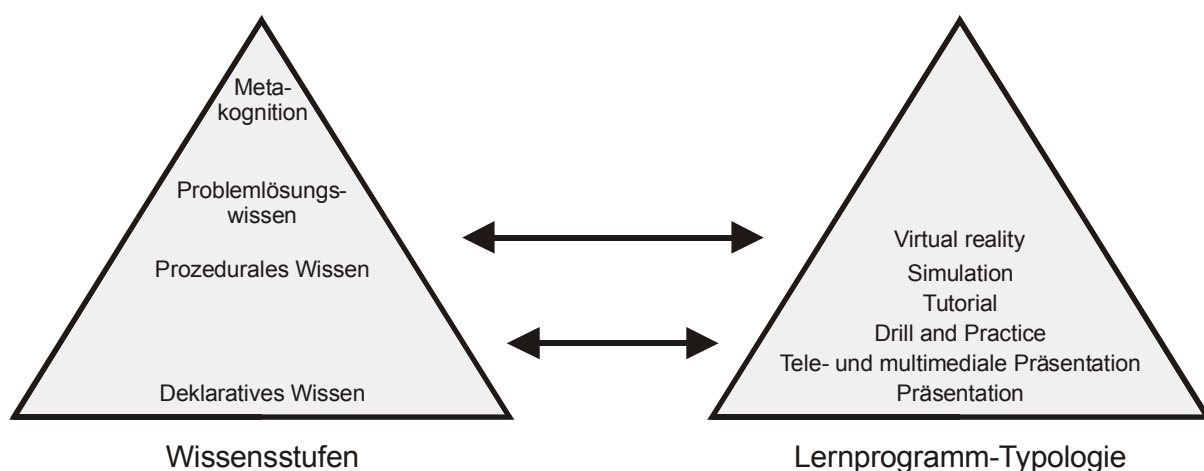


Bild 3-14: Zuordnung von Wissensstufen zu Lernprogrammen (vergleiche Bild 3-8)

Tele- und multimediale Präsentation

Diese Variante von Lernprogrammen wurde mit dem Siegeszug des Kognitivismus zunächst abgewertet, gewinnt heute aber durch den Einsatz von Multimedia, Hypertexten und Visualisierungsprogrammen wieder stark an Bedeutung, denn es besteht kein direkter Zusammenhang zwischen technischer und didaktischer Komplexität. Das entscheidende

Kriterium für die didaktische Sinnhaftigkeit besteht vielmehr in der Unterstützung beim Aufbau adäquater mentaler Modelle. Die Interaktion beschränkt sich bei reinen Präsentationsprogrammen auf die Steuerung, während die inhaltliche Transformation in kognitive Modelle außerhalb des Programms stattfindet. Dies jedoch muss kein Nachteil sein: Das Programm wird dadurch flexibler und vielseitiger anwendbar, ist - im Gegensatz zu Simulationen - relativ einfach zu erstellen und damit hocheffizient. Lernende müssen nicht eine vorprogrammierte Sequenz durchlaufen, sondern können autonom entscheiden, was sie mit den angebotenen Inhalten tun. Damit sind Präsentationsprogramme gut geeignet zur Vermittlung deklarativen Wissens und zur Aneignung von Inhalten sowie Zusammenhängen eines Fachgebiets. Durch den Einsatz von Multimedia ist nach Baumgartner/Payr [125] eine multiple Repräsentation der Lerninhalte möglich. Durch die zunehmende Verbreitung multimedialer rechnerunterstützter Präsentationen in Lehrveranstaltungen und bei Kongressen besteht zudem eine hohe Akzeptanz von Autoren und Lernenden zur Nutzung dieser Programme.

3.4.4.3 Rezeption von Text und Bild

"Television is easy and print is tough."

G. Salomon [150]

Nach der **Theorie der Doppelcodierung** [151] existiert nach Weidenmann [152] ein verbales System, das wahrgenommene Informationen in sprachlicher Form verarbeitet und speichert sowie ein imaginales System, das Informationen in bildhafter Repräsentation verarbeitet und speichert. Wörter aktivieren unmittelbar das verbale und Bilder das imaginale System. Die bildliche Verarbeitung ist aufgrund der Entwicklung des Menschen wesentlich stärker ausgeprägt. Dies ist in der Darstellung in Bild 3-15 durch größere Pfeile symbolisiert. Bilder lösen darüber hinaus sehr oft zusätzlich eine verbale Verarbeitung aus. Umgekehrt kann - in weniger intensiver Form - auch ein geschriebener Name zusätzlich eine bildhafte Repräsentation auslösen.

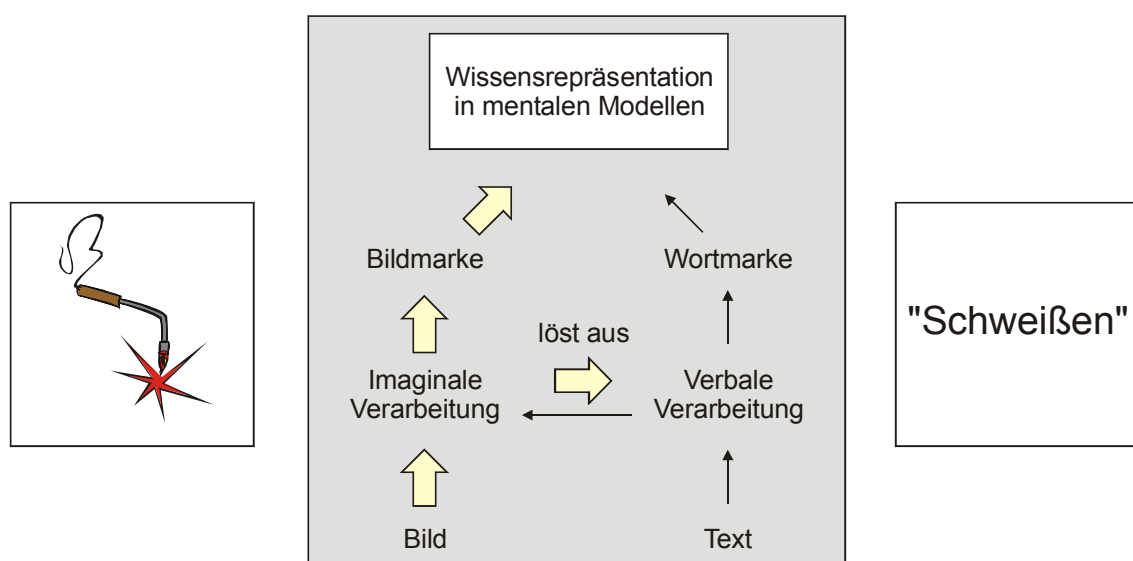


Bild 3-15: Duale Kodierungshypothese [151]

Unter Doppelcodierung versteht man das Aktivieren beider Codierungssysteme. Inhalte werden damit besser memoriert, wenn sowohl eine verbale wie eine imaginale Codierung im mentalen Repräsentationssystem der Rezipienten erfolgt. Dieser Effekt tritt vor allem bei konkreten Bildern und konkreten Begriffen auf. Deshalb werden abstrakte Begriffe wesentlich schlechter memoriert. Trivial wird vom "Einschalten beider Hirnhälften" durch gleichzeitiges Angebot von Sprache/Text und Bildern gesprochen. Belegt ist der "picture superiority effect" [153]: Listen mit Abbildungen bekannter Objekte werden besser memoriert als Listen mit den Namen dieser Objekte. Eine Erweiterung dieses Modells stellt die Multimodale Gedächtnis-Theorie dar, die in [154] und [155] ausgeführt ist.

Vorteile von Bildern liegen in der Anschaulichkeit ("Ein Bild sagt mehr als 1.000 Worte") und im Wecken von Aufmerksamkeit. Nachteilig ist die Gefahr der Reizüberflutung und einer nur oberflächlichen Rezeption (vergleiche Tabelle 3-12). Unter freien Lesebedingungen, beispielsweise beim Durchblättern einer Zeitschrift im Warteraum, werden meist zuerst die Bilder betrachtet und dann wird zu den interessanten Bildern der Text gelesen [132]. Damit führen Bilder zum Lesen hin und lenken gleichzeitig davon ab. Bei redundanten Text-Bild-Informationen besteht die Gefahr der Vernachlässigung des schwerer zu rezipierenden Textes. Werden Text und Bild miteinander verknüpft (komplementäres Verhältnis), so kann einerseits die Aufmerksamkeit der Leser in höherem Maße angezogen werden als durch reinen Text, andererseits der Text die Wahrnehmung eines Bildes steuern. Die Vieldeutigkeit des Bildes wird damit reduziert und die Lernenden werden von der Mühe befreit, selber die wichtigen von den unwichtigen Details zu unterscheiden. Durch ein redundantes Verhältnis zwischen Text und Bild (vergleiche Tabelle 3-13) können nach Euler [146] und Weidenmann/Krapp [132] sowohl visuelle als auch textuelle Lerntypen gleichermaßen angesprochen werden.

| | Text | Bild |
|---------------------------|--|--|
| Bedeutung und Motivierung | <ul style="list-style-type: none"> – Gilt als "seriös und schwierig" ⇒ Geringe Motivierung | <ul style="list-style-type: none"> – Gilt als "unterhaltsam und leicht" ⇒ Hohe Motivierung |
| Erfassung | <ul style="list-style-type: none"> – Sequentielle analytische Erfassung mit hohem Anstrengungsgrad zwingt dem Leser eine Reihenfolge auf. | <ul style="list-style-type: none"> – Simultane, ganzheitliche Erfassung mit geringem Anstrengungsgrad – Gesamte Information wird simultan präsentiert; erst der Betrachter schafft durch sequentielles Abtasten Verständnis. – Bilder lenken die Lernenden weniger. |
| Verständnis | <ul style="list-style-type: none"> – Aufbau des Verständnisses vom Element zum Ganzen | <ul style="list-style-type: none"> – Aufbau des Verständnisses vom Ganzen zum Element – Bilder sind oft ohne vollständige rationale Entschlüsselung verständlich. |

Tabelle 3-12: Didaktische Funktionen von Text und Bild nach Euler [146]

| Verhältnis zwischen Text und Bild | Bedeutung: Sprachliche und bildliche Informationen ... | Didaktische Vor- und Nachteile |
|-----------------------------------|--|---|
| Redundant | haben eine hohe Überdeckung. | <ul style="list-style-type: none"> – Bessere Aufnahme durch Darstellung der Information in zwei verschiedenen Formen – Ansprechen visueller und textueller Lerntypen – Kann zwar effektiv, aber ineffizient sein. – Gefahr der Langeweile |
| Widersprüchlich | vermitteln gegensätzliche Informationen. | <ul style="list-style-type: none"> – Provokation – Widerspruch erregt die Aufmerksamkeit. |
| Komplementär | verweisen aufeinander und ergänzen sich gegenseitig. | <ul style="list-style-type: none"> – Nutzung der jeweiligen Vorteile beider Darstellungsformen |
| Unabhängig | haben keine Gemeinsamkeiten. | <ul style="list-style-type: none"> – Keine sinnvolle Kombination |

Tabelle 3-13: Mögliche Verhältnisse zwischen Text und Bild nach Euler [146]

Textrezeption

"Über Lesen und Verstehen, Leserlichkeit und Verständlichkeit ist in den letzten Jahrzehnten so intensiv geforscht worden, dass man eine kleine Bibliothek zusammenstellen kann, in der ein Praktiker von depressiven Zuständen befallen würde."

Steffen-Peter Ballstaedt [156]

Texte stellen ein Medium dar, das den Lernenden ermöglicht, neue Inhalte tiefer zu verarbeiten und sich mit ihnen kritisch auseinanderzusetzen. Die Vorteile liegen in der schnellen und kostengünstigen Erstellung und in der Selbststeuerung der Lernenden. Diese bestimmen selber, wie schnell, intensiv und in welcher Reihenfolge sie die Informationen aufnehmen. Gedruckter Text ist orts- und zeitungebunden ohne zusätzliche technische Ausstattung immer verfügbar. Nachteilig ist die mangelnde Interaktivität, die nur Sprünge und Markierungen sowie Notizen im Text zulässt. Lesen ist keine automatische Wissensübertragung, sondern ein konstruktiver Vorgang, bei dem die Lernenden eigene Ziele, Wissensbestände und Strategien aktiv einbringen. Die konstruierte Wissensstruktur der Lernenden jedoch wird nach Arzberger [137] nie mit der Wissensstruktur des Autors identisch sein.

Zur optimalen Arbeit mit Texten existieren verschiedene Methoden. So gibt es auf Rezipientenseite Kurse zum Schnelllesen [157], die vor allem die Wahrnehmungsphase beschleunigen. Damit wird sowohl die Zeit zum konzentrierten Lesen verkürzt, indem die Erfassung größerer Wort- und Satzbereiche geschult wird, als auch die Fähigkeit zum oberflächlichen schnellen Querlesen mit der Suche nach Stichwörtern weiterentwickelt. Zum Lernen mit Texten gibt es beispielsweise die "SQ3R-Methode" [158], bei der die

Verarbeitungstiefe bereits beim Lesen erhöht werden soll. Auf Autorensseite gibt es eine Vielzahl von Richtlinien zur Gestaltung von Lerntexten. Die vorliegende Arbeit richtet sich nach den Empfehlungen von Arzberger [137] und Ballstaedt [156]. Die Messung der Lernwirksamkeit von Texten kann auf der Makroebene ("Wie gut ist der Text in die Lernumgebung integriert? - Wie gut erfüllt er die Funktion?") und auf der Mikroebene erfolgen ("Wie unterstützen die Gestaltungselemente den Lernprozess?"). Die Messung der Verständlichkeit von Texten kann nach verschiedenen Methoden erfolgen, wie z.B. nach dem "Hamburger Modell" [159].

Bildrezeption

"Das Sprichwort 'Ein Bild sagt mehr als tausend Worte' gehört sicher zu den abgegriffensten Aussagen über visuelle Kommunikation."

Heinz Arzberger [137]

Aus den bisherigen Ausführungen ist allerdings der Vorteil der Visualisierung von Sachverhalten klar ableitbar. Bilder lassen sich nach Weidenmann [152], [160] in folgende Arten unterteilen:

| | Abbildungen | Visualisierungen |
|------------|---|---|
| Definition | Bildhafte Darstellungen, die eine hohe Realitätsnähe mit der Welt aufweisen | Abstrakte logisch-analytische Bilder |
| Beispiele | <ul style="list-style-type: none"> – Fotos – Realitätsnahe Zeichnungen | <ul style="list-style-type: none"> – Karten – Schemata – "Charts" (Flussdiagramme, Netzwerke, Tabellen, Organigramme) – Diagramme (Kreis-, Balken-, Säule-, Kurven-, Streu-) |
| Funktionen | <ul style="list-style-type: none"> – Zeigefunktion: Darstellen, Erläutern, Lenken auf wichtige Merkmale. Das realistische Bild ist hier meist weniger geeignet, weil es das Wichtige zu wenig heraushebt. – Situierungsfunktion: Einbetten von Detailinformationen in einen Rahmen, Aktivierung von Alltagsinformationen – Konstruktionsfunktion: Kognitives Repräsentieren neuer Sachverhalte in einem adäquaten mentalen Modell – Motivierungsfunktion: Dekorative Bilder | <ul style="list-style-type: none"> – Veranschaulichung unzugänglicher Zusammenhänge durch Darstellungskonventionen – Darstellung nichtsichtbarer qualitativer Strukturen – Darstellung nichtsichtbarer quantitativer Zusammenhänge – Verdichtung, Überblick – Veranschaulichung |

Tabelle 3-14: Arten von Bildern nach Weidenmann [152], [160]

Die Implementierung der Präsentation richtet sich nach den Empfehlungen von Weidenmann [160] und Arzberger [137]. Eine gute Bildgestaltung fördert nach Weidenmann [152], [160] das Verstehen durch die in Tabelle 3-15 dargestellten prägnanten Gestaltungsmittel zur Wahrnehmungsorganisation.

Ein indikatorisches Bildverständnis kann gefördert werden, indem beispielsweise bei Diagrammen die zentrale Information eines Bildes durch einen kurzen Text dargestellt wird. Dies wird bei der Darstellung der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen angewendet (vergleiche Kapitel 6).

| Natürliches Bildverstehen | Indikatorisches Bildverstehen |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> – Transformation: Der Sprung vom Symbolsystem zur Vorstellung von Realität muss möglichst einfach sein. – Gestaltgesetze: Das Gehirn rechnet aus einem Angebot stets die einfachste Organisation heraus. – Reduktion von Komplexität – Eindeutige Organisation – Diskriminierbarkeit der Bildinhalte – Grafische Hervorhebung – Räumliche Anordnung – Figur-Grund-Unterscheidung – Eindeutige Schattierungs- und Farbinformationen – Vertrauter Blickwinkel – Kontextualisierung | <ul style="list-style-type: none"> – Semantische Eindeutigkeit durch Bildtitel, Beschriftung, Wortwahl, Determinative – Hinweis auf zentrale Information. Dies ist schwieriger als bei textueller Vermittlung. – Hinweis auf Verarbeitung der zentralen Information |

Tabelle 3-15: Förderung des Bildverstehens nach Weidenmann [152], [160]

4 Modellierung

4.1 Einleitung und Überblick

Die Realisierung einer verkürzten Prozesskette erfolgt im Rahmen eines methodischen Konstruktionsprozesses nach VDI 2221f [161], [162] und Pahl/Beitz [163] sowie einer rechnerorientierten Produktmodellierung nach Spur [164]. Der Konstruktionsprozess gliedert sich in die vier Phasen Planen/Klären der Aufgabenstellung, Konzipieren, Entwerfen und Ausarbeiten. Nach der Darstellung der entwickelten **Methodik zur Prozess- und Prozesskettenmodellierung** wird im Rahmen der Konzeption zunächst in einer **systemtheoretischen Modellierung der Prozesskette** das optimale Konzept für eine verkürzte Prozesskette mit einem integrierten Fügeprozess bestimmt.

In den sich anschließenden Betrachtungen wird im Sinne der Aufgabenstellung (siehe Kapitel 2) nicht mehr die gesamte Prozesskette modelliert, sondern es erfolgt eine Fokussierung auf die Integration des Fügeprozesses im Umformwerkzeug. Diese wird dann in Kapitel 6 in experimentellen Untersuchungen optimiert.

Um die einzelnen Prozesse und ihr Zusammenspiel verstehen und später dieses Verständnis gezielt zur Optimierung verwenden zu können, werden aus der konzipierten Prozesskette in einer **prozesstechnischen Modellierung des Fügeprozesses** alle potenziell relevanten Ein- und Ausgangsgrößen des Fügeprozesses aufgestellt und mittels einer Pareto-Analyse die relevanten Parameter ermittelt. Diese werden durch Operationalisierung in messbare quantitative Größen überführt. Darauf aufbauend erfolgt in den nächsten Kapiteln eine systematische experimentelle Untersuchung der Effekte der Eingangsgrößen auf die Ausgangsgrößen, die Erarbeitung eines Prozessverständnisses sowie die Ableitung optimaler Prozessführungsstrategien und weiterer systemtechnischer Anforderungen.

Im Rahmen einer **systemtechnischen Modellierung des Fügeprozesses** wird in der Konzeptionsphase der Fügeprozess a priori in einer Virtual-Reality-Simulation und in einer mathematischen Modellierung untersucht. Daraus ergeben sich systemtechnische Anforderungen an den zu implementierenden Füge-roboter.

Prozess- und systemtechnische Modellierung münden in eine Datenbasis, die als Anforderungsliste zum Entwerfen, Ausarbeiten und Realisieren des Fügeprozesses (Abschnitt 5.3) sowie zu seiner Optimierung (Abschnitt 6.3) dient. Die Datenbasis untergliedert sich nach VDI 2221 [161] in Anforderungen, die unbedingt erfüllt werden müssen, und in sogenannte Wünsche, deren Erfüllung angestrebt, aber nicht unbedingt notwendig ist.

Entwurf und Ausarbeitung der Umform- und Trennprozesse sind nicht Gegenstand dieser Arbeit, da sie vertieft in anderen wissenschaftlichen Arbeiten untersucht werden [59], [165], [166].

4.2 Entwicklung einer Methodik zur Prozesskettenmodellierung

Die DIN EN ISO 9000 [167] definiert einen Prozess als einen "Satz von in Wechselbeziehung oder in Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in Ergebnisse umwandelt". Jeder Prozess kann somit als Black Box dargestellt werden, der Eingangs- in Ausgangsgrößen transformiert. Die Eingänge E enthalten in Anlehnung an VDI 2222 [162] die Stoff-, Energie- und Informationsgrößen, die zu Prozessbeginn vorliegen. Zur Modellierung bietet es sich an, die Ausgänge in Anlehnung an REFA [168] in zwei Gruppen zu teilen: Die **Hauptausgänge** AH enthalten sämtliche Material-, Informations- und Zeitgrößen. Die **Nebenausgänge** AN beinhalten die prozessbedingten, aber ungewollten Zustände oder Veränderungen von Größen. Die Eingangs- und Ausgangsgrößen lassen sich in insgesamt vier Gruppen einteilen:

- Geometrie: Geometrische Beschreibung des Bauteils und der Fertigungsanlagen
- Werkstoff: Mechanische und technologische Eigenschaften von Werkstück und Werkzeug
- Verfahren: Technologie-, Zustands- und Zeitgrößen der Anlage bzw. des Prozesses
- Qualität: Bewertung des Erfüllungsgrades von Qualitätsmerkmalen



Bild 4-1: Prozessmodell mit Eingangsgrößen (E), Hauptausgangs- (AH) und Nebenausgangsgrößen (AN)

Prozessmodelle lassen sich durch Verknüpfung ihrer Eingangs- und Ausgangsgrößen in Prozesskettenmodelle überführen. Analog zu den von REFA [168] vorgegebenen Strukturen für die Ermittlung der Zeitbestandteile für die Fertigungsplanung kann eine Prozesskette zur Herstellung von Produkten in Haupt- und Nebenprozesse unterteilt werden.

Als **Hauptprozesse** werden diejenigen Fertigungsschritte bezeichnet, die primär der Veränderung der Geometrie und der Bauteileigenschaften dienen. Zwischen diesen finden meist **Nebenprozesse** statt, die als Hilfsfunktionen nur mittelbar der Bauteileigenschaftsänderung dienen. Jede Ausgangsgröße eines Prozesses stellt eine Eingangsgröße eines oder mehrerer nachfolgender Prozesse dar. Da industrielle Prozessketten zur Herstellung größerer Stückzahlen vielfach durchlaufen werden, kann sich ein Prozess auch auf einen vorgelagerten oder auf denselben Prozess im nächsten Fertigungszyklus auswirken. Bei der Darstellung des Prozesskettenmodells bietet sich eine grafische Lösung an, um die jeweiligen Eingangs- und Ausgangsgrößen miteinander zu verbinden (vergleiche Bild 4-2). Zusammenhänge zwischen nicht direkt aufeinanderfolgenden Prozessen lassen sich auch durch Pfeile von und zu einem externen Kanal symbolisieren.

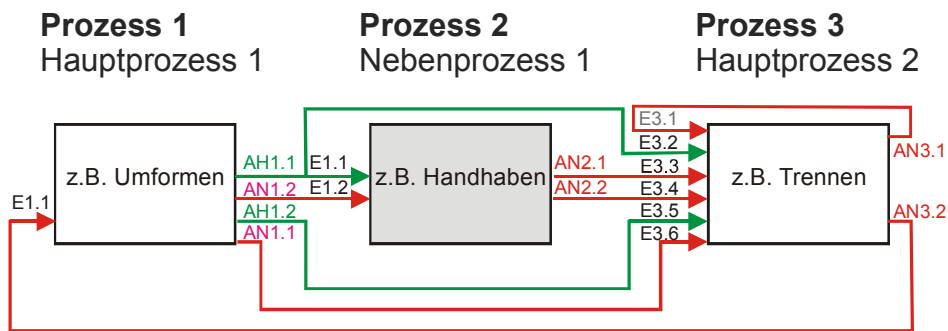


Bild 4-2: Modell einer Prozesskette mit Eingangsgrößen (E), Hauptausgangs- (AH) und Nebenausgangsgrößen (AN)

Ein Ausgang ist mit einer oder mehreren Eingangsgrößen nachfolgender Prozesse verknüpft. Im Beispiel in Bild 4-2 stellt die Ausgangsgröße AH 1.1 (beispielsweise "Flanschgeometrie") eine Eingangsgröße für einen Nebenprozess (beispielsweise "Handhaben") dar und beeinflusst diesen damit. Da der Handhabungsvorgang die Flanschgeometrie nicht verändert, ist der Ausgang AH 1.1 gleichzeitig ein Eingang für den Prozess 3 (beispielsweise "Trennen").

Aufgrund der Definition eines Nebenprozesses kann dieser nur Nebenausgangsgrößen aufweisen. Würde er die Bauteileigenschaften gezielt positiv verändern, müsste man ihn als Hauptprozess definieren. Nebenprozesse üben durch ihre Nebenausgangsgrößen Störeinflüsse auf die Prozesskette und auf die Bauteilqualität aus. Sie erfordern einen anlagentechnischen Aufwand und verlängern die Taktzeit einer Prozesskette durch ihre Nebenzeiten. Deshalb besteht eine Optimierungsstrategie von Prozessketten in ihrer Verkürzung. Dabei wird angestrebt, Hauptprozesse zusammenzufassen (Verfahrensintegration und -kombination) und die Anzahl der Nebenprozesse zu reduzieren (Prozesskettenverkürzung). In einer Studie zur Produktion im 21. Jahrhundert werden Untersuchungen zu verkürzten Prozessketten als ein vorrangiges Ziel zukünftiger Forschungsarbeiten im Bereich der Produktionstechnik genannt [72].

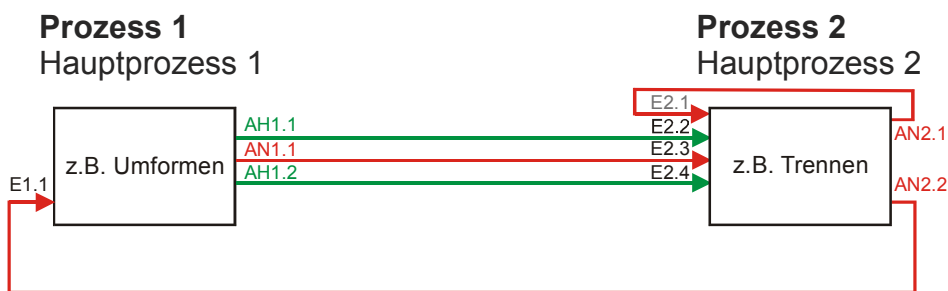


Bild 4-3: Modell einer verkürzten Prozesskette mit Eingangsgrößen (E), Hauptausgangs- (AH) und Nebenausgangsgrößen (AN)

Im Beispiel aus Bild 4-2 ließe sich durch Integration des Trennens im Umformprozess der Nebenprozess "Handhaben" einsparen. Vergleicht man Bild 4-3 mit Bild 4-2, so erkennt man eine deutliche Reduzierung der Nebenausgangsgrößen. Die Prozesskettenverkürzung kann damit neben der Verringerung des anlagentechnischen Aufwands zu einer Erhöhung der Robustheit im Sinne einer erhöhten Unempfindlichkeit gegen Schwankungen der Eingangsgrößen einzelner Prozesse führen.

Mit der dargestellten Methodik werden nachfolgend konventionelle und verkürzte Prozessketten zur Herstellung flächiger integraler Leichtbauteile modelliert und miteinander verglichen.

4.3 Systemtheoretische Modellierung der Prozesskette

4.3.1 Konventionelle Prozesskette zur Herstellung flächiger Leichtbauteile

Flächige integrale Leichtbauteile wie beispielsweise Träger- und Strukturbauteile oder Tanks im Automobilbereich werden vielfach ausgehend von Blechhalbzeug in einer Prozesskette umformender, trennender und fügender Fertigungsverfahren hergestellt. Für solche Baugruppen in der Fahrzeugtechnik bieten sich zum Umformen die Fertigungsverfahren Tiefziehen oder Innenhochdruck-Umformen und zum Fügen thermische Verfahren an [169].

Bild 4-4 zeigt eine mögliche konventionelle Prozesskette mit getrennten Umform-, Füge- und Trennvorgängen zur Herstellung flächiger geschlossener Hohlkörper. Die konzipierte Modellgeometrie (vergleiche Bild 4-4 oben) beinhaltet eine Vielzahl von Merkmalen realer Komponenten für das potenzielle Anwendungsspektrum, die besondere Anforderungen an den Umform- und den Fügeprozess stellen (vergleiche Tabelle 4-1).

| Merkmal | Folge |
|--|---|
| Halbschalen mit unterschiedlichen Ziehtiefen | Relativbewegung im Flansch |
| Querschnittsübergänge | Gefahr der Faltenbildung in der freien Aufweitung |
| Eckenbereiche | Fließbehinderungen |
| Verschiedene Innen- und Außenradien | Komplexe Fügebahn |

Tabelle 4-1: Merkmale der untersuchten Modellgeometrie

Das Umformen erfolgt durch mehrstufiges Tiefziehen, das Beschneiden durch Scherschneiden und das Fügen durch ein konventionelles Schweißverfahren. Zwischen diesen Prozessen sind Operationen zum Handhaben, Prüfen, Positionieren und Spannen notwendig. Beim letzten Prozess, der Nachbearbeitung, kann ein mechanisches Richten der Bauteile in Folge des Schweißverzugs oder zum Kalibrieren sowie ein weiteres Beschneiden notwendig sein [47].

Die gezeigte Prozesskette besteht aus hinreichend erforschten und in der industriellen Praxis etablierten Verfahren. Bei der Herstellung großer Stückzahlen, wie beispielsweise bei Großserien im Automobilbau, sind die geringen Taktzeiten der Einzelverfahren und die kurzen Durchlaufzeiten durch Parallelfertigung vorteilhaft. Die anteiligen Werkzeugkosten sind gering. Zwar bestehen durch die Vielzahl eingesetzter Prozesse viele Fehlermöglichkeiten, doch können die auftretenden Fehler durch Qualitätskontrollen zwischen den Einzelprozessen weitgehend eliminiert werden. Damit sind die Wechselwirkungen über die Fertigungsanlagen gering. Grobe Positionierfehler oder fehlerhafte Einspannungen im nachfolgenden Prozessschritt sind nahezu ausgeschlossen, da die Teile in jedem Einzelprozess neu positioniert und gespannt werden.

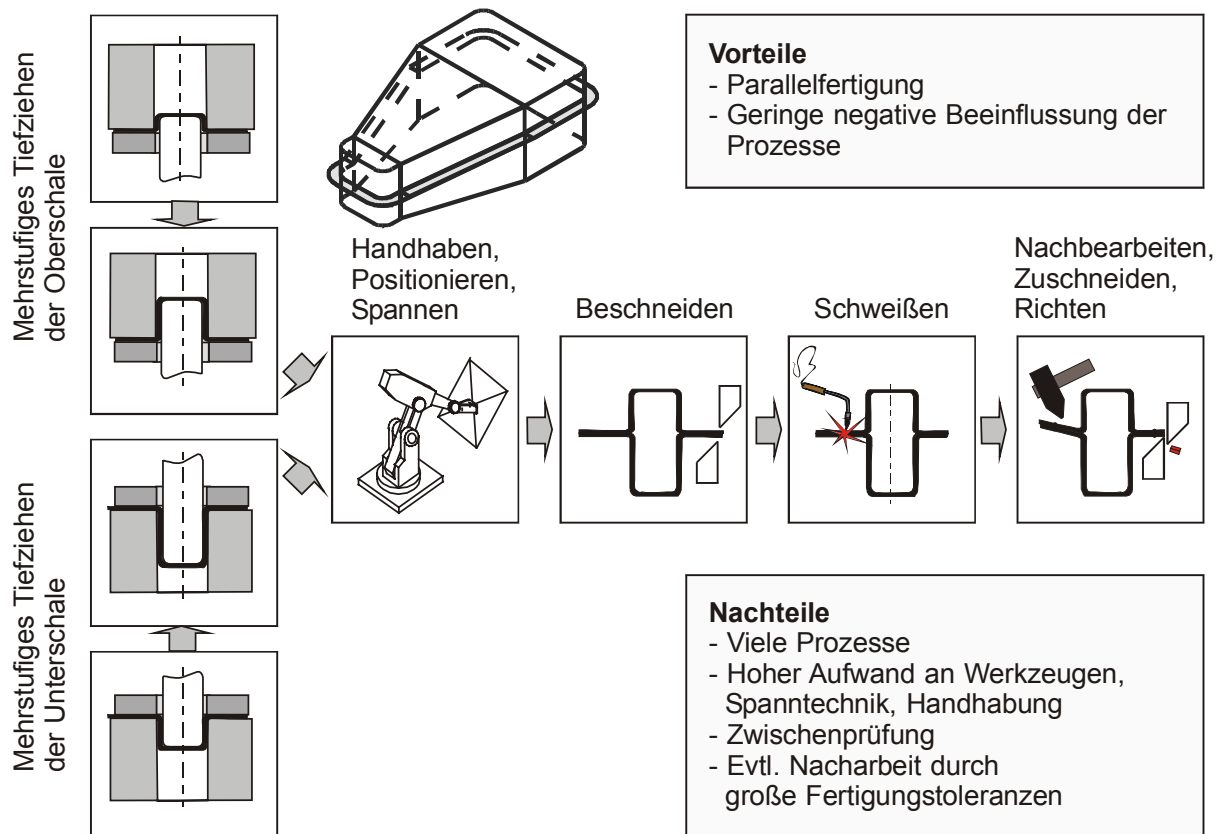


Bild 4-4: Konventionelle Prozesskette

Diese Prozesskette besitzt aber auch eine Reihe von Nachteilen: So besteht ein hoher Aufwand für Planung, Logistik und Qualitätssicherung. Die aufwendigen Werkzeuge, Spann- und Handhabungsvorrichtungen sind nur für hohe Stückzahlen und Mindestlosgrößen rentabel. Durch die von Prozess zu Prozess notwendigen Umspannungen müssen oft hohe Fertigungstoleranzen zugelassen werden, die eine Nacharbeit erfordern. Aufgrund zunehmender Funktionsintegration und der steigenden Komplexität der Bauteilgeometrie erweist sich die eingeschränkte Formenvielfalt als nachteilig.

Wäre es nun möglich, alle Einzelprozesse in einem einzigen Werkzeug durchzuführen, so entfielen ein Großteil der Nebenprozesse mit ihren Handhabungs-, Positionier- und Spanoperationen. Synergien zwischen den Prozessen ließen sich nutzen, um eine Nacharbeit zu eliminieren oder zumindest zu minimieren. Die notwendigen Trenn- und Fügeoperationen müssen dazu entfallen oder in das Umformwerkzeug integriert werden. Die möglichen Alternativen zur Realisierung einer derartigen integrierten Prozesskette werden im Nachfolgenden modelliert, bewertet und die am besten geeignete Variante ausgewählt.

4.3.2 Konzeption und Modellierung der integrierten Prozesskette

4.3.2.1 Variantenbewertung

Variante 1: Umformen gefügter Blechpaare

Die einfachste verkürzte Prozesskette zur Herstellung der verwendeten Beispielgeometrie besteht in der Verwendung von Blechpaaren, die bereits gefügt sind und im Werkzeug nur noch umgeformt werden. Damit beinhaltet die Prozesskette den Nebenprozess "Blechpaar einlegen", der die Tätigkeiten "Andocken der Bleche an das Hochdruckaggregat" und "Beölen mit Schmierstoff" enthält, den Hauptprozess "Umformen" und den Nebenprozess "Entnahme" (siehe Bild 4-5 oben).

Die wesentlichen Vorteile des IHU im Vergleich zu konventionellen Tiefziehverfahren liegen in der höheren Festigkeit und der Maßgenauigkeit der Bauteile. Durch die homogenere Dehnungsverteilung ist im Vergleich zum konventionellen Tiefziehen nach Hein [4] eine stärkere Umformung möglich. Da für die Platinen im Gegensatz zum Tiefziehen nur eine einzige Ziehstufe notwendig ist und im Sinne einer Verfahrenskombination die beiden Platinen zugleich in einem einzigen Werkzeug umgeformt werden, führt bereits der Einsatz des IHU zu einer entscheidenden Prozesskettenverkürzung. Die Positionierung und Einspannung der Halbschalen für einen möglichen anschließenden Fügevorgang ist ohne nachfolgende Nebenprozesse gegeben. Nachteilig beim IHU sind die längeren Prozesszeiten gegenüber dem Tiefziehen und die höheren Investitionskosten für eine hydraulische Presse. Der Einsatz verschweißter Blechpaare für das IHU wurde beispielsweise in [4], [46], [47] und [170] untersucht.

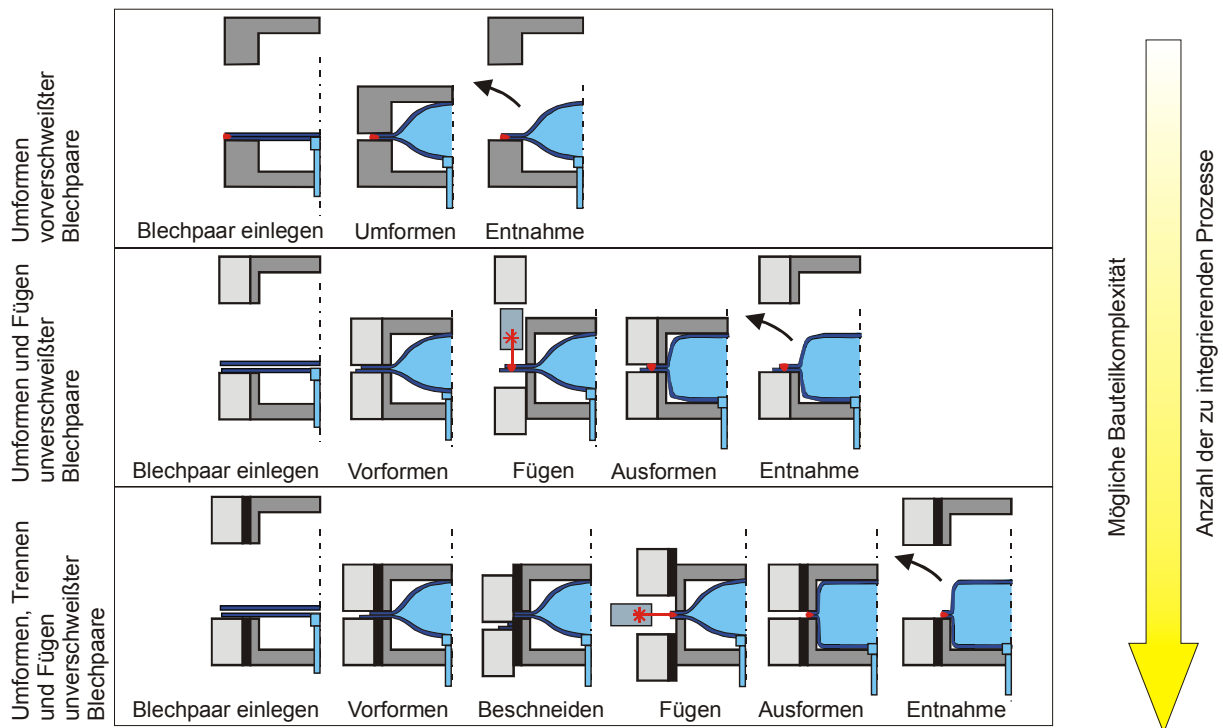


Bild 4-5: Mögliche integrierte Prozessketten

Durch die starre Verbindung beider Bleche lassen sich unterschiedliche Ziehtiefen, wie sie in der Praxis oft gewünscht werden, nur schwer realisieren. Infolge der starren Kopplung treten bereits bei rotationssymmetrischen Bauteilen Ziehfallen an der Bauteilhälfte mit der geringeren Ziehtiefe auf. Bauteile, bei denen das Verhältnis der beiden Ziehtiefen von Ober- und Unterhälfte kleiner als 0,7 oder größer als 1,4 sein soll, lassen sich nach Hein [4] nur schwer herstellen. Bei der verwendeten, kastenförmigen Bauteilform sind die Fließbehinderungen noch wesentlich ausgeprägter. Damit werden die Formgebungsmöglichkeiten stark beschränkt.

Alle Formelemente am Bauteil, die nicht der Funktion dienen, aber aus fertigungstechnischen Gründen notwendig sind, sind möglichst gering in Zahl und Ausmaß zu halten. Ein solches Formelement stellt der Flansch dar, der bei der Umformung der beiden Bauteilhälften in den Bereichen der Außenradien nur wenig eingezogen werden kann. Tabelle 4-2 gibt die Vor- und Nachteile der Variante 1 wieder.

| Kriterium/Anforderung | Bewertung* | Erläuterung |
|--|------------|--|
| Bauteilqualität (Umformung) | -- | – IHU von gefügten Blechpaaren beschränkt Formgebungsmöglichkeiten. – Faltenbildung bei unterschiedlichen Ziehtiefen |
| Länge der Prozesskette | ++ | – Ein Haupt- und zwei Nebenprozesse |
| Komplexität des Umformwerkzeugs | ++ | – Ober- und Unterwerkzeug bestehen aus je einer massiven und stabilen Kavität. |
| Platzbedarf für die Fügeinheit | ++ | (Entfällt) |
| Bauteilflansch | -- | – Durch die starre Verbindung beider Bauteilhälften ist nur ein geringer, lokal stark unterschiedlicher Flanscheinzug möglich. |
| Beeinflussung der Fügezone durch Kontamination | ++ | (Entfällt) |
| Beeinflussung des IHU-Werkzeugs | ++ | (Entfällt) |

Tabelle 4-2: Vor- und Nachteile der Variante 1 (Umformen vorverschweißter Blechpaare)
(* ++=sehr gut, +=gut, o=durchschnittlich, -=schlecht, --=sehr schlecht)

Variante 2: Umformen und Fügen unverschweißter Blechpaare

Gegenüber Variante 1 bietet die Integration eines Fügeprozesses in das IHU-Werkzeug entscheidende Verfahrensvorteile, da die Vorteile des Umformens ungefügter und gefügter Blechpaare kombiniert werden (Bild 4-5 Mitte).

Da die Bleche beim Vorformen nur über die Reibkraft miteinander gekoppelt sind, ist eine Relativbewegung zwischen den Blechen möglich. Durch den so entstehenden kombinierten Streck- und Tiefziehprozess lassen sich unterschiedliche Ziehtiefen für Ober- und Unterteil realisieren. Während beim Vorformen das Bauteil möglichst schnell bei freiem Flanscheinzug und mittleren Niederhalterkräften umgeformt werden soll, erfolgt das Ausformen der

Endform bei hohen Drücken ohne oder nur mit geringem Flanscheinzug. Dies erfordert bei unverschweißten Blechpaaren hohe Niederhalterkräfte, um die Dichtheit sicherzustellen [4].

Gelingt es, die Bauteile nicht nur zu fügen, sondern eine vollständig dichte Fügeverbindung herzustellen, so kann als Synergieeffekt zusätzlich zu den Niederhalterkräften die Dichtheit des verschweißten Flansches ausgenutzt werden, um höhere Innendrucke und damit eine bessere Bauteilausformung und -genauigkeit ohne Undichtigkeiten zu realisieren. Alternativ ist eine Reduzierung der Niederhalterkraft möglich, um einen Flanscheinzug zuzulassen, der sich positiv auf die Ausformung der Bauteilecken auswirken kann. Ferner kann ein möglicher Bauteilverzug infolge der Wärmeeinbringung beim Schweißen eliminiert werden, so dass separate Richtoperationen entfallen.

Aufgrund der hohen gewünschten Belastbarkeit der Verbindung beim Ausformen und im Betrieb (zum Beispiel bei tragenden Leichtbaukomponenten oder Tanks) scheiden punktförmige Fügeverbindungen wie Durchsetzfügen oder Widerstandspunktschweißen, die beispielsweise bei [25] zum Fügen der Bauteile nach dem Umformen vorgeschlagen werden, aus, da diese linienförmigen Verbindungen in Bezug auf die Festigkeit generell unterlegen sind. Auch Klebverfahren versprechen nicht die notwendige Festigkeit; zumal die Bleche mit Schmiermittel und IHU-Medium kontaminiert sind. Die erforderliche Trocknungszeit des Klebers verlängert die Taktzeit entscheidend. Lediglich thermische Fügeverfahren bieten die notwendigen Festigkeiten. Nachteilig sind für diese neben der längeren Taktzeit für den Fügeprozess der erhöhte systemtechnische Aufwand gegenüber dem Punktschweißen oder Durchsetzfügen, bei denen die einfache Systemtechnik in die Niederhalterflächen integriert werden kann. Beim Schweißen im Werkzeug muss eine schmale Schweißnaht mit definierter Tiefe, hoher Oberflächenqualität und hochgenauer Kontur erzeugt werden. Bei diesen Anforderungen an die Nahtqualität ist ein Fügen mittels Laserstrahl aufgrund seiner hohen Flexibilität, der kraftfreien Bearbeitung und der hohen Nahtqualität konventionellen Schweißverfahren überlegen [100], [110]. Die Integration des Lasers in Prozessketten bietet insbesondere im Fahrzeug- und Maschinenbau das Potenzial der Produktivitätssteigerung durch Senkung der Fertigungskosten bei Erhöhung der Produktqualität [171], [172]. Nachteilig beim Einsatz eines Lasers sind die hohen Investitionskosten und die Empfindlichkeit der Optik gegenüber Verschmutzung.

Da die Flanschbreite möglichst klein gehalten werden muss, verläuft die Schweißbahn sehr nahe am IHU-Werkzeug, was zu einer thermischen Belastung und zu einer Beschädigung des Werkzeugs durch Metallspritzer und Emissionen führen kann. Da im Gegensatz zum üblichen Ablauf in der industriellen Fertigung [98] ein Waschen bzw. eine Reinigung vor dem Fügen entfällt, ist zu prüfen, wie sich der Film aus Schmiermittel und IHU-Medium an der Blechoberfläche auf die Schweißnahtqualität auswirkt. Es besteht die Gefahr einer vermehrten Bildung von Spritzern, Poren und Einschlüssen. Beim Schweißen ist zudem von einer starken Rauch- und Dampfentwicklung auszugehen.

Ebenfalls nachteilig bei Variante 2 ist das gegenüber Variante 1 aufwendigere Werkzeug, bei dem sich die äußeren Niederhalter sehr weit öffnen müssen. Da nach dem Vorformen keine definierte Flanschkontur vorliegt, kann ein Schweißen nur durch eine I-Naht von oben oder von unten erfolgen (vergleiche Bild 4-5 Mitte). Dazu müssen die Schneidvorrichtungen (äußere Niederhalter) so weit geöffnet werden, dass zwischen der Blechpaarung und der

Oberhälfte des Werkzeugs ausreichend Raum für den Bearbeitungskopf entsteht. Die gefertigten Bauteile weisen wie bei Variante 1 einen breiten Flansch auf, der beim Ausformen die Umformung behindert und in der industriellen Anwendung meist nicht gewünscht wird. Zudem sind Flanschoberseite und -unterseite bei verschiedenen Ziehtiefen von Ober- und Unterblech unterschiedlich breit (vergleiche Bild 4-5 Mitte). Wird die Naht durch beide Bleche geschweißt, so können die im Schmelzbad befindlichen Gase an der Nahtunterseite entweichen, was die Nahtqualität verbessert und die Porenbildung vermindert. Dies wird beispielsweise beim Verschweißen verzinkter Bleche empfohlen, um ein Ausgasen des Zinkdampfs zu gewährleisten [173]. In dem hier vorliegenden Prozess jedoch muss eine Durchschweißung beider Bleche unbedingt verhindert werden, da sich sonst Metallspritzer auf dem unteren Niederhalter absetzen können, die beim Ausformen den Flanscheinzug behindern und im Extremfall zu einer Werkzeugschädigung führen können. Damit können die Gase nur zur Oberseite und in den Bereich vor der Schweißnaht entweichen, wodurch eine erhöhte Gefahr der Porenbildung besteht. Der Schweißprozess für die nicht durchgeschweißte I-Naht ist nur in einem engen Toleranzband realisierbar. Die Einschweißtiefe soll einerseits so groß wie möglich sein, um eine hohe Festigkeit durch einen großen tragenden Nahtquerschnitt zu erzielen, andererseits so niedrig, dass keine Durchschweißung stattfindet. Unter Laborbedingungen ist diese Forderung realisierbar. In der industriellen Praxis erfordert sie eine zusätzliche Sensorik, die gerade bei Integration in einem Umformprozess fehleranfällig ist.

| Kriterium/Anforderung | Bewertung* | Erläuterung |
|--|------------|--|
| Bauteilqualität | o | – Kombination der Vorteile des IHU von unverschweißten und verschweißten Blechen |
| Länge der Prozesskette | + | – Drei Haupt- und zwei Nebenprozesse |
| Komplexität des Umformwerkzeugs | o | – Ober- und Unterwerkzeug müssen aus je zwei gegeneinander verfahrbaren Teilen bestehen. |
| Platzbedarf für die Fügeinheit | -- | – Schlechte Zugänglichkeit im Umformwerkzeug – Großer Platzbedarf in Z-Richtung |
| Bauteilflansch | - | – Zum Schweißen erforderlich – Breiter Flansch – Flanschbreite lokal unterschiedlich |
| Beeinflussung der Fügezone durch Kontamination | o | – Öl und Schmierstoff können sich negativ auf die Naht auswirken. – Da eine Durchschweißung nicht zulässig ist, ist eine Entgasung nur auf der Nahtoberseite möglich. |
| Beeinflussung des IHU-Werkzeugs | -- | – Wärmeeinfluss – Die Gefahr der Werkzeugschädigung bei Durchschweißung ist hoch. |

Tabelle 4-3: Vor- und Nachteile der Variante 2 (Umformen und Fügen im Werkzeug)
(* ++=sehr gut, +=gut, o=durchschnittlich, -=schlecht, --=sehr schlecht)

Der tragende Querschnitt errechnet sich bei der I-Naht am Überlapstoß nach Schultz [120] als Produkt aus der Nahtlänge und aus der Nahtbreite in der Trennebene der beiden verschweißten Bleche. Bei einer starken Nahtunterwölbung entspricht der tragende Querschnitt dem geringsten Abstand zwischen dem Nahtrand in der Trennebene und der Nahtoberseite.

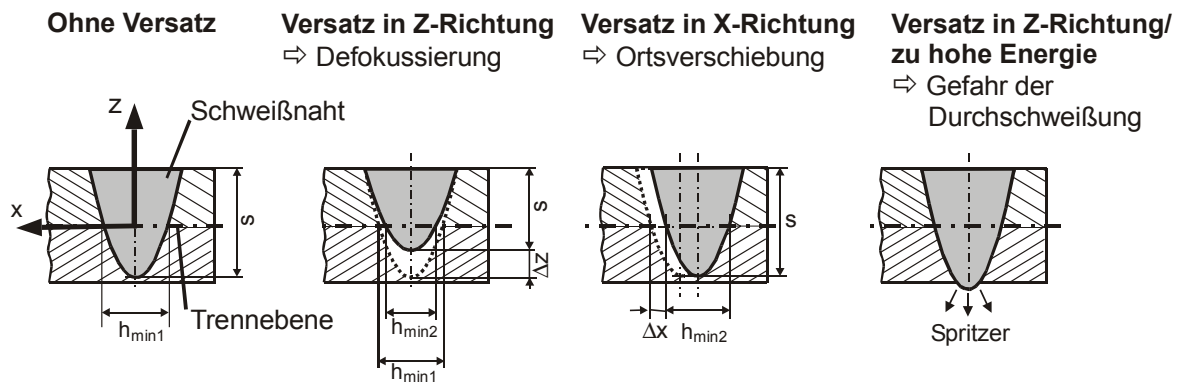
Variante 3: Umformen, Trennen und Fügen unverschweißter Blechpaare

Die optimale Lösung für die Bauteilqualität stellt die zusätzliche Integration eines Trennprozesses dar (Bild 4-5 unten). Durch die nun definierte Schnittkontur mit einem schmalen Flansch kann eine Stirnflachnaht appliziert werden. Diese erfordert nur eine geringe Öffnung des Werkzeugs und einen schmalen Flansch. Prinzipbedingt besteht keine Gefahr einer Werkzeugschädigung infolge einer Durchschweißung. Nachteilig ist die komplexe, dreigeteilte Werkzeuggeometrie und die Notwendigkeit dreier Hauptprozesse.

Das Trennen kann mittels Laserstrahlschneiden oder durch eine in das Umformwerkzeug integrierte Vorrichtung zum mechanischen Scherschneiden erfolgen. Beim Laserstrahlschneiden ist wie beim Fügen in der Variante 2 ein Zugang des Schneidkopfes zum Bauteilflansch von oben oder von unten bei geschlossenem Werkzeug notwendig, was der Forderung nach einer geringen Flanschbreite widerspricht und eine große Werkzeugöffnung erfordert. Zudem ist die Prozessdauer signifikant größer als beim Scherschneiden. Schweiß- und Schneidoperationen erfordern in der Regel verschiedene Bearbeitungsköpfe. Dies bedingt für den Schweißroboter einen erheblichen systemtechnischen Mehraufwand. Darüber hinaus können Metallspritzer, die beim Schneiden entstehen, Werkzeug und Optik schädigen. Ein Vorteil des Laserstrahlschneidens liegt in der nahezu frei programmierbaren Schnittkontur. Dagegen kann beim Scherschneiden die Schnittkontur nur durch Austausch der Schneidelemente variiert werden.

Der tragende Querschnitt errechnet sich nach Schultz [120] als Produkt aus Nahtlänge und Einschweißtiefe h_{\min} in der Trennebene der beiden verschweißten Bleche. Die Stirnflachnaht erzeugt eine Verbindung in der Trennfuge zweier flach aufeinander liegender Bleche. Wie in Bild 4-6 dargestellt ist, beeinflusst jeder Nahtversatz in X- und in Z-Richtung den tragenden Nahtquerschnitt und damit die Festigkeit der Schweißverbindung. Bei der Stirnflachnaht ist ein Versatz in Z-Richtung wesentlich problematischer, da sich ein Nahtversatz wesentlich stärker auf den tragenden Nahtquerschnitt auswirkt als eine gleich große Defokussierung [110]. Eine optimale Prozessführung liegt vor, wenn die Mittelachse der Schweißnaht genau in der Trennfuge zwischen den beiden zu verschweißenden Blechen liegt. Ist die Nahtoberseite eben, so entspricht die Einschweißtiefe s der tragenden Einschweißtiefe h_{\min} der Schweißverbindung. Die erforderliche Bahngenauigkeit der Fügeinheit wird damit bei der Stirnflachnaht primär vom maximal zulässigen Nahtversatz bestimmt. Bei zu großem Versatz droht - neben der geringen Nahtfestigkeit - ein Umschmelzen der Kanten oder ein Verschweißen des Werkzeugs.

I-Naht



Stirnflachnaht (S-Naht)

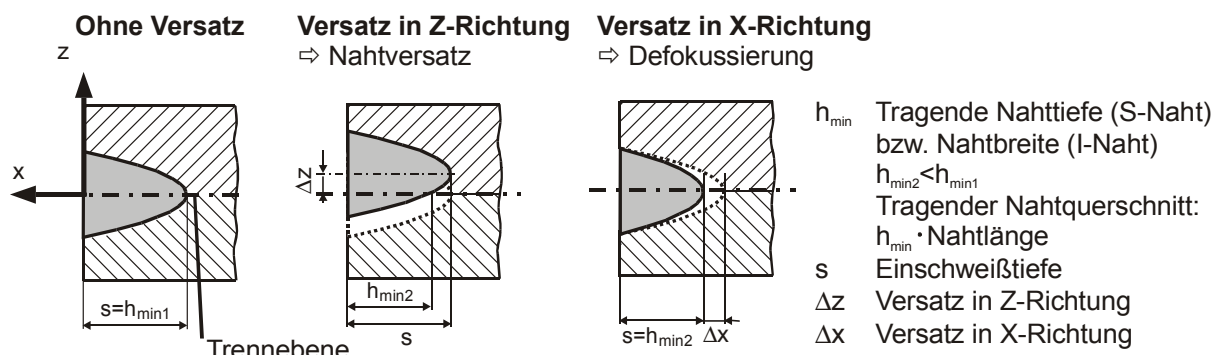


Bild 4-6: Auswirkungen eines Nahtversatzes bei I- und Stirnflachnaht

Die Trennoperation ermöglicht eine gleichmäßige Flanschbreite. Die minimale Flanschbreite wird durch zwei Bedingungen festgelegt: der Flansch muss so groß sein, dass ein prozesssicheres Spannen des Bauteils zwischen den Niederhaltern möglich ist und die Flanschbreite muss größer als die Einschweißtiefe sein. Beim anschließenden Ausformen kann der Flansch theoretisch vollständig eingezogen werden.

Tritt ein Fügspalt zwischen dem Blechpaar auf, so muss dieser mit Schmelze aufgefüllt werden, um eine Verbindung zwischen den beiden Blechen zu ermöglichen. Zwar kann davon ausgegangen werden, dass vor der Umformung die beiden Bleche durch die Niederhalterkräfte bündig aufeinanderliegen. Aufgrund der durch die Umformung entstehenden Spannungen sowie durch die Wärmeeinbringung beim Schweißen jedoch kann ein Verzug auftreten, der die Bleche an der Flanchaußenseite auseinander drückt. Wird ohne Zusatzmaterial geschweißt, ist eine Abnahme des tragenden Nahtquerschnittes die Folge. Die maximal überbrückbare Spaltbreite ist erreicht, wenn nicht mehr ausreichend Material in den Spalt nachfließen kann und somit ein Bundefehler entsteht. Dies erfolgt nach Schultz [120] ab einer Spaltbreite von circa 25 % der Blechdicke. Beim Laserstrahlschweißen wirkt sich ein größerer Fokusradius des Laserstrahls positiv auf die überbrückbare Spaltbreite aus. Deswegen kann es sich als vorteilhaft erweisen, defokussiert zu schweißen. Bei der Verwendung von Zusatzwerkstoff kann dieser einen Teil des Zwischenraumes auffüllen, was die überbrückbare Spaltbreite vergrößert.

| Kriterium/Anforderung | Bewertung* | Erläuterung |
|--|------------|---|
| Bauteilqualität | ++ | – Kombination der Vorteile des IHU von unverschweißten und verschweißten Blechen |
| Länge der Prozesskette | o | – Vier Haupt- und zwei Nebenprozesse |
| Komplexität des Umformwerkzeugs | - | – Ober- und Unterwerkzeug müssen aus je drei gegeneinander verfahrbaren Teilen bestehen. |
| Platzbedarf für die Fügeinheit | o | – Gute Zugänglichkeit im Umformwerkzeug – Geringer Platzbedarf in Z-Richtung |
| Bauteilflansch | + | – Gleichmäßiger, schmaler Flansch |
| Beeinflussung der Fügezone durch Kontamination | o | – Öl und Schmierstoff können sich negativ auf die Naht auswirken. – Eine Entgasung ist nur auf der Nahtaußenseite möglich. |
| Beeinflussung des IHU-Werkzeugs | o | – Wärmeeinfluss – Geringe Metallspritzerbildung |

Tabelle 4-4: Vor- und Nachteile der Variante 3 (Umformen, Trennen und Fügen im Werkzeug)

(* ++=sehr gut, +=gut, o=durchschnittlich, -=schlecht, --=sehr schlecht)

4.3.2.2 Modellierung der zu realisierenden integrierten Prozesskette

Die Verfahrensintegration der Trenn- und Fügeprozesse impliziert Anforderungen an die Systemtechnik, die über die sichere Beherrschung jedes Einzelprozesses hinausgehen. So benötigt beispielsweise die zu entwickelnde Fügeinheit einen Zugang zum Bauteilflansch im IHU-Werkzeug, was sowohl bei der Entwicklung des Umform- als auch des Fügeprozesses berücksichtigt werden muss. Soll eine Verschweißung über die gesamte Flanschlänge realisiert werden, muss ein mehrachsiger Schweißroboter gebaut werden. Darüber hinaus sind die Auswirkungen der Prozesse aufeinander - die Verknüpfung der Eingangs- und Ausgangsgrößen der Einzelprozesse - zu berücksichtigen, da zwischen den Prozessen keine Qualitätsprüfungen und Nacharbeiten mehr erfolgen.

Vorgelagerte Prozesse wie die Konstruktion oder das Zuschneiden der Bleche werden in der Modellierung mit aufgenommen, aber nicht näher untersucht. Das gleiche gilt für nachgelagerte mögliche Prozesse wie beispielsweise Lochen mittels IHU, ein anschließendes Beschneiden oder Waschen.

Bild 4-7 zeigt die dargestellten Verfahrensalternativen nochmals schematisch. Die Prozesse sind hierbei nummeriert und Verfahrensalternativen werden durch nachgestellte Buchstaben dargestellt. Die beschriebenen Varianten der Prozessketten sind durch Verbindungslinien dargestellt. Zwei zugeschnittene, unverschweißte bzw. in Prozess P23 vorverschweißte Bleche werden in eine Presse eingelegt (P25), beölt (P28) und im Prozess P30A bzw. P30B mittels IHU umgeformt. Bei Variante 2 erfolgt anschließend das Fügen mit einer I-Naht

(P50A) und bei Variante 3 ein mechanisches Beschneiden (P40A). Alternativ kann auch ein Beschneiden mittels Laserstrahlschneiden (P40B) stattfinden. Daran schließt sich bei Variante 3 das Fügen mit einer Stirnflachnaht an (P50B). Anschließend werden die Bauteile bei Variante 2 und 3 mit Innenhochdruck ausgeformt (P60). Daneben können weitere Prozesse wie beispielsweise IHU-Lochen (P70) in das Werkzeug integriert werden. Nach der Bauteilentnahme (P75) können ein mechanisches Beschneiden (P80A), ein Beschneiden mittels Laserstrahlschneiden (P80B) oder ein Waschen der Bauteile zur Entfernung von Schmierstoff und IHU-Medium erfolgen (P90). Diese Prozessschritte jedoch sollen nicht mehr integriert werden und bleiben deshalb genauso wie der vorgelagerte Konstruktionsprozess P10 und der Blechzuschnitt P20 unberücksichtigt.

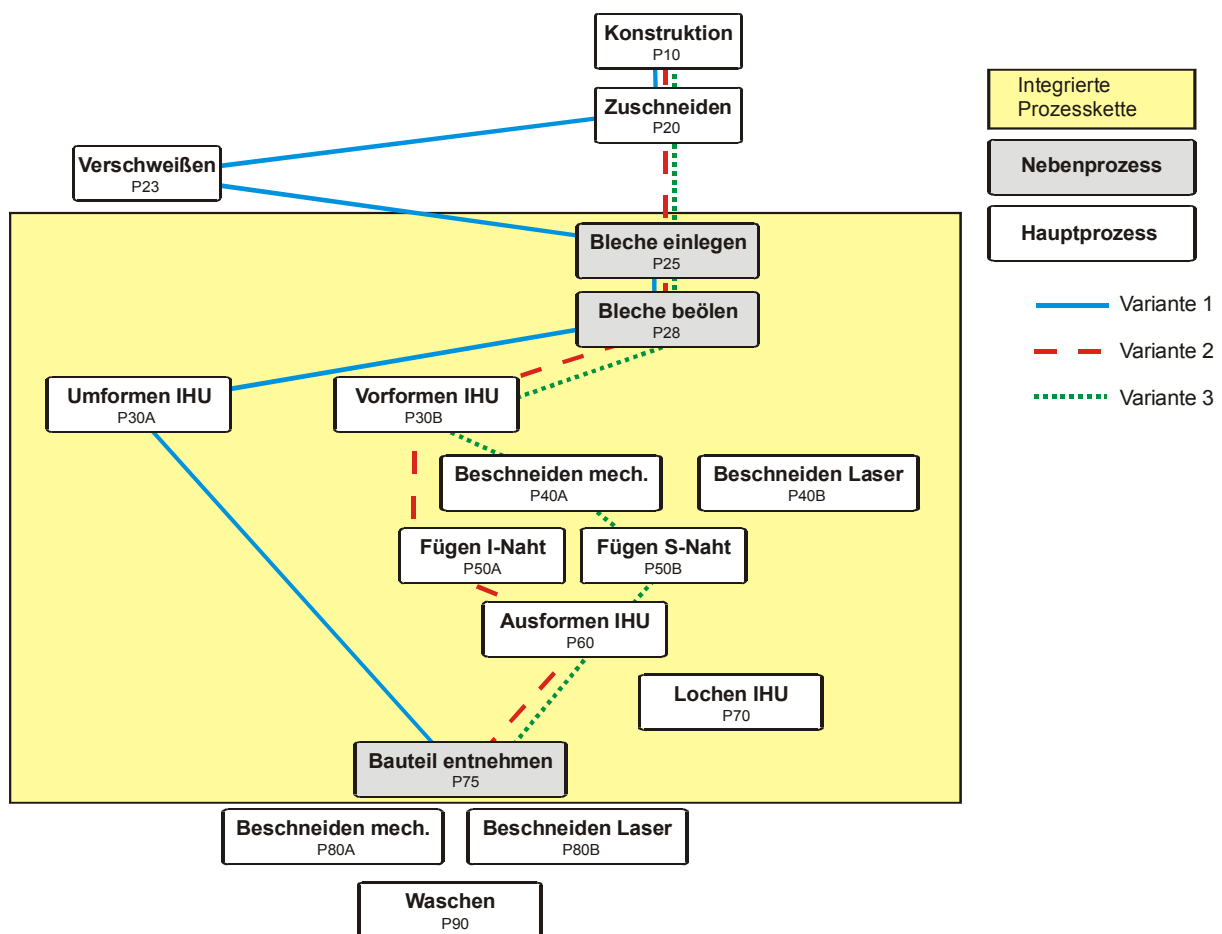


Bild 4-7: Darstellung möglicher integrierter Prozessketten

Tabelle 4-5 stellt die aufgeführten Alternativprozesse der Variante 3 zusammenfassend dar und bewertet sie in Anlehnung an eine Auswahlliste nach Pahl/Beitz [163] im Hinblick auf Prozesskettenverkürzung, Robustheit des Prozesses, Wirtschaftlichkeit (systemtechnischer Aufwand und Prozesskosten in der Fertigung), Taktzeit und Bauteilqualität. Die Bauteilqualität ergibt sich im Wesentlichen aus der Prozessflexibilität mit den zur Verfügung stehenden Optimierungsmöglichkeiten. Zur Vergleichbarkeit ist auch das konventionelle Tiefziehen mit aufgeführt. Damit ergibt sich die in Bild 4-8 dargestellte Prozesskettenverkürzung. Die Nebenprozesse sind grau hinterlegt.

| Vorformen | V | R | W | T | Q |
|--|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| - Tiefziehen* | - | o | + | + | o |
| - IHU | ++ | o | - | o | ++ |
| Trennen | | | | | |
| - Mechanisches Scherschneiden | + | + | + | ++ | o |
| - Laserstrahlschneiden | - | o | - | -- | ++ |
| Fügen | | | | | |
| - Herstellen einer punktförmigen Verbindung | | | | | |
| • Durchsetzfügen | + | + | ++ | + | -- |
| • Widerstandspunktschweißen | + | + | ++ | + | -- |
| - Herstellen einer linienförmigen Verbindung | | | | | |
| • Konventionelle Schweißverfahren | o | o | + | - | - |
| • Kleben | o | - | + | -- | -- |
| • Laserstrahlschweißen | o | o | - | - | ++ |
| Ausformen/Endformgebung (Kalibrieren) | | | | | |
| - Tiefziehen* | (Nicht möglich) | | | | |
| - IHU | + | + | o | o | ++ |

Tabelle 4-5: Vergleich verschiedener Varianten der Prozesskette hinsichtlich Verkürzung (V), Robustheit (R), Wirtschaftlichkeit/Systemtechnischer Aufwand (W), Taktzeit (T) und Bauteilqualität/Prozessflexibilität (Q) (* Konventionelle Prozesskette)

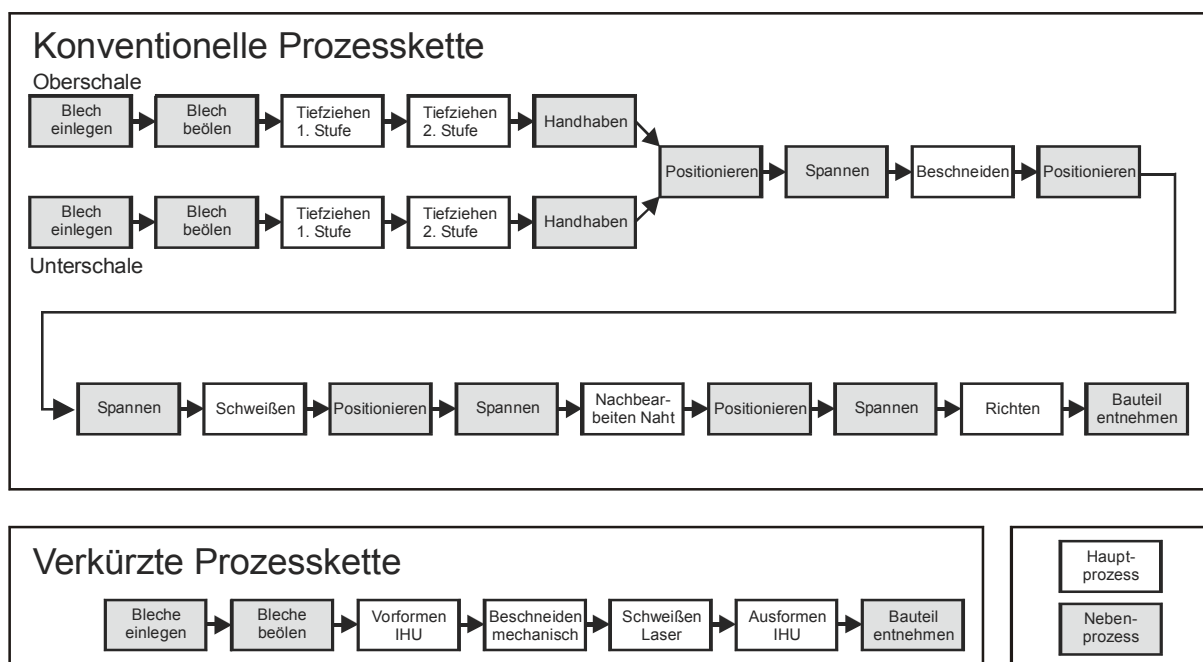


Bild 4-8: Konventionelle und verkürzte integrierte Prozesskette

Man erkennt eine sehr starke Verkürzung der Prozesskette. Lediglich bei der Be- und Entladung am Anfang und am Ende sind Nebenprozesse notwendig. Eine weitere Detaillierung der Prozesse im Rahmen der Konzeption ist in Bild 4-9 dargestellt. Der - nicht zu automatisierende - Prozess "Bauteilnahme" ist zur Erhöhung der Übersichtlichkeit nicht mit abgebildet.

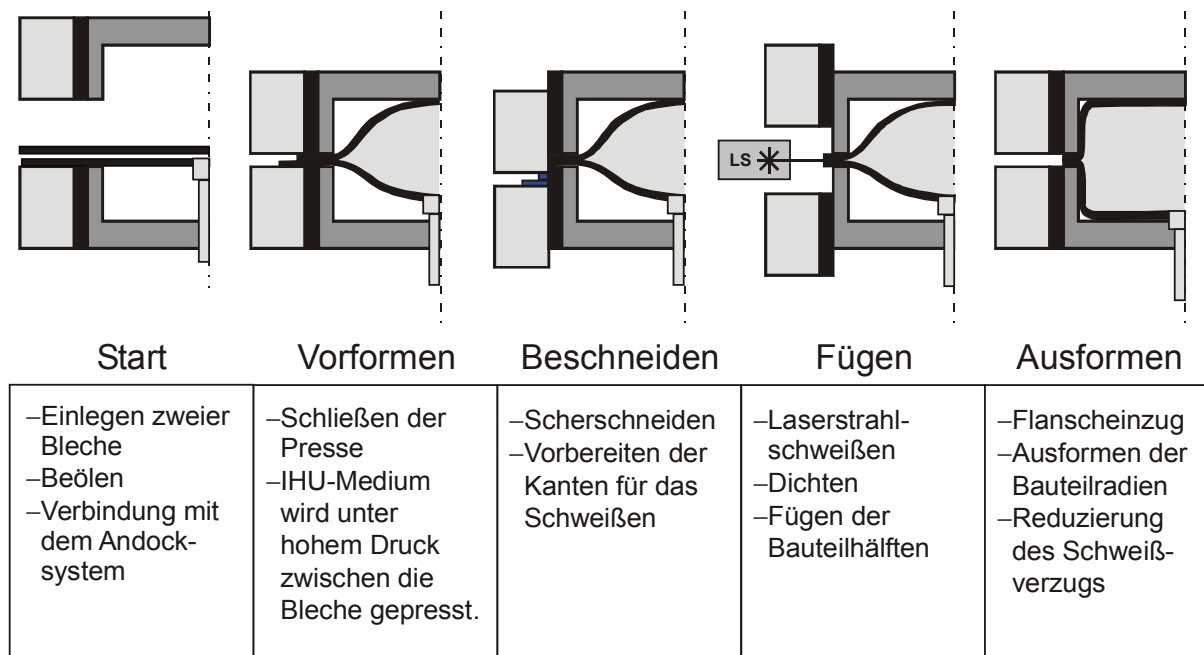


Bild 4-9: Modellierte Prozesskette zur integrierten Herstellung flächiger Hohlkörper durch Umformen, Trennen und Fügen

Neben dieser Prozesskette sind eine Reihe von Varianten denkbar. So können die Bleche beispielsweise bereits vor der ersten Umformung verschweißt werden. Um dies zu berücksichtigen, wird jedes Modul als selbständiger Prozess betrachtet, der an jeder beliebigen Stelle der Prozesskette platziert werden kann. Eine Änderung des Ablaufs erfordert lediglich die Anpassung der Modulreihenfolge und der Verknüpfungen der Ein- und Ausgänge.

4.4 Prozesstechnische Modellierung des Fügeprozesses

Im Sinne der Aufgabenstellung erfolgt nachfolgend eine Fokussierung auf die Integration des Fügeprozesses im Umformwerkzeug. Die Wechselbeziehungen des Fügeprozesses lassen sich in Auswirkungen auf den Fügeprozess und in Auswirkungen des Fügeprozesses auf nachfolgende Prozesse unterteilen. Die integrierten Umform- und Trennprozesse werden im Weiteren als Black Box aufgefasst, da sie Gegenstand anderer wissenschaftlicher Untersuchungen sind [59], [165], [166].

1. Auswirkungen des Vorformens auf den Schweißprozess

Aufgrund der Kontamination der Bauteiloberfläche mit Schmierstoff und IHU-Medium besteht eine erhöhte Gefahr der Metallspritzerbildung. Dies kann Optik und Werkzeug schädigen. Zudem ist von einer Verschlechterung der Schweißnahtqualität durch Poren und Einschlüsse in der Naht auszugehen.

2. Auswirkungen des mechanischen Scherschneidens auf den Schweißprozess

Das mechanische Scherschneiden erfolgt durch einen Schneidstempel, der zwischen den Werkzeugformen und Niederhaltern geführt wird. Bei ungünstigen Randbedingungen oder

nicht optimaler Prozessführung ist mit einem Kantenversatz, einem Kantenabzug, einem Schnittgrat oder einem Spalt zwischen den Blechen zu rechnen. Weiterhin kann ein Teil des Schnittabfalls am Bauteilflansch haften bleiben oder sich verhaken, wodurch Kollisionsgefahr mit dem Schweißroboter besteht. Die Eingangsgrößen des Schweißprozesses lassen sich in einem Ishikawa-Diagramm (vergleiche Pfeifer [174]) darstellen.

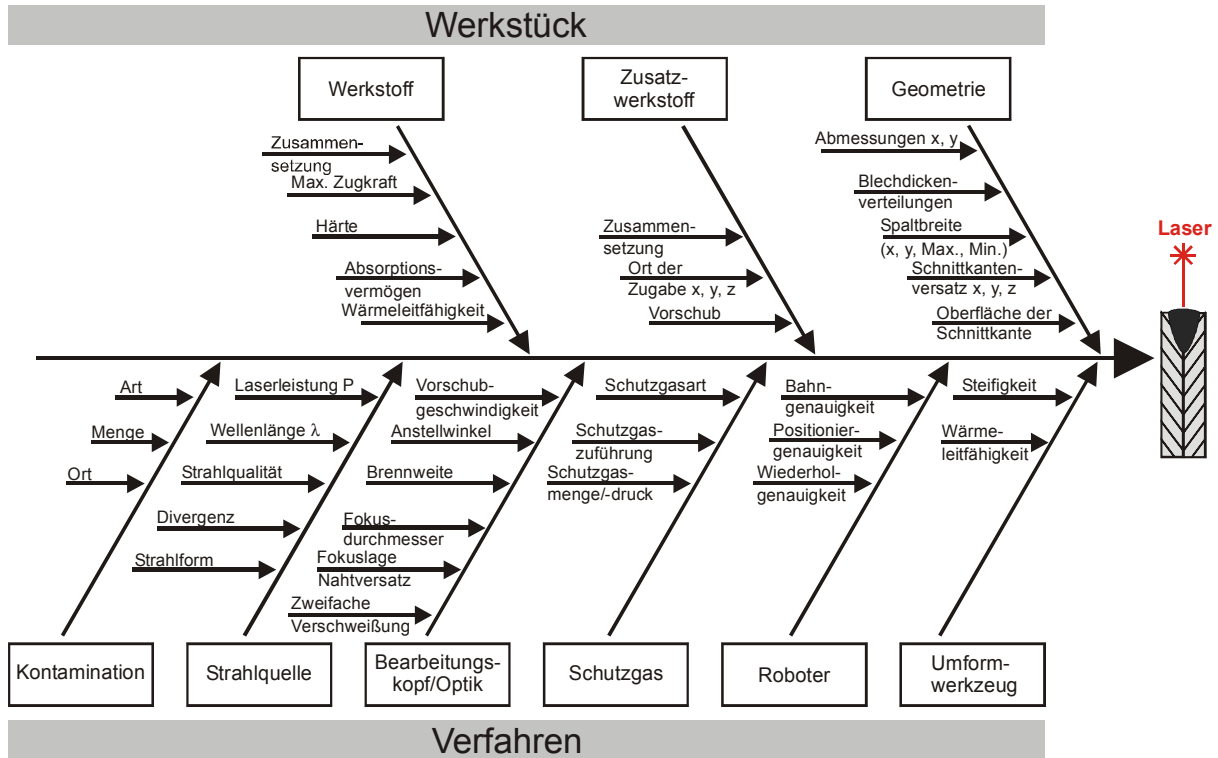


Bild 4-10: Eingangsgrößen des Schweißprozesses

Um die zu qualifizierenden Größen zu ermitteln, erfolgt eine Klassifizierung im Rahmen einer Pareto-Analyse (vergleiche Pfeifer [174]). Nach dem Pareto-Prinzip gibt es einige wenige Einflussgrößen, die einen großen Teil der relevanten Effekte erzeugen. Durch Analyse der gängigen Literatur zur Laserstrahlmaterialbearbeitung erfolgt eine Klassifikation der Eingangsgrößen in vier Stufen [5], [22], [105], [106], [107], [108], [109], [110], [111], [112], [113], [114], [115], [120]. Den Größen der Stufe A wird die höchste Relevanz beigemessen. Die Effekte der relevanten Eingangsgrößen auf die relevanten Ausgangsgrößen werden experimentell durch Parametervariation bestimmt.

| Klassifikation | Einfluss auf den Schweißprozess | Experimentelle Untersuchung in folgenden Abschnitten |
|----------------|---------------------------------|---|
| A | Sehr groß | – Modelluntersuchungen – Integrierter Prozess |
| B | Großer Einfluss möglich | – Modelluntersuchungen – Integrierter Prozess, wenn signifikant |
| C | Mittel | – Prüfung der Signifikanz in den Modelluntersuchungen – Integrierter Prozess, wenn signifikant |
| D | Gering | – Keine Untersuchung |

Tabelle 4-6: Klassifizierung der Ein- und Ausgangsgrößen

| Untergruppe | Eingangsgröße | Kl.* | Bemerkung |
|-----------------|---|------|---|
| Werkstück | | | |
| Werkstoff | Art und Zusammensetzung | C | Es wird lediglich DC04 betrachtet. |
| | Maximale Zugkraft | C | Die max. Zugkraft des eingesetzten Werkstoffs lässt sich aus der bekannten Zugfestigkeit berechnen. |
| | Härte | C | Die Härte von DC04 ist bekannt. Der Härteverlauf in der Naht wird experimentell untersucht (vgl. Ausgangsgrößen). |
| | Absorptionsvermögen | C | Bei DC04 ist von einer guten Absorption der Laserstrahlung auszugehen. |
| | Wärmeleitfähigkeit | C | DC04 verfügt über eine gute Wärmeleitfähigkeit. |
| Zusatzwerkstoff | Zusammensetzung | D | Zum Schweißen von DC04 ist kein Zusatzwerkstoff notwendig. |
| | Ort der Zugabe | D | "" |
| | Vorschub | D | "" |
| Geometrie | Abmessungen | C | Beim Scherschneiden ist von einer hohen Genauigkeit der Schnittkante auszugehen. |
| | Blechdickenverteilungen | C | Eine signifikante Blechdickenabnahme durch das Umformen wird im Flanschbereich nicht erwartet. |
| | Spaltbreite | C | Beim Schweißen im Werkzeug ist auf ein Auftreten eines Fügespaltes zu achten. Tritt dieser nicht auf, ist keine eingehende Untersuchung der überbrückbaren Spaltbreite notwendig. |
| | Schnittkantenversatz | C | Von einem Schnittkantenversatz ist nicht auszugehen. Dieser wäre bei optischer Begutachtung der Bauteile leicht detektierbar. |
| | Oberflächenbeschaffenheit der Schnittkante | C | Der Scherschneidprozess erzeugt einen Grat, der aber auf eine Stirnflachnaht keinen negativen Einfluss hat. |
| Verfahren (1) | | | |
| Kontamination | Art | A | Der Einfluss der Kontamination wird experimentell untersucht. |
| | Menge | B | Die Kontaminationsmenge kann im integrierten Prozess nicht eingestellt werden, sondern ergibt sich aus dem Umformprozess. |
| | Ort (Auf/zwischen den Blechen; Flanschaußenseite) | B | " |

Tabelle 4-7: Operationalisierung und Klassifizierung der Eingangsgrößen des Schweißprozesses (1)
(* Kl.=Klassifizierung)

| Untergruppe | Eingangsgröße | Kl.* | Bemerkung |
|----------------------------|---------------------------|------|---|
| Verfahren (2) | | | |
| Strahlquelle | Laserleistung P_L | A | Die Laserleistung beeinflusst Einschweißtiefe und max. Zugkraft der Naht. |
| | Wellenlänge λ | C | Aufgrund der einfacheren Strahlführung soll ein Nd:YAG-Laser verwendet werden. Die Wellenlänge ist nicht veränderbar. |
| | Strahlqualität | C | Laserleistung und Strahlkaustik werden gemessen. Aufgrund der Optik können sie nicht verändert werden. |
| | Divergenz | C | " |
| | Strahlform | C | " |
| Bearbeitungskopf/ Optik | Vorschubgeschwindigkeit | A | Die Effekte der Vorschubgeschwindigkeit werden in den experimentellen Untersuchungen ermittelt. |
| | Anstellwinkel | A | Die Effekte eines Anstellwinkels werden in den experimentellen Untersuchungen ermittelt. |
| | Brennweite | D | Die Strahlkaustik wird vermessen. Aufgrund der Optik kann sie nicht verändert werden. |
| | Fokusedurchmesser | B | "" |
| | Fokuslage | A | Die Effekte werden in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| | Nahtversatz | A | "" |
| | Zweifache Verschweißung | A | "" |
| Schutzgas | Schutzgasart | C | Als Schutzgas kommt Argon zum Einsatz, das für Laserstrahlschweißungen mit DC04 empfohlen wird (siehe Hügel [110]). |
| | Schutzgaszuführung | C | Die zugeführte Schutzgasmenge muss so groß sein, dass die Fugestelle ausreichend vor der Umgebungsluft abgeschirmt wird. Eine Parametervariation ist nicht erforderlich. |
| | Schutzgasmenge/ -druck | C | " |
| Roboter | Bahngenaugigkeit | B | Bei Vorliegen einer hohen Genauigkeit des Roboters ist keine Parametervariation mehr notwendig. |
| | Positioniergenauigkeit | B | " |
| | Wiederholgenauigkeit | B | " |
| Umformwerkzeug | Steifigkeit | D | Da das Umformwerkzeug für die hohen Drücke und Niederhalterkräfte beim IHU ausgelegt ist, ist davon auszugehen, dass die Beanspruchungen beim Laserstrahlschweißen nur vergleichsweise gering sind. |
| | Wärmeleitfähigkeit | C | Das Werkzeug weist eine hohe Wärmeleitfähigkeit auf (Stahlwerkstoff). Aufgrund der großen Masse wird von einer geringen Erwärmung beim Schweißen ausgegangen (vgl. Ausgangsgrößen). |

Tabelle 4-8: Operationalisierung und Klassifizierung der Eingangsgrößen des Schweißprozesses (2)
(* Kl.=Klassifizierung)

3. Auswirkungen des Schweißprozesses auf das Ausformen

Auch der Schweißprozess wirkt sich auf andere Prozesse aus. Besonders relevant ist die Auswirkung auf den nächsten Prozessschritt Ausformen, da dieser von großer Bedeutung für die erreichbare Produktqualität ist. Beim Einbringen von Wärme durch den Schweißprozess können Eigenspannungen und Verzug im Werkstück entstehen, die sich nach Hügel [110] negativ auf das Umformverhalten auswirken. Außerdem können Aufhärtungen im Nahtbereich auftreten. Wird ein Flanscheinzug beim Ausformen zugelassen, so kann ein stärkerer Verschleiß auftreten und es besteht ein höheres Versagensrisiko des Umformwerkzeugs. Während des Schweißens erwärmt sich das Werkzeug durch Wärmeleitung aus dem Bauteil. Dadurch können thermische Schädigungen oder Verzundern auftreten. Durch den Ausform- und Kalibriervorgang ist es möglich, den Schweißverzug des Bauteils zu eliminieren oder zumindest zu minimieren. Die Nebenausgangsgrößen auf das Ausformen sind in Tabelle 4-9 zusammenfassend dargestellt.

| Negative Folgen des Laserstrahlschweißens | Mögliche negative Auswirkung auf das Ausformen |
|--|---|
| Wärmeeinbringung in das Werkstück | <ul style="list-style-type: none"> – Veränderung der mechanischen Kennwerte des Werkstücks in der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone (Aufhärtung, Verzug) ⇒ Veränderte Reibungsverhältnisse, verändertes Umformverhalten ⇒ Instabilitäten, erhöhter Werkzeugverschleiß, Bauteilversagen |
| Wärmeeinbringung in das Werkzeug | <ul style="list-style-type: none"> – Thermische Belastung ⇒ Thermische Schädigung, erhöhter Werkzeugverschleiß, Verzug, Verzundern |
| Fehlerhafte Nahtgeometrie (Nahtüberhöhung, Wurzelüberhöhung, Kantenumschmelzung) | <ul style="list-style-type: none"> – Veränderte Reibungsverhältnisse, Klemmen ⇒ Erhöhter Werkzeugverschleiß, Versagen |
| Ungünstige Prozessführung; Prozessinstabilitäten | <ul style="list-style-type: none"> – Bundefehler in der Schweißnaht ⇒ Bauteil wird beim Umformen undicht. ⇒ Ungenügende Formfüllung |
| Schweißemissionen | <ul style="list-style-type: none"> – Verunreinigung des Werkzeugs (Ruß, Spritzer) ⇒ Reinigungsaufwand, Klemmen ⇒ Werkzeugschädigung |

Tabelle 4-9: Mögliche Schädigungsmechanismen des Schweißprozesses und Auswirkungen auf das Ausformen

4. Auswirkungen des Schweißprozesses auf andere Prozesse

Ebenso sind die Auswirkungen über die Prozesskette hinweg zu berücksichtigen, da mehrere Bauteile in der dargestellten Anordnung hergestellt werden sollen. So kann durch eine falsch programmierte Schweißbahn der Laser auf die Werkzeugoberfläche treffen und lokal eine Schädigung oder gar eine Aufschweißung bewirken. Dies kann bei mehrmaliger

Wiederholung zum Werkzeugversagen beim Umformen führen. Die Klassifizierung der Ausgangsgrößen erfolgt analog zu den Eingangsgrößen und ist in Tabelle 4-10 und Tabelle 4-11 sowie in Bild 4-11 dargestellt.

| Untergruppe | Ausgangsgröße | Kl.* | H/N* | Bemerkung |
|----------------------|---|------|------|---|
| Qualität Schweißnaht | | | | |
| Poren | Porengröße | B | N | Porengröße und -volumen werden in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| | Porenanzahl | B | N | " |
| | Porenvolumen | A | N | " |
| | Lunker | C | N | " |
| | Dichtheit | A | H | Die Dichtheit wird in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| Primär | Härteverlauf | B | N | Der Härteverlauf wird in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| | Einschweißtiefe | B | H | Die Einschweißtiefe wird in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| | Nahtbreite | C | H | Die Nahtbreite wird in Schlifflen bestimmt; hat aber nur einen sekundären Einfluss auf die Nahtqualität. |
| | Nahtvolumen | C | H | Das Nahtvolumen wird aus Schlifflen berechnet. |
| | Maximale Zugkraft | A | H | Die max. Zugkraft wird in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| | Dauerfestigkeit | B | H | Die Dauerfestigkeit der Naht wird in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| | Umformbarkeit | B | H | Die Umformbarkeit der Naht wird in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| Sekundär | Einfluss des Überschweißens | B | H | Die Nahtqualität beim Überschweißen (zweifache Verschweißung im Bereich der Nahtüberlappung) wird experimentell untersucht. |
| | Gefüge | C | N | Durch die geringe Wärmeeinbringung beim Laserstrahlschweißen sind die Gefügeveränderungen vernachlässigbar. |
| | Breite der Anlaufzone ↔ Wärmeeinbringung | C | N | Die Breite der Anlaufzone lässt sich leicht optisch detektieren, hat aber nur einen sekundären Einfluss auf die Nahtqualität. |
| | Verschmutzung der Naht (Ruß) | C | N | Fehler in der Naht lassen sich in Schlifflen detektieren. |

Tabelle 4-10: Operationalisierung und Klassifizierung der Ausgangsgrößen des Schweißprozesses (1)

(* Kl.=Klassifizierung; H=Haupt-, N=Nebenausgangsgröße)

| Untergruppe | Ausgangsgröße | Kl.* | H/N* | Bemerkung |
|-------------|---|------|------|---|
| Werkstück | | | | |
| Geometrie | Formfehler | C | N | Von Formfehlern der Naht ist nur bei einer fehlerhaften Schweißbahn auszugehen. |
| | Schweißverzug | C | N | Durch das nachfolgende Ausformen ist der Schweißverzug vernachlässigbar. |
| Werkstoff | Spannungen | D | N | Die durch das Laserstrahlschweißen eingebrachten Spannungen sind wesentlich geringer als die durch die Umformung induzierten Spannungen und damit vernachlässigbar. |
| | Gefüge | D | N | Durch die geringe Wärmeeinbringung beim Laserstrahlschweißen sind die Gefügeveränderungen vernachlässigbar. |
| | Erwärmung/ Wärmeleitung | D | N | Durch den IHU-Prozess ist eine gute Kühlung der Bauteile gegeben. |
| Verfahren | Metallspritzer | A | N | Die Metallspritzerbildung wird in den experimentellen Untersuchungen bestimmt. |
| | Schädigung Umformwerkzeug (Anschweißen) | A | N | Der Fügeprozess ist durch Wahl geeigneter Prozessparameter und Schweißbahnen so zu gestalten, dass eine Schädigung vermieden wird. |
| | Rauch- und Gasmenge | C | N | Die Rauch- und Gasmenge wird in den experimentellen Untersuchungen begutachtet und ggf. eine Absaugung vorgesehen. |
| | Erwärmung/ Wärmeleitung | D | N | Durch die große Werkzeugmasse und die vergleichsweise geringe Energieeinbringung beim Laserstrahlschweißen ist von keiner relevanten Erwärmung auszugehen. |

Tabelle 4-11: Operationalisierung und Klassifizierung der Ausgangsgrößen des Schweißprozesses (2)

(* Kl.=Klassifizierung; H=Haupt-, N=Nebenausgangsgröße)

4.5 Systemtechnische Modellierung des Fügeprozesses

Die Entwicklung eines Konzeptes für den integrierten Schweißroboter erfordert zunächst die Erstellung eines Anforderungskatalogs. Dieser enthält neben allgemeinen Parametern und lasertechnischen Anforderungen auch Vorgaben für den Aufbau und das dynamische Verhalten des Systems. Dazu werden nach der Entwicklung eines Konzeptes eine Virtual-Reality-Simulation und eine mathematische Modellierung der Verfahrenswege aller Achsen eingesetzt. Die Kinematik wird bezüglich der für das Laserstrahlschweißen bedeutsamen Parameter Bahngleichungen, -geschwindigkeiten und -beschleunigungen sowie resultierende Anstellwinkel untersucht. Dabei wird zunächst für einen theoretisch optimalen Schweißprozess ein Konzept der Achskinematik entwickelt, das mathematisch exakt formuliert werden kann. Anschließend erfolgt die Vorstellung von Näherungskonzepten, die einen Kompromiss zwischen den optimalen Schweißparametern und den Restriktionen der realen Achsen schließen. Dadurch wird schon frühzeitig im Entwicklungs- und Konstruktionsprozess im Sinne eines Simultaneous Engineerings eine Bahnplanungsstra-

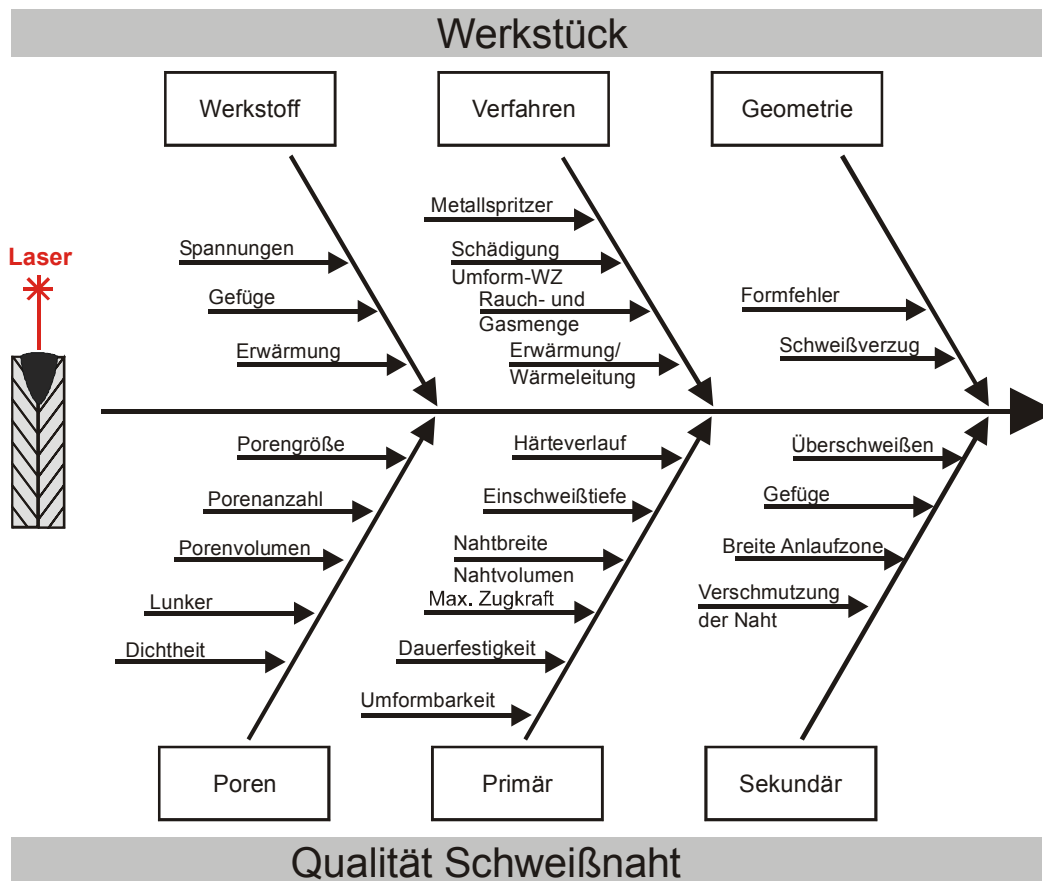


Bild 4-11: Ausgangsgrößen des Schweißprozesses (zu Abschnitt 4.4)

tegie entwickelt, die als Grundlage für die spätere NC-Programmierung dient. Weiterhin dienen die ermittelten Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Achsen als Grundlage für den nachfolgenden Konstruktionsprozess.

Anforderungen an den Schweißroboter

Hauptaufgabe des zu konstruierenden Roboters ist das Verschweißen zweier Blechpaare innerhalb der IHU-Pressen. Neben der Strahlführung sollen eine Vorrichtung zum Schweißen mit Zusatzwerkstoff und eine Schweißsensorik integrierbar sein. Zur Zuführung der Leistungs- und Steuerleitungen, der Glasfaser sowie der Schläuche für Kühlwasser und Druckluft muss eine geeignete Kabelführung entwickelt werden. Diese Komponenten müssen in dem zur Verfügung stehenden beengten Arbeitsraum innerhalb der Presse untergebracht werden. Für das zu entwickelnde Konzept werden die in Tabelle 4-12 dargestellten Varianten untersucht.

Die Realisierung mit einem einzigen Knickarmroboter ist aufgrund der Kinematik nicht möglich. Bei Verwendung je eines Knickarmroboters vor und hinter der Presse lässt sich die Verschweißung einfach realisieren, allerdings erfordert dies neben den hohen Investitionskosten einen großen Platzbedarf, der bei der vorliegenden Presse nicht gegeben ist. Überdies weist die erzeugte Schweißnaht zwei Nahtüberlappungen auf. Mit einem Portal- oder Säulenroboter lässt sich die Führungsaufgabe nicht lösen. Eine gute Raumnutzung bietet ein Säulenroboter, der auf einem Drehkranz montiert ist. Hierfür jedoch ist ein vollständiger Eigenbau notwendig.

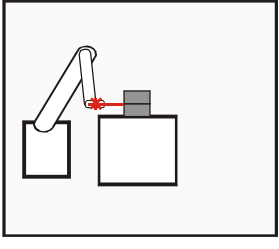
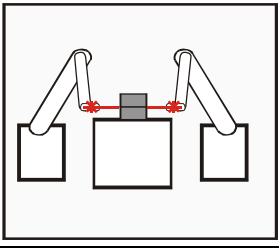
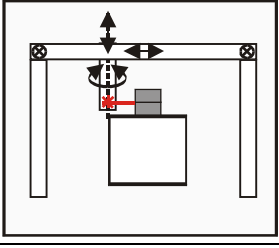
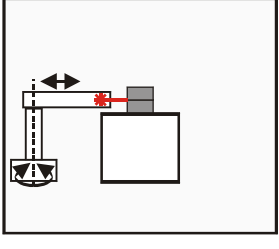
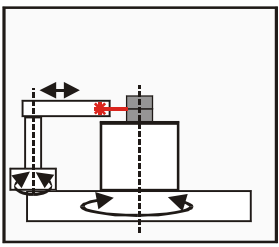
| Beschreibung | Vorteile | Nachteile |
|--|--|---|
| Ein Knickarmroboter  | <ul style="list-style-type: none"> – Standard-Industrieroboter – Einfache Programmierung | <ul style="list-style-type: none"> – Zugänglichkeit für 360°-Schweißung sehr schwierig |
| Zwei Knickarmroboter  | <ul style="list-style-type: none"> – Standard-Industrieroboter – Einfache Programmierung | <ul style="list-style-type: none"> – Hohe Investitionskosten – Großer Platzbedarf vor und hinter der Presse – Zwei Nahtüberlappungen – Kollisionsgefahr |
| Portalroboter  | <ul style="list-style-type: none"> – Einfache Achstransformation – Einfache Programmierung – Aufbau aus Standardkomponenten | <ul style="list-style-type: none"> – Im Pressenarbeitsraum nicht realisierbar |
| Säulenroboter  | <ul style="list-style-type: none"> – Standard-Industrieroboter – Relativ einfache Programmierung | <ul style="list-style-type: none"> – Keine Schweißung >360° möglich |
| Säulenroboter auf Drehkranz  | <ul style="list-style-type: none"> – Schweißung >360° möglich – geringer Platzbedarf | <ul style="list-style-type: none"> – Eigenkonstruktion erforderlich – Komplizierte Achstransformation |

Tabelle 4-12: Kinematiken für den integrierten Schweißroboter

Bild 4-12 zeigt auf der linken Seite das Konzept des Roboters. Der Bearbeitungskopf ist an einer linearen Zustellachse L montiert. Da das Werkstück eine ebene Trennfläche aufweist, ist eine Z-Achse für die gestellte Aufgabe nicht erforderlich. Sie wird dennoch vorgesehen, um auch ähnliche Werkzeuggeometrien mit nichtebener Trennfläche schweißen zu können und gegebenenfalls Fehler in der Parallelität zwischen Werkzeugtrennebene und Roboter-

verfahrebene ausgleichen zu können. Diese Fehler können auch bei exakter Justage der Ebenen durch lokal unterschiedliche Niederhalterkräfte beim Umformen entstehen [4]. Die beiden Linearachsen Z und L befinden sich auf einem Drehtisch (B-Achse mit Drehwinkel β). Dieser ist auf einem Drehkranz (A-Achse mit Drehwinkel α) montiert, der eine rotatorische Bewegung um das Werkzeug ermöglicht. Dabei müssen Drehwinkel von mehr als 360° zugelassen werden, um eine Nahtüberlappung zu ermöglichen.

Bei Stahlwerkstoffen zeigen Nd:YAG-Laser nach Hügel [110] und Treiber [113] eine bessere Energieeinkopplung als CO₂-Laser. Da der damit erzeugte Laserstrahl über eine Glasfaser geführt werden kann, lässt sich die Strahlführung wesentlich einfacher in den Schweißroboter integrieren als bei einem CO₂-Laser, der eine Führung über Spiegel erfordert.

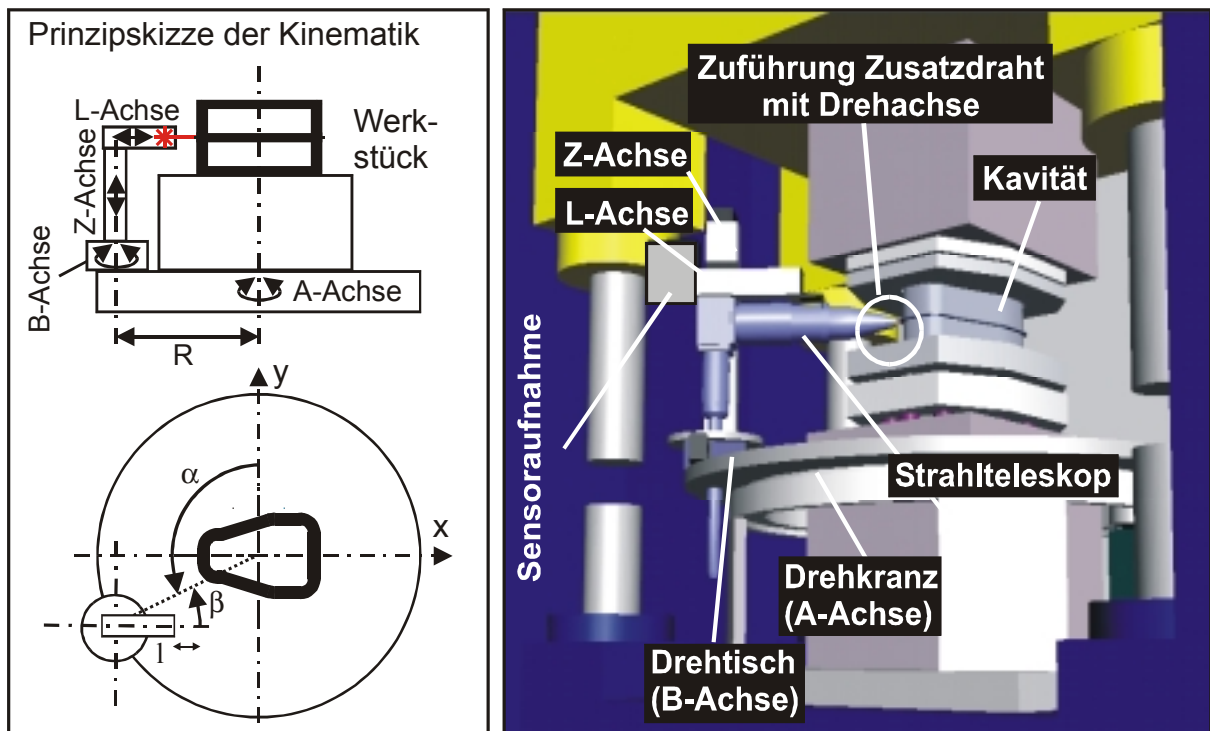


Bild 4-12: Ausgewähltes Konzept des Roboters (links) und Virtual-Reality-Simulation (rechts)

Bild 4-12 zeigt weiterhin eine Virtual-Reality-Simulation, die aufbauend auf diesem kinematischen Konzept realisiert wird. Presseneinbauroum und Umformwerkzeug werden nach vorliegenden CAD-Daten modelliert. Die Simulation liefert Werte für die erforderlichen Verfährwege der einzelnen Achsen. Die Daten reichen aber nicht aus, um sie in einen Anforderungskatalog für die Achsgeschwindigkeiten und -beschleunigungen im Rahmen der Konstruktion zu überführen. Deshalb wird die Kinematik im Nachfolgenden mit einer mathematischen Simulation untersucht. Der allgemeine dreidimensionale Fall kann für die vorliegende Anwendung in ein zweidimensionales Modell überführt werden, das in eine der nach [117] geschlossen lösbaren Klassen von Roboterkonfigurationen fällt.

In vorliegendem Anwendungsfall steht das Werkstück still (ortsfestes Koordinatensystem X/Y/Z) und der Roboter verfährt um das Werkstück.

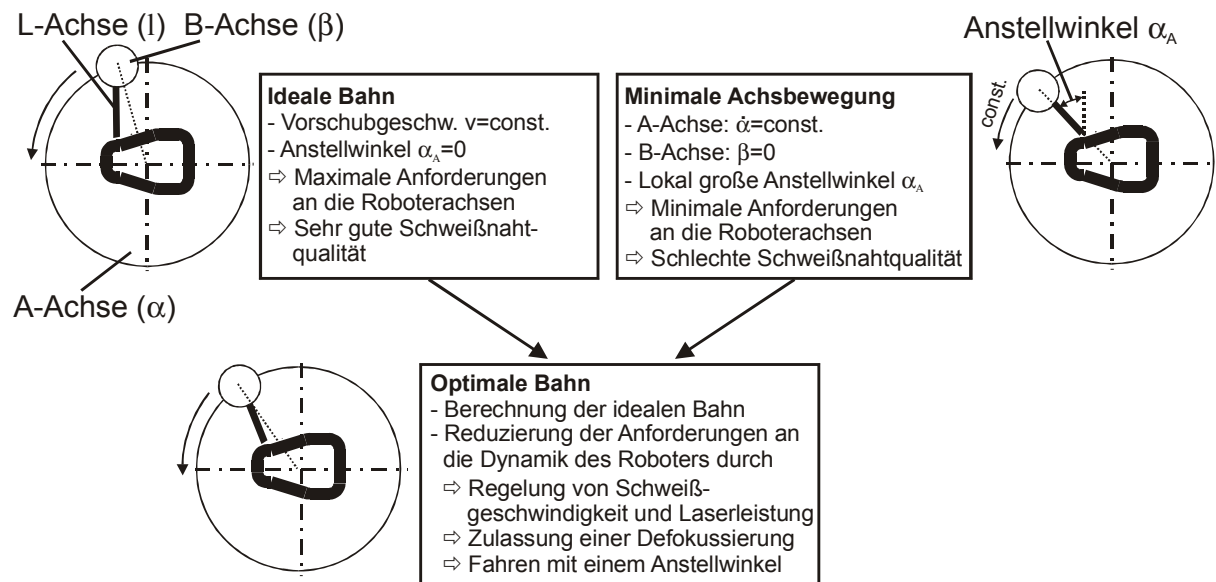


Bild 4-13: Strategien zur Bahnplanung

Im Rahmen der Bahnplanung lassen sich, wie in Bild 4-13 dargestellt, zwei gegensätzliche Strategien verfolgen. Eine ideale Schweißbahn ist durch folgende Randbedingungen gegeben:

- Schweißen ohne Anstellwinkel α_A . Der Laser trifft stets senkrecht auf die Oberfläche und die L-Achse steht damit immer senkrecht zum aktuellen Bahnabschnitt.
- Konstante Vorschubgeschwindigkeit v über die gesamte Bahn
- Konstante Laserleistung P_L
- Konstante Fokuslage $F=0$ (keine Defokussierung)
- Keine Restriktionen hinsichtlich Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Achsen

Den Gegensatz dazu stellt die Bahnplanung nach der Methode der minimalen Achsbewegung dar. Dabei wird die trägste Achse des Systems mit einer konstanten Geschwindigkeit bewegt. Im vorliegenden Anwendungsfall handelt es sich um die A-Achse, die einen Drehkranz als Lager benötigt, dessen Durchmesser wesentlich größer ist als die Kavität. Der Antrieb der A-Achse muss diesen Drehkranz, alle anderen Achsen mit ihren Antrieben und den Bearbeitungskopf bewegen. Die B-Achse verbleibt über die gesamte Schweißbahn hin in Ruhestellung. Die L-Achse, die über das größte Beschleunigungsvermögen verfügt, führt den Bearbeitungskopf mit einem konstanten Abstand zur Werkstückoberfläche. Besonders interessant ist diese Variante bei Einsatz einer Abstandsregelung, die einen konstanten Abstand zwischen Bearbeitungskopf und Bauteilflansch einhält. Allerdings entstehen im vorliegenden Anwendungsfall Anstellwinkel über 30° und die Vorschubgeschwindigkeit ist nicht konstant.

Aus den aufgeführten beiden Extrempositionen lässt sich die Strategie für eine optimale Bahn synthetisieren. Dies erfordert zunächst die mathematische Modellierung der idealen Bahn in einer Rückwärtstransformation. Der Ursprung des globalen kartesischen Koordinatensystems wird in den Mittelpunkt des Drehkranzes gelegt. Eine Drehung gegen den Uhrzeigersinn entspricht der mathematisch positiven Drehrichtung. Die kartesischen Werkzeugkoordinaten x , y und z können durch die folgenden Gleichungen beschrieben werden. Diese sind für alle

vier Quadranten gültig, was anhand einfacher trigonometrischer Überlegungen nachvollzogen werden kann (siehe beispielsweise [175]):

$$x(t) = R \cos \alpha(t) - l(t) \cos[\alpha(t) + \beta(t)] \quad (6)$$

$$y(t) = R \sin \alpha(t) - l(t) \sin[\alpha(t) + \beta(t)] \quad (7)$$

Da die Z-Achse (Höhenachse) durch eine Linearachse in Z-Richtung realisiert wird, muss hierfür kein geometrischer Zusammenhang angegeben werden. Für die Geschwindigkeiten ergeben sich durch Ableitung folgende Terme:

$$\dot{x}(t) = -R \sin \alpha(t) \dot{\alpha}(t) + l(t) \sin[\alpha(t) + \beta(t)] [\dot{\alpha}(t) + \dot{\beta}(t)] - \dot{l}(t) \cos[\alpha(t) + \beta(t)] \quad (8)$$

$$\dot{y}(t) = R \cos \alpha(t) \dot{\alpha}(t) - l(t) \cos[\alpha(t) + \beta(t)] [\dot{\alpha}(t) + \dot{\beta}(t)] - \dot{l}(t) \sin[\alpha(t) + \beta(t)] \quad (9)$$

Die Beschleunigungen berechnen sich durch erneutes Ableiten. Bei einer optimalen Schweißbahn gilt folgende Randbedingung:

$$v(t) = \text{const} \Leftrightarrow a(t) = 0 \quad (10)$$

Diese Werte können durch quadratische Überlagerung der einzelnen kartesischen Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe berechnet werden.

$$v(t) = \sqrt{\dot{x}(t)^2 + \dot{y}(t)^2 + \dot{z}(t)^2} \quad (11)$$

$$a(t) = \sqrt{\ddot{x}(t)^2 + \ddot{y}(t)^2 + \ddot{z}(t)^2} = 0 \quad (12)$$

Die Verfahrenswege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen für jede Achse werden nach folgendem Schema ermittelt:

1. Aufteilung der Schweißbahn in 18 Einzelabschnitte (vergleiche Bild 4-14 oben links)
2. Bereichsweise Definition der Bahngleichung als Geradenstück oder Kreisbogen
3. Kopplung der einzelnen Bahnabschnitte mit der Geometrie des Schweißroboters unter Annahme eines idealen Schweißprozesses
4. Durchführung der Rückwärtstransformation durch Berechnung der zeitvariablen Maschinenkoordinaten $\alpha(t)$, $\beta(t)$, $l(t)$ mit Hilfe des Mathematikprogramms Maple V
5. Ermittlung der Geschwindigkeits- und Beschleunigungsverläufe durch Bildung der ersten und zweiten Ableitungen

Die Ergebnisse der Berechnung sind in Bild 4-14 dargestellt. Die angegebenen Zahlenwerte gelten für eine Vorschubgeschwindigkeit $v=5$ m/min.

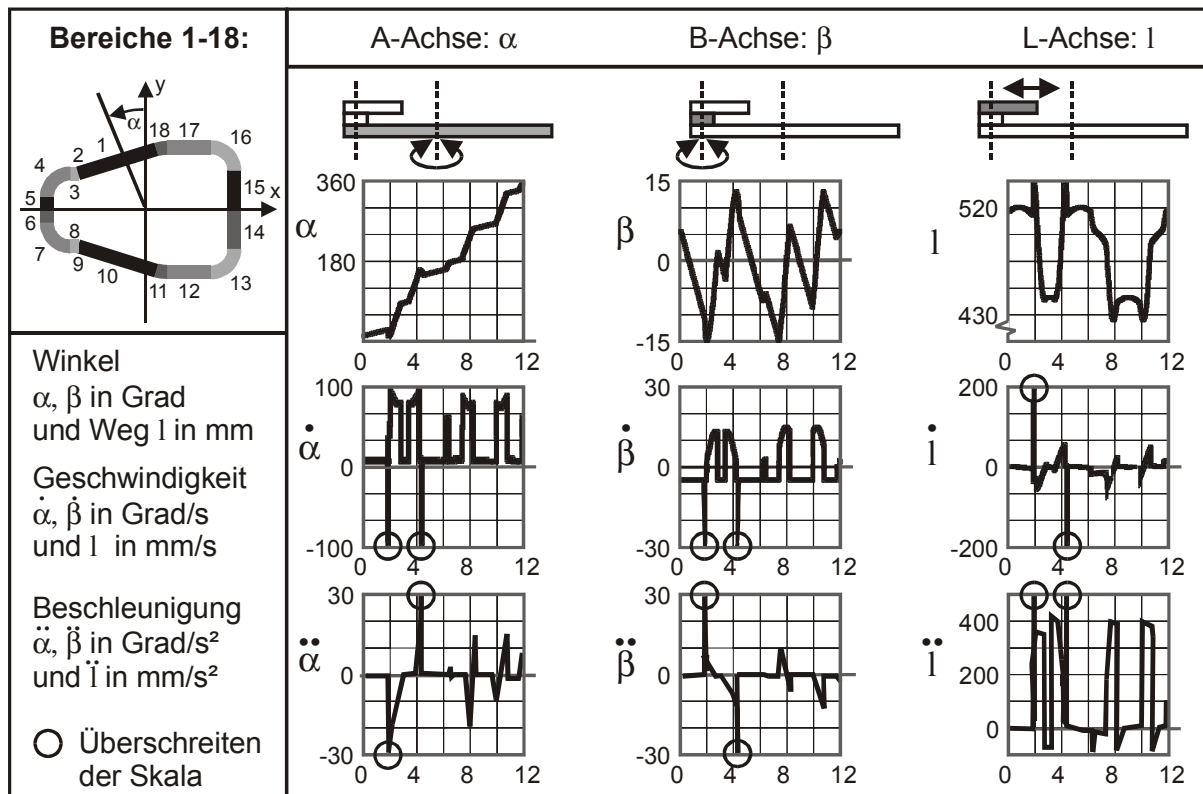


Bild 4-14: Ideale Verfahrswege/-winkel, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen. Die angegebenen Zahlenwerte gelten für $v=5$ m/min.

Die Berechnung der idealen Verfahrswege ergibt generell hohe Geschwindigkeits- und Beschleunigungswerte für die A-Achse (Drehwinkel α), die aufgrund ihrer großen Masse die trägste Achse des Systems darstellt. Weiterhin liegen extrem hohe Werte für alle Achsen an zwei Positionen vor. Für $v=5$ m/min sind die Zeiten nachfolgend in Klammern angegeben. Zu Beginn des Schweißprozesses ist im Bereich 1 des Flansches (siehe Bild 4-14) ein Anstieg von α festzustellen, dem im Bereich 2 ein starker Abfall in etwa gleicher Höhe folgt. Dies erklärt den hohen negativen Wert der Geschwindigkeit $\dot{\alpha}$ in diesem Bereich ($t=2$ s) und die große negative Beschleunigung $\ddot{\alpha}$. Während die Beschleunigung der A-Achse im Bereich 1 niedrig ist, muss im Bereich 2 eine hohe Beschleunigung in die entgegengesetzte Richtung erfolgen, um die Drehrichtung der A-Achse umzukehren. Bereich 3 stellt wie Bereich 5 als kurzes Geradenstück nur geringe Anforderungen an den Roboter, während im Viertelkreisbogen des Bereichs 4 hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen notwendig sind. Die Bereiche 6 bis 10 können aufgrund der Achssymmetrie analog zu den Bereichen 1 bis 5 interpretiert werden. Während α im gleichen Maße weiter ansteigt, verhalten sich $\dot{\alpha}$ und $\ddot{\alpha}$ genau spiegelbildlich. Die Bereiche 11 bis 14 sind ebenfalls achsensymmetrisch zu 15 bis 18. Bereich 15 stellt ein unkritisches Geradenstück dar, während der Bereich 16 (symmetrisch zu 4) wieder einen kritischen Viertelkreisbogen beinhaltet. Gleiches gilt für Bereich 17, der symmetrisch zu Bereich 3 ist.

A-priori-Bahnoptimierung

Aus den mathematisch modellierten Anforderungen an die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Achsen ist erkenntlich, dass die Führungsmaschine bei engen Radien

nicht in der Lage ist, die dort erforderliche, schnelle Umlagerung des Bearbeitungskopfes mit der notwendigen Geschwindigkeit auszuführen (vergleiche Backes [119]).

Da die mathematische Modellierung nur für einen idealisierten Prozess gilt, ist es nicht möglich, das vollständige NC-Programm vor Inbetriebnahme des Roboters zu erstellen. Es wird deshalb nach Spur [176] ein so genanntes hybrides Programmierverfahren angewendet. Da das Werkstück bereits als CAD-Modell vorliegt, bietet es sich an, ein Grobprogramm offline zu erstellen und anschließend kritische Bereiche iterativ zu optimieren. Für diese kritischen Bereiche sollen im Vorfeld Optimierungsstrategien dargestellt werden. Es handelt sich um die Bereiche 2, 4, 16 und 18, in denen enge Radien abgefahren werden müssen.

In den Bereichen 1 und 2 (kleiner Innenradius) wird der Drehwinkel der B-Achse auf Null gesetzt. Zu Beginn von Bereich 3 ist dadurch ein schleppender Anstellwinkel vorhanden. Dieser Anstellwinkel wird bis zum Ende des Bereichs 3 auf 30° vergrößert. Die Richtungskehr des Drehkranses in Bereich 2 wird umgangen und die dynamischen Anforderungen reduzieren sich. Die hohen dynamischen Anforderungen in Bereich 4 werden verringert, indem der Bearbeitungskopf mit einem schleppenden Anstellwinkel von 30° in den Viertelkreis einfährt und diesen mit einem stechenden Anstellwinkel von 30° verlässt. Der notwendige Verfahrensweg α reduziert sich von circa 80° auf weniger als 30° . Die mittlere Geschwindigkeit der A-Achse verringert sich bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min von circa 95 %/s auf 35 %/s.

Im Bereich 5 wird der Anstellwinkel von 30° stechend bis 0° verändert. Am Ende des Bereichs 6 wird wieder ein stechender Anstellwinkel von 30° vorgegeben und die Bereiche 7 bis 10 analog zu 1 bis 4 durchfahren. In den Bereichen 11 und 18 wird ein zu den Bereichen 2 und 9 analoges Vorgehen angewendet. Die Bereiche 13 und 16 gleichen 4 und 7 und werden deshalb ebenfalls mit Anstellwinkeln von 30° überfahren, wie in Bild 4-15 dargestellt ist. Da sich die Radien weiter vom Mittelpunkt des Koordinatensystems entfernt befinden, sind die dynamischen Anforderungen an den Roboter geringer. Im Anforderungskatalog werden nun die Verfahrenswege für jede Achse nach der Bahnplanung für die ideale Bahn und die Geschwindigkeiten und Beschleunigungen nach der Bahnplanung für die optimale Bahn festgelegt.

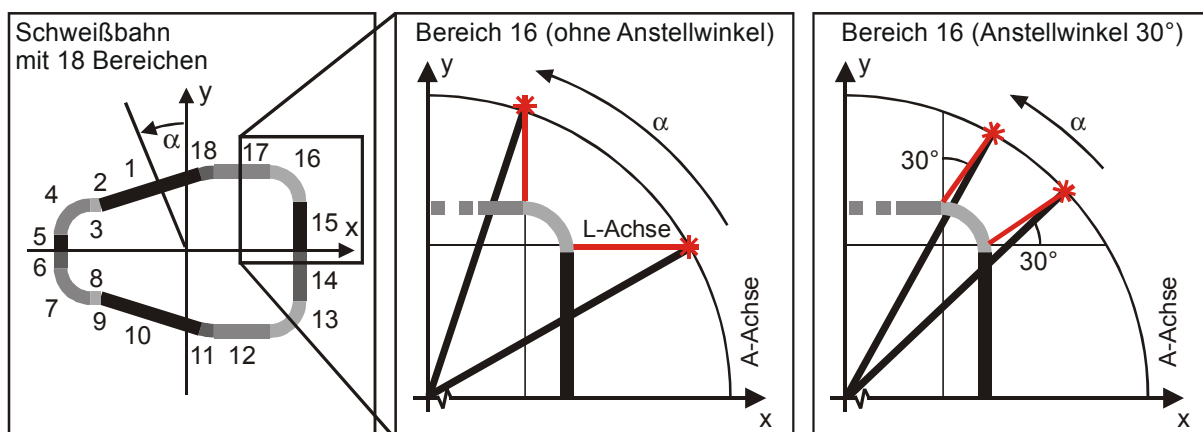


Bild 4-15: Abfahren des Bereichs 16 ohne Anstellwinkel und mit einem Anstellwinkel von 30°

5 Versuchseinrichtungen

5.1 Einleitung und Überblick

In diesem Kapitel werden die verwendeten Versuchsanlagen, Werkstoffe und Hilfsstoffe dargestellt. Da ein Schwerpunkt der durchgeführten Arbeiten in der Konstruktion und Implementierung des integrierten Füge Roboters liegt, wird dieser ausführlich vorgestellt. Aufgrund der Komplexität der Thematik jedoch soll nicht der gesamte Umfang der Phasen Entwurf und Ausarbeitung des methodischen Konstruktionsprozesses wiedergegeben werden. Es erfolgt vielmehr eine verallgemeinerte Darstellung der speziellen Aspekte zur Integration eines Laserstrahlschweißprozesses in einem Umformwerkzeug. Daraus lassen sich Konzepte für ähnliche Aufgabenstellungen ableiten.

5.2 Integriertes Werkzeug und Presse

Das integrierte Werkzeug besteht aus zwei Hälften, die aus je einer Kavität sowie einem Stützring und einem Niederhalter gebildet werden [166]. Stützring und Niederhalter bilden gleichzeitig die Schneidelemente. Während sich die drei Werkzeugelemente beim Innenhochdruck-Umformen in Höhe der Trennebene befinden, werden sie beim mechanischen Scherschneiden und beim Laserstrahlschweißen analog zur schematischen Abbildung in Bild 4-9 vertikal verfahren. Dies erfolgt durch Federkraft in Kombination mit einem aktiven hydraulischen Antrieb. Der in Abschnitt 5.3 dargestellte Schweißroboter ist über einen Drehkranz mit der Grundplatte des Werkzeugs verbunden.

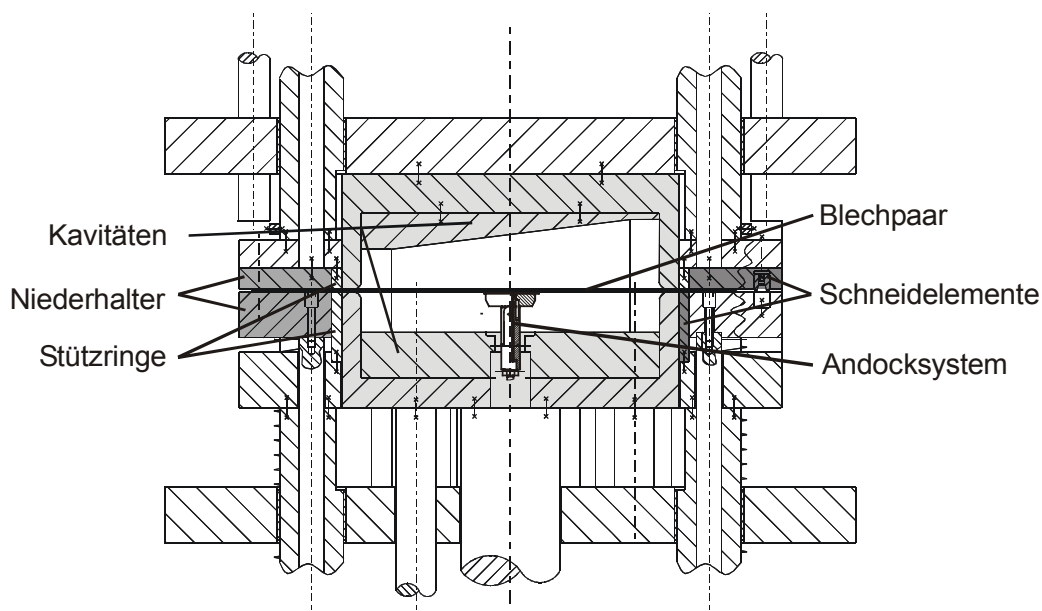


Bild 5-1: Längsschnitt durch die Umform- und Trenneinheit des integrierten Werkzeugs (vergleiche Bild 4-9) nach [177], [178]

Das Werkzeug wird in einer hydraulischen Presse des Typs Hydrap HPDZb 630 eingesetzt. Die Nennkraft des Hauptstößels entspricht der maximalen Niederhalterkraft und beträgt 6.300 kN. Mit dem verwendeten Hochdruckaggregat kann ein Innendruck von maximal 4.000 bar erzeugt werden [4].

5.3 Entwurf und Ausarbeitung des integrierten Füge Roboters

Hauptaufgabe des zu konstruierenden Roboters ist das Verschweißen zweier Blechpaare innerhalb der IHU-Pressen. Eine wesentliche Anforderung besteht in der Applikation einer linienförmigen Schweißnaht. Für Träger- und Strukturbauteile spielt die Dichtheit der Schweißnaht keine Rolle, da diese Teile oft über großflächige Durchbrüche verfügen. Um aber die Einsatzbereiche der integrierten Prozesskette im Hinblick auf geschlossene Hohlkörper wie beispielsweise Kraftstofftanks zu erweitern, wird zusätzlich der Wunsch nach einer durchgängig dichten Naht mit aufgenommen.

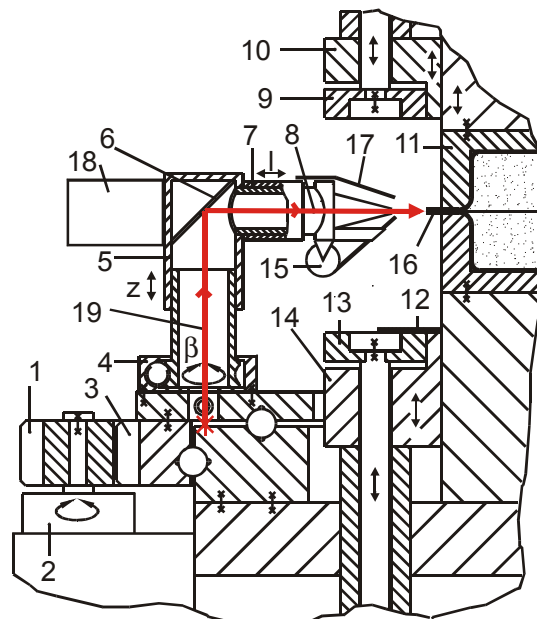
Wichtige Unterpunkte von Entwurf und Ausarbeitung sind die Integrierbarkeit einer geeigneten Sensorik zur Qualitätssicherung, einer Vorrichtung zum Schweißen mit Zusatzwerkstoff und die Entwicklung einer geeigneten Kabelführung. Weiterhin müssen lasertechnische Anforderungen wie absolute Staubfreiheit des Laserstrahlweges oder Abschirmung des Laserstrahls vor der Umwelt erfüllt werden. Alle Komponenten müssen in dem zur Verfügung stehenden beengten Arbeitsraum innerhalb der Presse untergebracht werden.

Die Merkmale des zu realisierenden Roboters lassen sich nach Pahl/Beitz [163] und VDI 2221 [161] in einer Anforderungsliste zusammenfassen. Diese Liste enthält die Anforderungen aus der mathematischen Modellierung sowie aus den Modelluntersuchungen (Abschnitt 6.2) an die Verfahrenswege, an das dynamische Verhalten des Roboters im Hinblick auf Verfahrensgeschwindigkeiten und -beschleunigungen und an das Schwingungsverhalten. In der Entwurfsphase (nach Pahl/Beitz [163] und VDI 2221 [161]) werden alternative Teillösungen entwickelt. Die am besten geeignete wird durch Kriterienbewertung ausgewählt. Anschließend erfolgen die Ausarbeitung der Konstruktion sowie Fertigung und Montage.

Der Laserstrahl wird im Laseraggregat erzeugt, dem Bearbeitungskopf mittels eines Lichtleitkabels über eine Faser-Faser-Kopplung zugeführt und nach dem Austreten aus der zweiten Faser mittels eines Kollimiermoduls parallelisiert. Durch den Einsatz zweier 90°-Umlenkspiegel wird der Laserstrahl auf die Fokussierlinse projiziert und auf den Fokus gebündelt. Bild 5-2 zeigt den aus der Konzeptskizze und der Virtual-Reality-Modellierung abgeleiteten Entwurf.

Der Roboter verfügt über vier Hauptachsen (A, B, L, Z), die in einem Interpolationskreis zur Achstransformation zusammengefasst werden sollen, sowie über zwei Nebenachsen (Vorschub Zusatzdraht und Steuerung der Laserleistung), die durch Analogausgänge angesteuert werden. Im Hinblick auf die Bearbeitung weiterer Werkstoffe neben Stahl, wie beispielsweise Aluminiumlegierungen, ist eine Vorrichtung zur Zuführung von Schweißzusatzdraht vorgesehen. Darüber hinaus können verschiedene Sensoren koaxial und im 45°-Winkel zum Strahlengang befestigt werden.

In Bild 5-3 ist die Modellierung der IHU-Pressen mit dem integrierten Schweißroboter ausschnittsweise dargestellt. Bild 5-4 zeigt das CAD-Modell des Roboters (ohne Spritz- und Strahlenschutz). Im Folgenden werden die für die Prozessintegration relevanten Aspekte von Aufbau und Funktion des Roboters beschrieben. Besonders relevant sind hierbei die schweißtechnischen und die robustheitsspezifischen Anforderungen an die Anlage.



- | | | | | | |
|---|------------------|----|---------------------------|----|-------------------|
| 1 | Ritzel Drehkranz | 7 | Teleskop L-Achse | 14 | Schneidmatrize |
| 2 | Motor Drehkranz | 8 | Fokussierlinse/Schutzglas | 15 | Drahtzuführung |
| 3 | Drehkranz | 9 | Schneidstempel | 16 | Bauteilflansch |
| 4 | Drehtisch | 10 | Niederhalter | 17 | Düse Schutzgas |
| 5 | Teleskop Z-Achse | 11 | IHU-Kavität | 18 | Koaxiale Sensorik |
| 6 | Umlenkspiegel | 12 | Schneidabfall | 19 | Laserstrahl |
| | | 13 | Gegenhalter | | |

Bild 5-2: Entwurfszeichnung des integrierten Schweißroboters (nach [179])

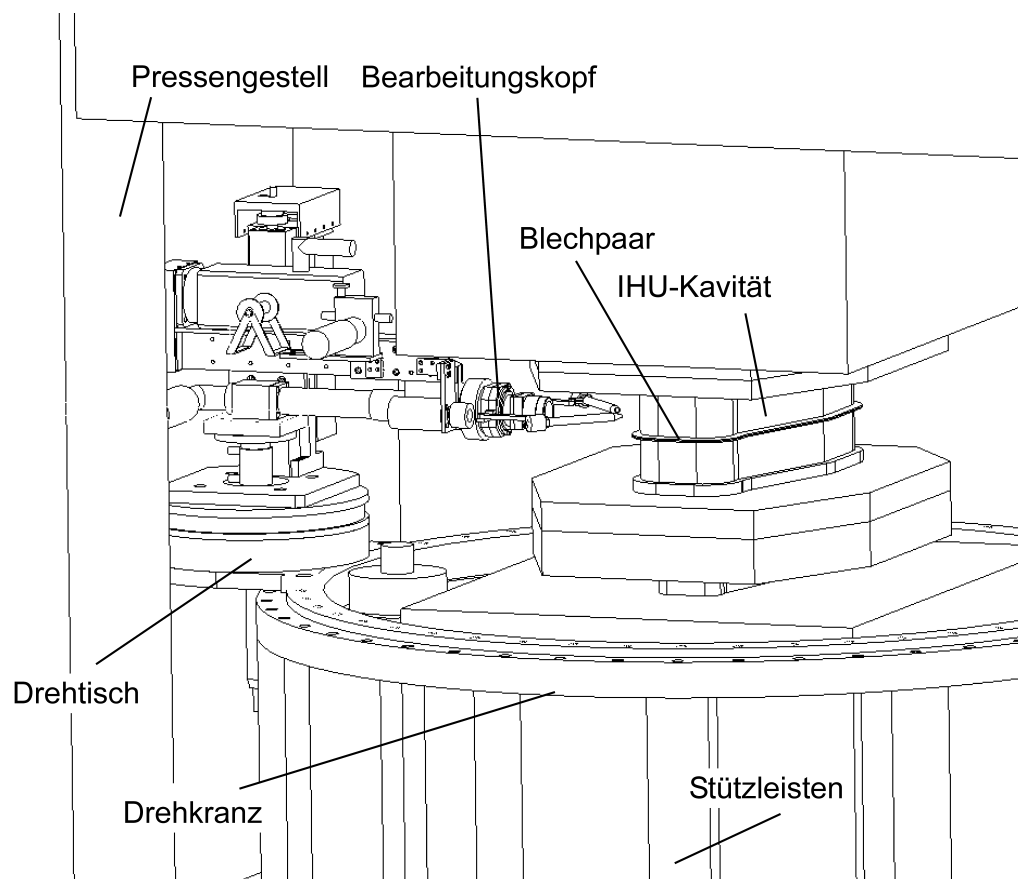


Bild 5-3: Virtuelle Montage des integrierten Werkzeugs (CAD-Modell)

Um die Ausmaße des Roboters möglichst klein zu halten, werden die Elemente Kollimation und Fokussierung der Strahlführung getrennt. Wie in Bild 5-4 oben rechts zu sehen ist, wird der Laserstrahl deshalb nach der Auskopplung aus der Glasfaser im Kollimationsmodul parallelisiert und in diesem defokussierten Zustand über zwei Umlenkspiegel der L-Achse zugeführt. Erst dort wird er über die Fokussierlinse durch ein Schutzglas auf das Werkstück gebündelt.

Durch die in Bild 5-3 gezeigte virtuelle Montage des Roboters in der Presse lässt sich der beengte Einbauraum optimal ausnutzen. Das Foto in Bild 5-5 verdeutlicht die Größenverhältnisse.

| Anforderung | Erfüllung |
|---|--|
| – Einfacher Ein- und Ausbau des integrierten Werkzeugs | – Bau einer Anschlussbox für alle Strom-, Druckluft- und Schutzgasleitungen – Einfacher Anschluss der Glasfaser über eine "plug-and-play"-fähige Faser-Faser-Kopplung |
| – Unempfindlichkeit der Anschlüsse gegenüber Kontaminationen | – Kapselung der Anschlussbox |
| – Robuste Zuführung der Daten- und Leistungsleitungen sowie der Glasfaser | – Entwicklung einer Schleppkettenführung mit automatischer Ansteuerung und Überwachung |
| – Sichere Strahlführung | – Strahlführung in Teleskopen – Schutz der Umlenkspiegel durch eigene Schutzgläser – Spritz- und Strahlschutz |
| – Genaue Lagemessung; keine Referenzfahrt beim Einschalten | – Alle Motoren sind mit Absolutweggebern ausgestattet (außer B-Achse). |

Tabelle 5-1: Globale Anforderungen an die Integration des Roboters und ihre Erfüllung

Technische Daten

Tabelle 5-2 gibt die maximal zugelassenen Verfährwege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Roboterachsen an. Es handelt sich hierbei um Maximalwerte, die in der Steuerung einprogrammiert sind, um einen sicheren Betrieb und die genaue Einhaltung der vorgegebenen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zu gewährleisten. Die Achsen und Motoren selbst ermöglichen höhere Geschwindigkeiten und Beschleunigungen.

| Maschinenachsname | Maschinenkoordinate | Minimaler Wert des Verfährwegs | Maximaler Wert des Verfährwegs | Maximale Geschwindigkeit | Maximale Beschleunigung |
|-------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| A | α | -240° | +223° | 10 U/min | 0,2 U/s ² |
| B | β | -35° | +70° | 10 U/min | 10 U/s ² |
| L | l | 80 mm | 215 mm | 8 m/min | 10 m/s ² |
| Z | z | 87 mm | 215 mm | 8 m/min | 3 m/s ² |

Tabelle 5-2: Zulässige Verfährwege, Geschwindigkeiten und Beschleunigungen der Roboterachsen

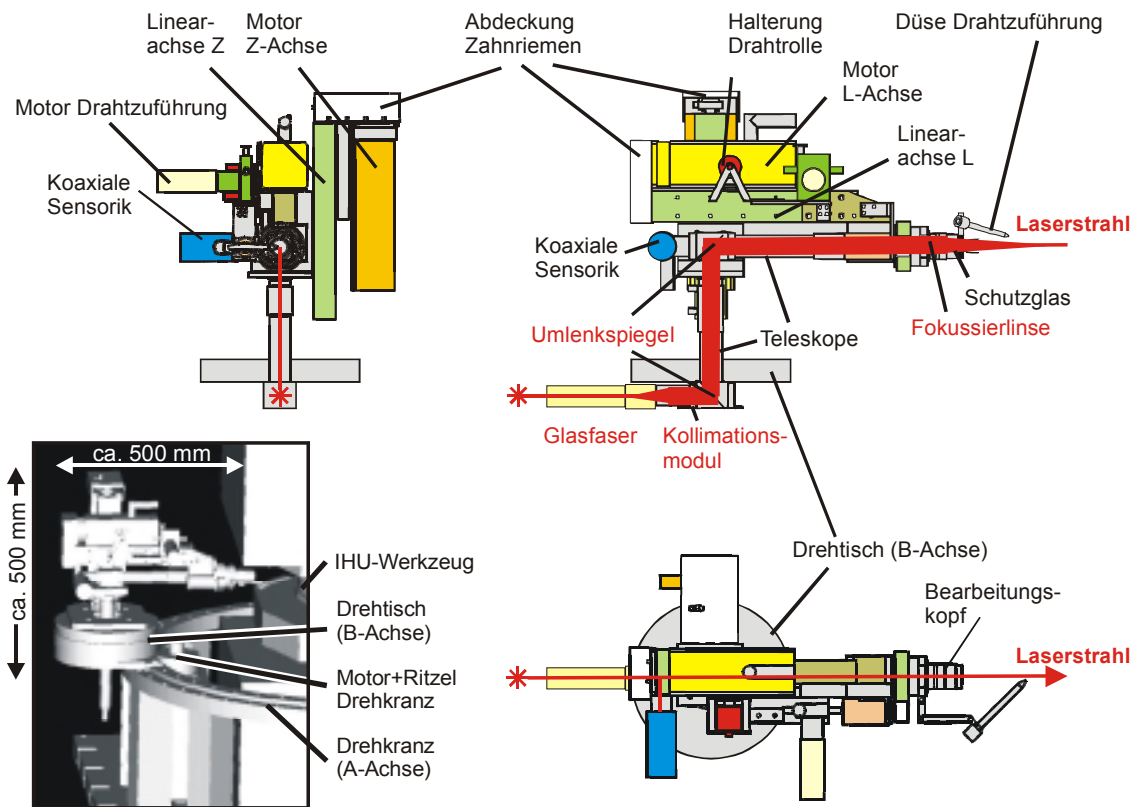


Bild 5-4: Bestandteile des Roboters (CAD-Modell) mit Strahlführung und -formung (ohne Düse Schutzgas und Spritz- und Strahlschutz)

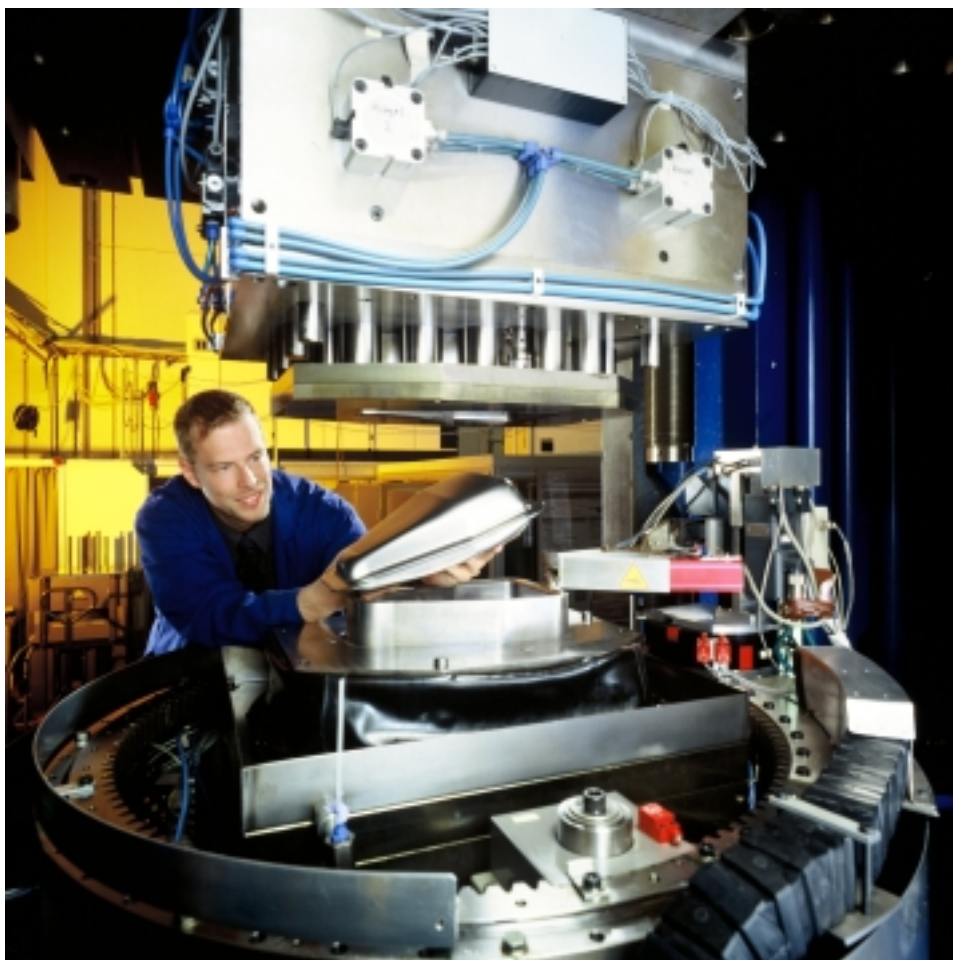


Bild 5-5: Umformwerkzeug mit integriertem Schweißroboter und hergestelltem Bauteil

Drehkranz und Drehtisch (A- und B-Achse)

Der gesamte Aufbau von Werkzeug und Roboter erfolgt auf einer CNC-gefertigten massiven Grundplatte. Der Drehkranz (A-Achse) ist auf Stützen befestigt und wird mittels dreier Zylinderhülsen zentriert (siehe Bild 5-6). Der Antrieb erfolgt über einen Drehstrom-Servomotor (maximales Drehmoment 6,6 Nm) mit Planetengetriebe über ein Zahnritzel. Das maximale Drehmoment am Drehkranz beträgt 550 Nm. Am Drehkranz ist der Drehtisch (B-Achse) befestigt (Abstand der Mittelpunkte von Drehtisch und Drehkranz: 625 mm). Dieser ist mit einem integrierten elektrodynamischen Synchron-Direktantrieb ausgestattet. Durch eine Bohrung in der Tischmitte wird ein Teleskop mit dem Laserstrahl geführt.

Eine Eigenentwicklung stellt die Führung der Schleppkette für die Daten- und Leistungsleitungen, für die Druckluft- und Kühlwasserzufuhr sowie für die Glasfaser über klappbare Rollen dar, die an den Stützen befestigt sind (in Bild 5-6 nicht mit abgebildet). Die Rollen werden automatisch je nach Drehwinkel auf- und abgeklappt, ohne dass dazu separate Befehle im NC-Programm notwendig sind. Die notwendigen Befehle sind im SPS-Programm der Steuerung abgelegt. Die Anforderungen an die beiden Drehachsen, die sich aus dem zu realisierenden Schweißprozess ergeben, und die Anforderungen an die Robustheit des Aufbaus sind in Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 dargestellt.

| Anforderung | Erfüllung |
|---|--|
| – Unempfindlichkeit gegenüber Kontaminationen | – Schutz des Drehtisches vor Verunreinigungen (beispielsweise infolge der Kapillarwirkung) durch Überdruck (Druckluft wird permanent an den Lagern ausgeblasen.) – Kapselung des Roboteraufbaus auf dem Drehtisch durch Kunststoffschutzhaube |
| – Schutz vor Überdrehen (Schutz vor dem Laserstrahl oder einer Beschädigung der Kabel) | – Winkelbegrenzung des Drehtisches durch Software- und mechanische Endschalter |
| – Hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zum exakten Abfahren der Schweißbahn; max. Vorschubgeschwindigkeit $v=10$ m/min – Dreh- und Stillstandsrehmoment groß genug für schnelles Verfahren und exaktes Halten der Position – Dreh- und Stillstandsrehmoment klein genug, um Beschädigung bei Kollisionen zu verhindern | – $U_{\max}=10$ U/min – Begrenzung des Dreh- und Stillstandsrehmoments auf 34 Nm |

Tabelle 5-3: Schweiß- und robustheitsspezifische Anforderungen an den Drehtisch (B-Achse) und ihre Erfüllung

| Anforderung | Erfüllung |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> – Unempfindlichkeit der A-Achse gegenüber Kontaminationen (Öl- und Wasserspritzer, die im Umformprozess entstehen) | <ul style="list-style-type: none"> – Integrierte beidseitige Dichtlippen am Drehkranz – Überschlägige Lebensdauerberechnung des Drehkranzes: 10^{10} h – Integrierte Kapselung des Motors (Schutzklasse IP 64) |
| <ul style="list-style-type: none"> – Schutz gegen Einklemmen von metallischen Abfallteilen am Drehkranz | <ul style="list-style-type: none"> – Zahnkranz des Drehkranzes läuft frei (außer am Motor) – Ableitblech am Ritzel |
| <ul style="list-style-type: none"> – Ausreichende Überschweifung des Startpunktes möglich ($\alpha > 360^\circ$) | <ul style="list-style-type: none"> – Drehwinkel 463° |
| <ul style="list-style-type: none"> – Schutz der Schleppkette vor Überdrehen und Abreißen | <ul style="list-style-type: none"> – Schutz durch Software-Endschalter (Eine Drehwinkelbegrenzung durch mechanische Endschalter ist nicht möglich, da der Drehwinkel $\alpha > 360^\circ$ betragen muss.) – Rollenüberwachung: Die Istposition jeder beweglichen Rolle (oben bzw. unten) wird durch Endschalter erfasst und bei Unterschieden zur Sollposition eine Notabschaltung ausgelöst. – Sperre bei fehlender Druckluft |
| <ul style="list-style-type: none"> – Hohes Drehmoment für exakte Einhaltung der vorgegebenen Drehgeschwindigkeit – Hohes Stillstands Drehmoment – Hohe Geschwindigkeiten und Beschleunigungen zum exakten Abfahren der Schweißbahn; max. Soll-Vorschubgeschwindigkeit $v=10$ m/min | <ul style="list-style-type: none"> – Dreh- und Stillstands Drehmoment am Zahnkranz: 550 Nm – Die maximale Umdrehungsgeschwindigkeit des Drehkranzes (ohne Geschwindigkeitsbeschränkung durch die Steuerung) beträgt 48 U/min. Dies resultiert in einer theoretischen maximalen Vorschubgeschwindigkeit $v_{\max}=31$ m/min bei kreisförmiger Schweißbahn. |

Tabelle 5-4: Schweiß- und robustheitsspezifische Anforderungen an den Drehkranz (A-Achse) und ihre Erfüllung

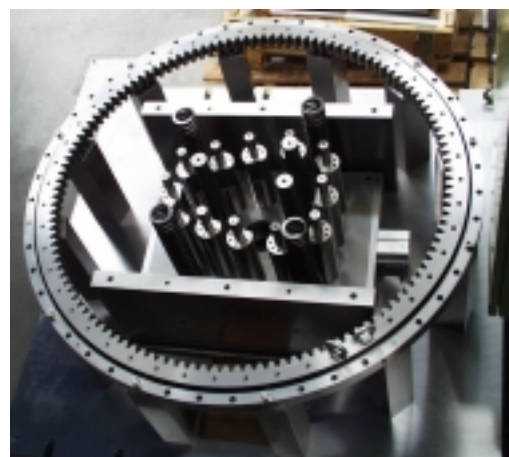
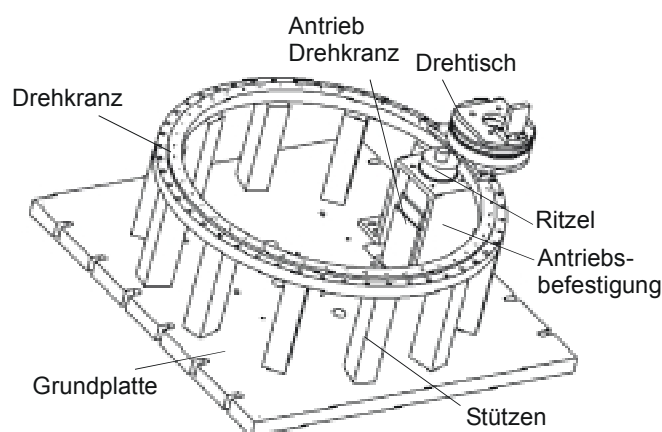


Bild 5-6: Drehkranz als CAD-Modell (links) und realer Aufbau (rechts, ohne Motoren)

Aufbau und Antrieb der Linearachsen (Z- und L-Achse)

Bild 5-7 stellt die Anordnung der Z- und der L-Achse mit ihren Antrieben dar. Es werden jeweils baugleiche Motoren und Führungen verwendet. Die Bewegung des Schlittens erfolgt über Linearführungen mit einem Kugelgewindetrieb, der extern mittels eines Drehstrom-Servomotors über Zahnräder und einen Zahnriemen angetrieben wird. An der L-Achse können optional eine Drahtzuführung für Schweißzusatzwerkstoff und eine koaxiale sowie eine Off-Axis-Schweißsensorik angebaut werden.

| Anforderung | Erfüllung |
|--|---|
| – Unempfindlichkeit gegenüber Kontaminationen | – Kapselung des Roboters durch Kunststoffschutzhaube |
| – Schutz vor Anfahren der Anschläge | – Wegbegrenzung der Linearachsen durch Software- und mechanische Endschalter |
| – Halten der Position bei Not-Aus und bei Abschaltung der Anlage | – In die Motoren integrierte mechanische Bremsen lösen bei Stromabschaltung aus. |
| – Schutz vor Durchdrehen der Zahnräder am Zahnriemen – Schutz der Zahnriemen vor Fremdkörpern | – Riemenspannvorrichtung zur genauen Justage der Anpresskräfte – Kraftübertragung durch Form- statt Kraftschluss mittels Passfedern – Abdeckung der Zahnräder mit Metalldeckeln |
| – Schnelles und genaues Verfahren zum exakten Abfahren der Schweißbahn – Drehmoment groß genug für schnelles Verfahren – Schutz vor Kollisionen bei Fehlprogrammierung | – Verfahrenweg 150 mm – Wiederholgenauigkeit und Umkehrspanne von $\pm 3 \mu\text{m}$ (Werksangaben) |

Tabelle 5-5: Schweiß- und robustheitsspezifische Anforderungen an die Linearachsen und ihre Erfüllung

Aufbau und Funktionsweise der Drahtzuführung

Die optionale Drahtzuführung für Schweißzusatzwerkstoff (Bild 5-8) besteht aus einer Drahtrolle mit gebremstem Lager, einer Drahtzuführung mit Motor und einer Düse für die Drahtzuführung. Alle Komponenten sind fest mit dem beweglichen Teil der L-Achse und damit mit der Fokussierlinse verbunden. Damit ist der Abstand zum Fokus des Laserstrahls stets konstant. Der Antrieb der Drahtzuführung erfolgt durch einen Gleichstrom-Servomotor mit einem nachgeschalteten Planetengetriebe über einen eigenen Regelkreis. Der Vorschub kann mit einer festen Geschwindigkeit oder proportional zur aktuellen Vorschubgeschwindigkeit des TCP erfolgen.

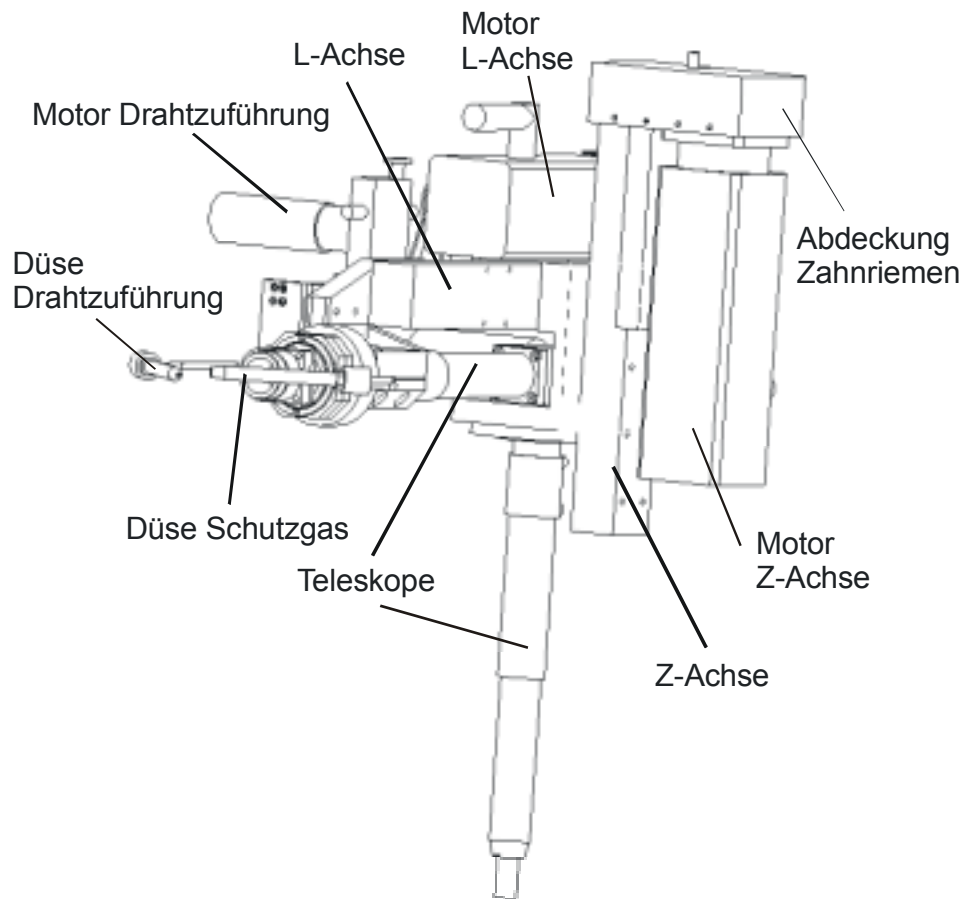


Bild 5-7: Aufbau des Bearbeitungskopfes mit Z- und L-Achse (CAD-Modell; Ansicht von vorne links ohne Spritz- und Strahlenschutz)

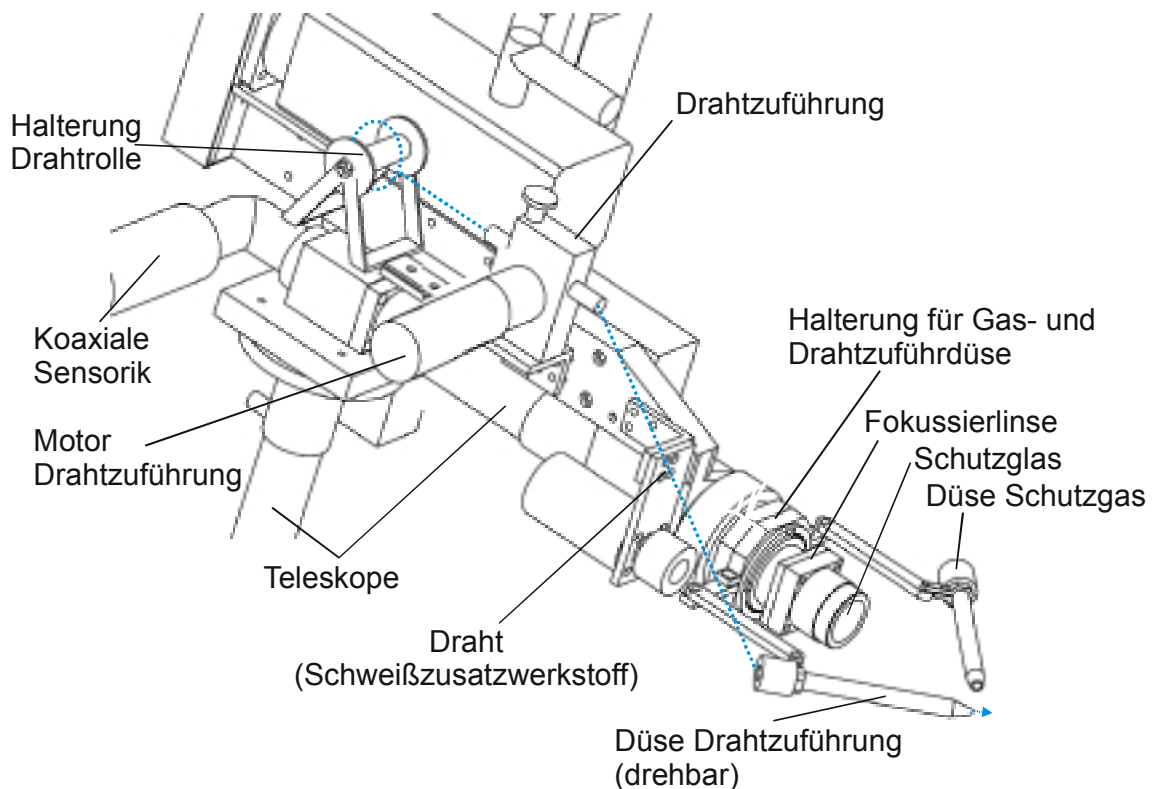


Bild 5-8: Bearbeitungskopf mit Drahtzuführung (CAD-Modell; Ansicht von vorne rechts ohne Spritz- und Strahlenschutz)

| Anforderung | Erfüllung |
|--|---|
| – Schutz vor Kontamination | – Ausreichender Abstand des Antriebs zum Bearbeitungskopf |
| – Regelung der Vorschubgeschwindigkeit | <ul style="list-style-type: none"> – Integrierter Regler im Motorkreislauf zum Einhalten der vorgegebenen Geschwindigkeit unabhängig vom Abrollwiderstand der Drahtrolle – Ansteuerung des Reglers durch die Robotersteuerung mit konstanter Geschwindigkeit oder proportional zur momentanen Vorschubgeschwindigkeit |

Tabelle 5-6: Schweiß- und robustheitsspezifische Anforderungen an die Drahtzuführung und ihre Erfüllung

Spritz- und Strahlschutz

Zum Schutz des IHU-Werkzeugs muss der Schweißprozess abgeschirmt werden, um Beschädigungen durch Streustrahlung oder Schweißspritzer zu verhindern. In einem geschlossenen Spritz- und Strahlschutz sammeln sich die Emissionen und das Werkzeug wird zuverlässig vor Schweißspritzern geschützt. Es besteht jedoch eine wesentlich größere Gefahr einer Verschmutzung des Schutzglases als bei einem offenen Aufbau, wie er bei Optiken an Knickarmrobotern häufig zu finden ist. Falls heiße Metallpartikel auf das Schutzglas treffen, brennen sie sich ein und verbleiben als Verschmutzung auf dem Glas. Die Laserstrahlung wird teilweise von diesen Verunreinigungen absorbiert und das Glas erhitzt sich, bis es schließlich infolge der Wärmeeinwirkung zerspringt. Es droht die Gefahr der Schädigung der jetzt ungeschützten Fokussierlinse. Um das Schutzglas der Optik gegenüber heißen Metallspritzern abzuschirmen, befindet sich einige Zentimeter vor dem Glas ein sogenannter Crossjet. Der Crossjet erzeugt im senkrechten Winkel zur Laserstrahlung vor dem Schutzglas auf seiner gesamten Breite einen beständigen Druckluftstrom. Durch den Crossjet erhalten die Spritzer einen Impuls, verändern dadurch ihre Flugbahn und treffen bei geeigneter Prozessführung nicht mehr auf das Schutzglas. Als Nebeneffekt dient der Crossjet zur Luftkühlung des Spritz- und Strahlschutzes. Zusätzlich wird vor der Optik eine Schutzhülse angebracht, aus der ebenfalls Druckluft parallel zum Laserstrahl ausströmt. Der Luftstrom darf nicht so stark sein, dass die Ausbildung der Schutzgaswolke um den Schweißpunkt herum gestört wird. Darüber hinaus wird eine Lochblende angebracht, um die Menge der in Richtung Linse fliegenden Partikel zu reduzieren.

Weiterhin dient der Spritz- und Strahlschutz zur Abschirmung der empfindlichen Optik während des Umformprozesses. Bei nicht optimierter Prozessführung kann das Bauteil beim Vor- oder Ausformen undicht werden, IHU-Medium unter hohem Druck zwischen den Niederhaltern austreten und auf optische Elemente treffen. Damit bestehen zusammenfassend folgende Anforderungen an den Spritz- und Strahlschutz:

- Abschirmung von Bearbeitungskopf, Werkstück und Schweißprozess vor der Umwelt und dem IHU-Prozess
- Abschirmung von Bearbeitungskopf, Werkstück und Umgebung vor dem Schweißprozess
- Erzeugung eines zum Laserstrahl coaxialen und/oder quergerichteten Luftstroms

- Integration einer Lochblende zum Schutz optischer Elemente vor Beschädigungen (zum Beispiel durch Verunreinigungen)
- Integrationsmöglichkeit einer Düse für Schutzgas
- Integrationsmöglichkeit einer Drahtzuführung für Schweißzusatzwerkstoff
- Integrationsmöglichkeit und Schutz einer Off-Axis-Prozesssensorik
- Toleranz gegenüber Verfahrensfehlern (Kollisionen)
- Teilweise oder vollständige Reinigung bzw. Verminderung der Verunreinigungen am Werkstück durch Medienzufuhr (zum Beispiel Druckluft)
- Keine Beeinträchtigung des Laserstrahlbearbeitungsprozesses

Da der Einbauraum sehr knapp bemessen ist und das dynamische Verhalten des Roboters nicht verschlechtert werden soll, muss der Schutz so klein und leicht wie möglich konzipiert werden. Die Konstruktion erfolgt mit einem 3D-CAD-Programm. In Bild 5-9 ist die Zusammenstellungszeichnung ohne Oberdeckel dargestellt.

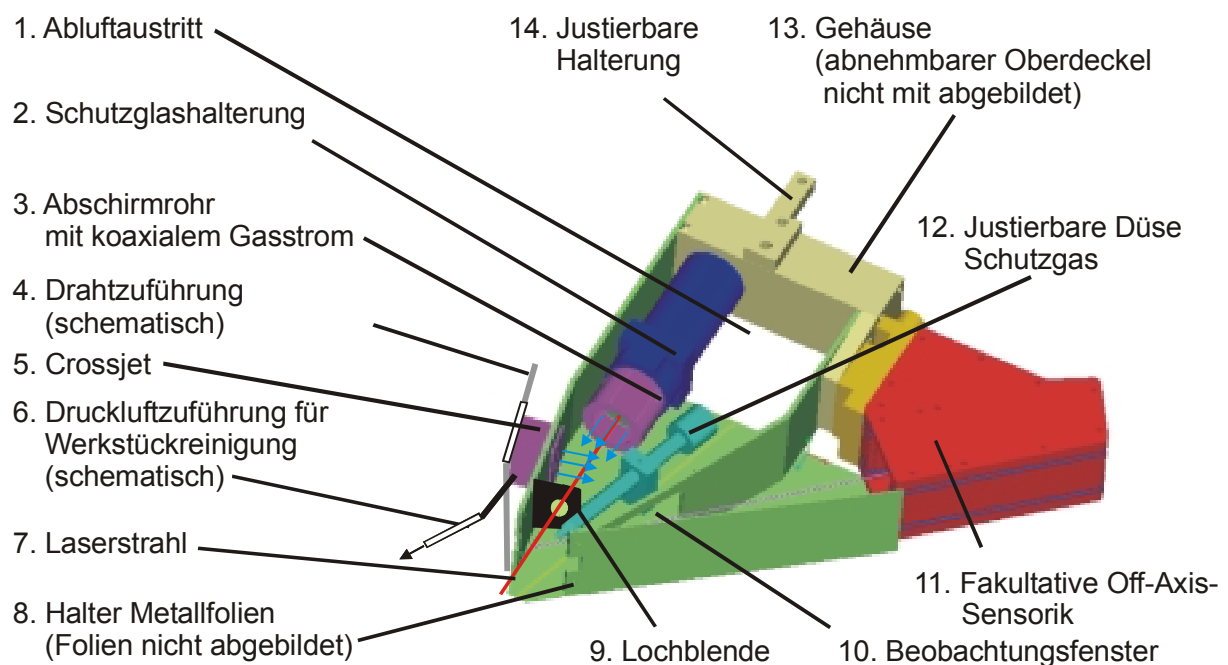


Bild 5-9: CAD-Modell des Spritz- und Strahlschutzes und Abluftführung

Modelluntersuchungen (siehe Abschnitt 6.2) zeigen, dass ein dünner Film aus IHU-Medium und Schmierstoff ein Verschweißen der Bauteilhälften ohne relevante Verschlechterung der Nahtqualität ermöglicht. Massive Rückstände jedoch in Form von dicken Tropfen am äußeren Rand des Flansches können infolge einer explosionsartigen, unvollständigen Verdampfung zu extrem starken Schweißspritzern (Schädigung der Optik) und zu Poren (Verschlechterung der Nahtqualität) führen. Um diese massiven Rückstände zu vermeiden, kann außen am Spritz- und Strahlschutz eine Druckluftdüse befestigt werden. Diese verteilt den Film gleichmäßig über den Bauteilflansch und verbessert somit den Schweißprozess.

Die Spitze des Strahlschutzes besteht als Verschleißteil aus einer elastischen dünnen Metallfolie und ist leicht austauschbar. Im Falle einer Kollision mit dem Umformwerkzeug wird einer Beschädigung des Strahlschutzes oder der Achsen vorgebeugt, indem eine elastische Verformung der Spitze zugelassen wird, bevor der starre Strahlschutz auf das

Umformwerkzeug oder das Blechpaar trifft. Der Luftstrom mit den Verschmutzungen wird seitlich an der Optik vorbei nach hinten aus dem Schutz geführt. Bei der weiteren Entwicklung der Anlage kann hier zusätzlich eine Absaugung integriert werden.

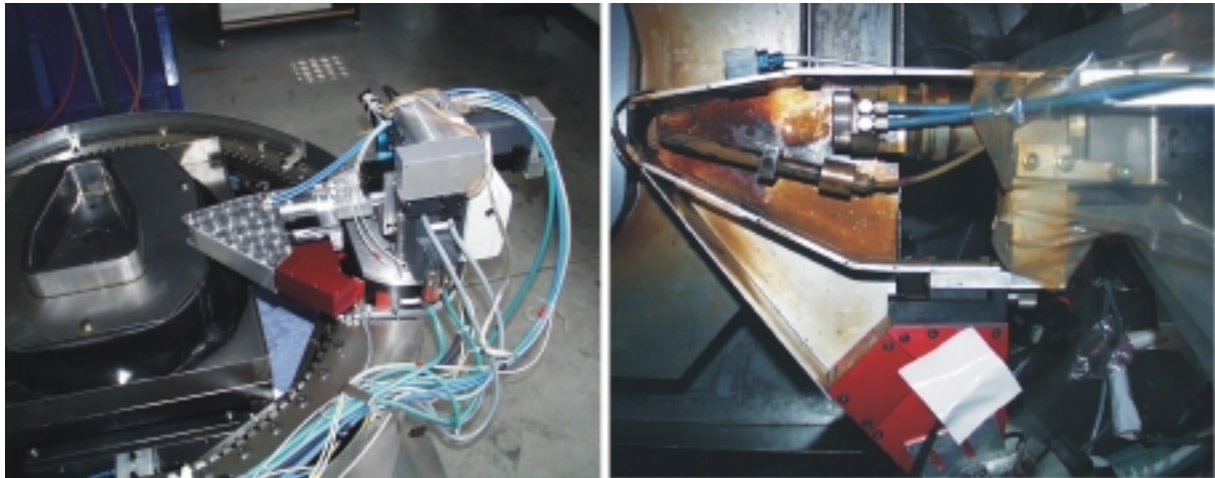


Bild 5-10: Links: Roboter mit Spritz- und Strahlenschutz (ohne Kunststoffhaube)
Rechts: Geöffneter Spritz- und Strahlenschutz nach circa 100 Schweißungen

Zusammenarbeit der Steuerungen

Zum Ansteuern der Antriebe wird eine Robotersteuerung Siemens 840D mit digitalem Umrichtersystem eingesetzt. Mit diesen Komponenten werden die Drehstrom-Servomotoren angesteuert. Durch eine Achstransformation kann der Roboter in lokalen Maschinen- oder auch in globalen kartesischen Koordinaten mittels Standard-NC-Code nach DIN 66025-1 [180] frei programmiert werden.

Der Drehtisch wird ebenfalls mit dem Umrichtersystem angesteuert. Hierzu dient eine Sensor- und Connectorbox für die Lagerückmeldung. Somit sind insgesamt vier Umrichtersystemmodule notwendig, um die Achsantriebsmotoren zu regeln. Für die Steuerung des Gleichstrom-Servomotors für die Drahtzuführung und für die Steuerung der Laserleistung werden Analogmodule zur Ausgabe eines Stellsignals 0-10 V benötigt, die über eine Schnittstelle mit dem digitalen Interpolationsregelkreis der CNC verbunden sind. Die Pressensteuerung fungiert als Leitrechner (vergleiche Bild 5-11). Kameras überwachen den Fertigungsprozess in der Presse. Die optionale Sensorik zur Schweißüberwachung verfügt über einen eigenen Rechner (ERLAS). Über digitale Ein- und Ausgänge findet die Kommunikation mit den Steuerungen von Presse und Laser sowie die Schaltung und Abfrage von Einzelsignalen wie Schutzgas, Druckluft oder Fahrtfreigabe statt.

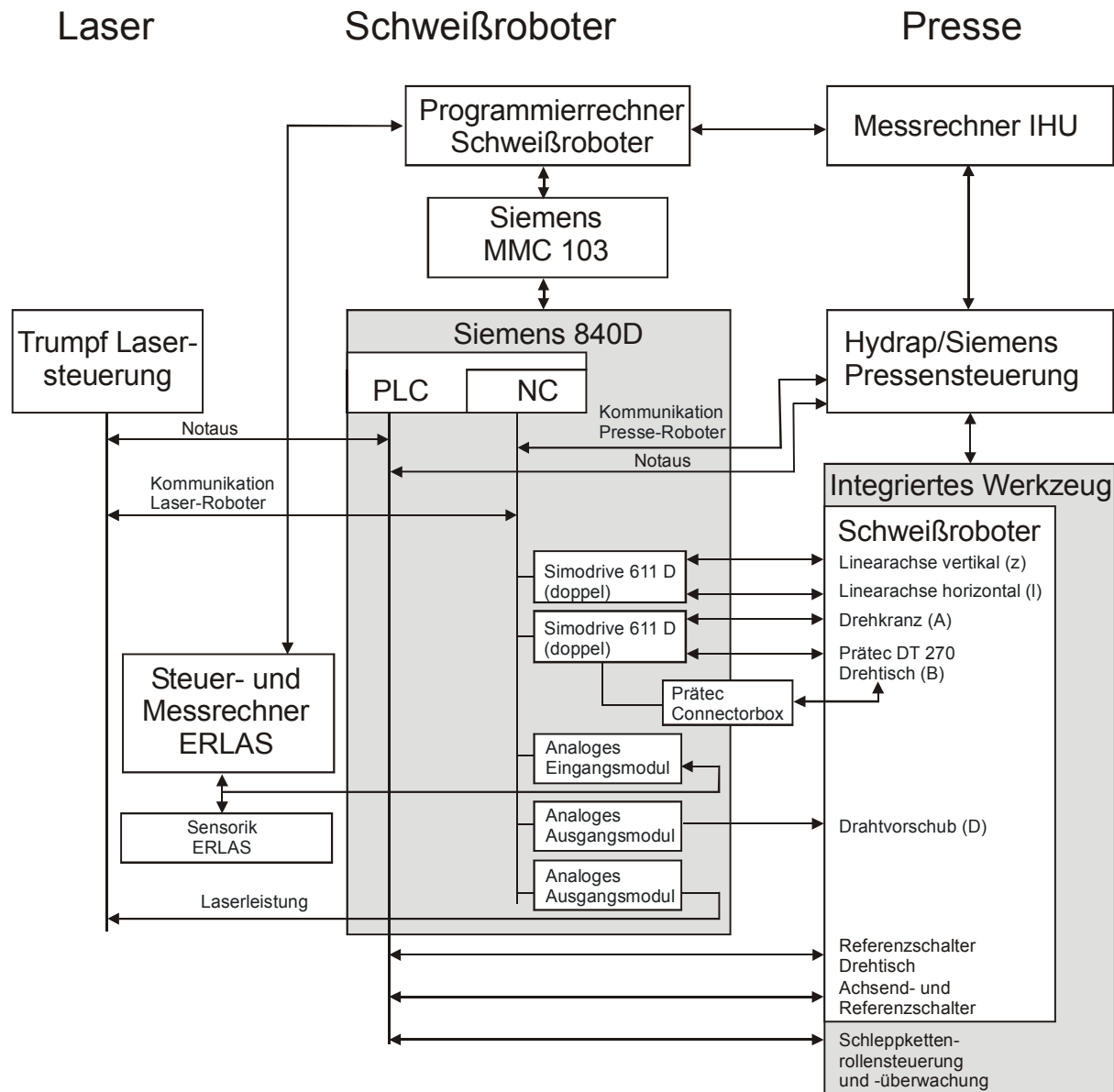


Bild 5-11: Schematische Darstellung der Vernetzung der Antriebe und Steuerungen

5.4 Laser, Bearbeitungsoptiken und Strahlparameter

Als Strahlquelle für alle Schweißversuche dient ein Festkörperlaser Trupf-Haas HL 4006 D mit einer Nennleistung $P_{LN}=4$ kW, der im Dauerstrichbetrieb ("continuous wave" - cw) eingesetzt wird. Über eine menügesteuerte Benutzeroberfläche und über eine Programmierschnittstelle bestehen vielfältige Möglichkeiten zur Variation der Leistungsdaten. Als Schutzgas wird Argon mit einem Durchfluss von circa 400 l/h eingesetzt.

In Modelluntersuchungen werden Schweißungen mit einem sechssachsigen Knickarmroboter der Firma Kuka IR 365/30.0 mit einer Robotersteuerung Kuka RC 30/51 durchgeführt, der mit einer Schweißoptik der Brennweite $f=200$ mm ausgestattet ist. Eine 20 m lange Multimoden-Lichtleitfaser (Durchmesser 0,60 mm) mit wassergekühlten Faserenden verbindet Laser und Bearbeitungskopf.

Um den sehr beengten Einbauraum in der Presse optimal zu nutzen, wird für den integrierten Fügeroboter eine kleinere Optik mit geringerem Durchmesser und einer kleineren Brennweite

$f=140$ mm verwendet. Zur Strahlführung dient eine 30 m lange Glasfaser (Durchmesser 0,60 mm), die den Laser mit einer Faser-Faser-Kopplung verbindet. Von der Kopplung wird der Laserstrahl über eine zweite Glasfaser (Länge 10 m; Durchmesser 0,63 mm) durch die Schleppkette dem Bearbeitungskopf zugeführt. Diese zweite Faser lässt sich über einen justagefreien "plug-and-play"-Anschluss der Firma Trumpf-Haas mit der Kopplung verbinden. Bei Einsatz einer einzigen Glasfaser müsste diese bei jedem Ein- und Ausbau des Umformwerkzeugs aus der Schleppkette entnommen werden. Tabelle 5-7 gibt die Werksangaben der beiden Optiken wieder. Bei Optik 1 ist der berechnete Fokaldurchmesser infolge des Abbildungsfaktors von 1:1 genauso groß wie der Durchmesser der Glasfaser (0,60 mm). Optik 2 erzeugt durch den Abbildungsfaktor von 1,4:1 und den Glasfaserdurchmesser von 0,63 mm einen größeren Fokus [181].

| | | Optik 1 (Knickarmroboter) | Optik 2 (Integrierter Schweißroboter) |
|---|----------|------------------------------|--|
| Außendurchmesser | | 70 mm | 35 mm |
| Länge und Durchmesser der Glasfaser(n) | | 20 m; 0,6 mm | 30 m; 0,60 mm + 10 m; 0,63 mm |
| Abbildungsfaktor | | 1:1 | 1,4:1 |
| Linsendurchmesser und -form | d_L | 52 mm monochromatisch | 27 mm plankonvex |
| Soll-Fokaldurchmesser | d_{0N} | 0,60 mm | 0,88 mm |
| Brennweite | f | 200 mm | 140 mm |

Tabelle 5-7: Technische Daten der verwendeten Optiken (Werksangaben [181])

Die Ermittlung der realen Fokaldurchmesser nach DIN EN ISO 11146 [182] erfolgt für beide Optiken mit Hilfe eines Laserstrahldiagnostiksystems Prometec Laserscope UFF 100, das eine Messgenauigkeit von $\pm 0,01$ mm bzw. Grad aufweist [183]. Die Strahlleistung an der Bearbeitungsoptik wird mit dem Laserleistungsmessgerät Coherent Labmaster LM5K gemessen. Bei einer gemessenen Leistung von 3-4 kW beträgt die Messgenauigkeit 5 % [184]. Die Strahlparameter sind in Tabelle 5-8 dargestellt und in Bild 5-12 symbolisch (nicht maßstäblich) veranschaulicht.

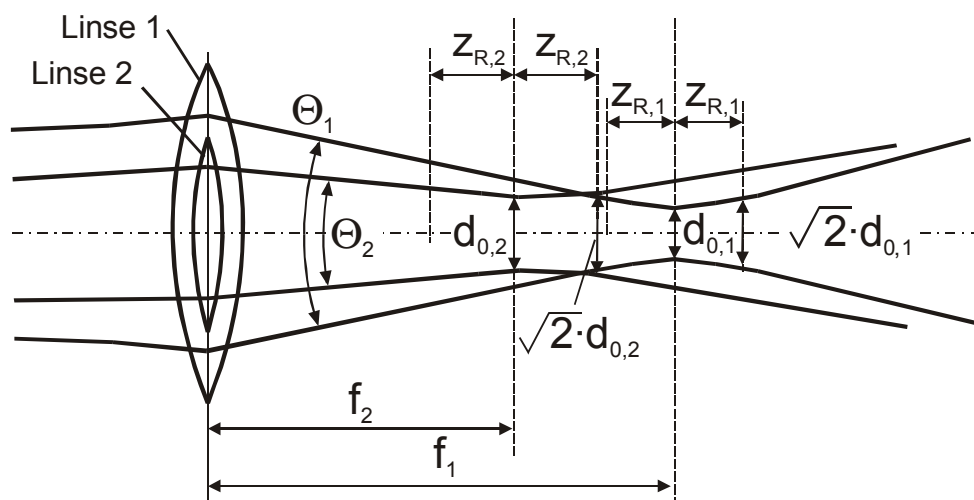


Bild 5-12: Symbolische Darstellung der Strahlparameter des Knickarmroboters (Index 1) und des integrierten Schweißroboters (Index 2). Vergleiche Tabelle 5-8 und Bild 3-4

| | | Optik 1 | Optik 2 |
|---|-----------|-------------------------|------------------------|
| Rayleighlänge* | z_R | 4,8 mm | 6,7 mm |
| Fokusbereich* | d_o | 0,65 mm | 0,86 mm |
| Divergenzwinkel* | θ | 7,7° | 7,4° |
| Laserleistung bei $P_{LN}=4$ kW** | P_L | 3,9 kW | 3,2 kW |
| Verlust** | | 2,5 % | 20 % |
| Bestrahlungsfläche im Fokus bei senkrechter Bestrahlung** | A_0 | 0,33 mm ² | 0,58 mm ² |
| Leistungsdichte im Fokus** | I_0 | 11,8 kW/mm ² | 5,3 kW/mm ² |
| Leistungsdichte im Fokus bei einem Anstellwinkel $\alpha_A=30^\circ$ ** | $I_{0,A}$ | 10,2 kW/mm ² | 4,6 kW/mm ² |
| Leistungsdichte bei Fokusabstand z_R und senkrechter Bestrahlung** | $I_{R,0}$ | 5,9 kW/mm ² | 2,7 kW/mm ² |
| Leistungsdichte bei Fokusabstand z_R und Anstellwinkel $\alpha_A=30^\circ$ ** | $I_{R,A}$ | 5,1 kW/mm ² | 2,3 kW/mm ² |

Tabelle 5-8: Ermittelte Strahlparameter der beiden Optiken

(* Ungenauigkeit $\pm 0,01$ mm bzw. Grad; ** Ungenauigkeit 5 %)

Der gemessene Fokusbereich ist bei Optik 1 geringfügig größer und bei Optik 2 etwas kleiner als der berechnete Wert. Die gemessene Leistung bei Optik 1 entspricht - im Rahmen der Messgenauigkeit - den Werksangaben. Bei Bearbeitungsoptik 2 treten Verluste von circa 20 % durch die aufwendigere Strahlführung auf. Die Faser-Faser-Kopplung führt nach Herstellerangaben zu einem Leistungsverlust von bis zu 10 %. Weitere Verluste treten durch die zweite Glasfaser sowie durch die Strahlführung und -formung im Schweißroboter mittels zweier Umlenkspiegel und der Linsen auf. Damit verfügt Optik 2 über eine schlechtere Strahlqualität (größerer Fokusbereich) bei geringerer Laserleistung.

5.5 Werkstoffe, IHU-Medien und Schmierstoffe

Für die Modelluntersuchungen wird der Schmierstoff Oemeta IHV-36 eingesetzt, der sich nach Hein [4] bei Untersuchungen verschiedener Schmierstoffe für IHU-Prozesse als optimal erwies. Es handelt sich um einen nicht wassermischbaren esterölbasischen Hochleistungs-Umformschmierstoff für Mehrstufenpressen und IHU, dessen chemische Struktur eine hohe Affinität zu metallischen Oberflächen aufweist. Er kann damit auch für sehr schwer umformbare Werkstoffe eingesetzt werden. Die kinematische Viskosität bei 20 °C nach DIN 53018-1 [185] liegt bei 406 ± 30 mm²/s [186]. Für die Untersuchungen in der integrierten Prozesskette kommt der weiterentwickelte Schmierstoff Oemeta VP 411, ein hochviskoser Syntheseester, zum Einsatz, der noch bessere Umformergebnisse liefert. Die Viskosität ist mit 314 ± 30 mm²/s bei 20 °C nach DIN 53018-1 [185] etwas geringer als die des IHV-36. Eine Verbesserung der Schweißigenschaften ergibt sich durch Austausch des Schmierstoffs mit dem Zieh- und Stanzöl Zeller+Gmelin KTL N16. Es handelt sich um einen mineralöhlhaltigen, nicht wassermischbaren Schmierstoff, der mit synthetischen Fettungsmitteln, phosphor- und schwefelhaltigen Additiven sowie Korrosionsinhibitoren legiert ist. Die Viskosität liegt mit 160 mm²/s bei 40 °C nach DIN 51562-1 [187] wesentlich niedriger als die Viskosität des Oemeta VP 411 [188].

Das IHU-Medium besteht für alle Versuche aus einer Lösung aus Wasser (Volumenanteil 95 %) und der Hydraulikflüssigkeit Oemeta HF-AS (Volumenanteil 5 %). Die Hydraulikflüssigkeit ist mineralölfrei, wasserlöslich, biostabil und enthält polare Wirkstoffe sowie grenzflächenaktive Stoffe. Schmierstoff und Hydraulikflüssigkeit sind miteinander verträglich [189].

Als Werkstoff kommt in der gesamten Arbeit der kaltgewalzte Tiefziehstahl DC04 nach DIN EN 10130 [190] mit einer SBT-Oberflächentextur ($R_a=1,23 \mu\text{m}$) zum Einsatz. Er besitzt eine Härte von 100-120 HV und eine Zugfestigkeit R_m von 270 bis 350 N/mm² [4], [190], [191]. Für Untersuchungen zur Umformbarkeit der Naht wird der gleiche Werkstoff in Blechdicken von 0,88 mm und 1 mm verwendet.

6 Experimentelle Untersuchungen

6.1 Einleitung und Überblick

Die durchgeführten Untersuchungen gliedern sich in drei Abschnitte. Vor der Konstruktion des integrierten Fügeroboters wird im Rahmen von Modelluntersuchungen anhand eines vorhandenen Knickarmroboters mit einer Schweißoptik (Optik 1) ein grundlegendes Prozessverständnis erarbeitet. Zielsetzung dieser Untersuchungen ist die Gewinnung von Daten für die Realisierung und gezielte Optimierung des Fügeprozesses unter Berücksichtigung der Randbedingungen des Innenhochdruck-Umformens. Dazu dient die Bestimmung der optimalen Prozessparameter sowie die Ermittlung der Auswirkungen von Umform- und Fügeprozess aufeinander. Mit den gewonnenen Ergebnissen kann der Fügeprozess so ausgelegt werden, dass er hinsichtlich der Anforderungen in der integrierten Prozesskette zu einem möglichst robusten Prozess und einer hohen Bauteilqualität beiträgt. Die gewonnene Datenbasis dient als Anforderungsliste für die Konstruktion des integrierten Schweißroboters (vergleiche Abschnitt 5.3).

Nach Konstruktion und Inbetriebnahme des in Abschnitt 5.3 beschriebenen integrierten Fügeroboters mit Optik 2 werden mit diesem zunächst Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, um die Übertragbarkeit der in den Modelluntersuchungen ermittelten Daten zu prüfen. In diesen Grundlagenuntersuchungen können alle Eingangsparameter wie Anstellwinkel oder Kontamination frei variiert werden. Dagegen liegen bei Durchlaufen der gesamten Prozesskette erhebliche Restriktionen bei der Parameterwahl vor, da sich viele Größen als Folge von Einzelprozessen ergeben. So kann beispielsweise die Kontamination beim Fügen nicht mehr gezielt eingestellt werden, sondern ergibt sich aus den Umform- und Trennprozessen. Die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen werden in einem vorläufigen Prozessfenster zusammengefasst. Aus Gründen der besseren Darstellbarkeit werden die Modelluntersuchungen mit dem Knickarmroboter und die Grundlagenuntersuchungen des integrierten Fügeprozesses gemeinsam dargestellt und diskutiert, obwohl sie chronologisch durch Konstruktion, Bau und Inbetriebnahme des Fügeroboters getrennt sind.

Im dritten Teil der Untersuchungen erfolgt die Optimierung des integrierten Fügeprozesses in der nun vollständig durchlaufenen Prozesskette. Die Optimierung wird im Hinblick auf Taktzeit, Einschweißtiefe, Nahtfestigkeit, Dichtheit und Umformbarkeit der Naht durchgeführt. Mit diesen Daten wird das vorläufige Prozessfenster ergänzt. Die Systematik ist in Bild 6-1 zusammenfassend dargestellt.

Bei den dargestellten Diagrammen wird die zentrale Aussage häufig in einem erläuternden kurzen Text zusammengefasst. Dies erleichtert ein indikatorisches Bildverständnis (siehe Abschnitt 3.4.4.3).

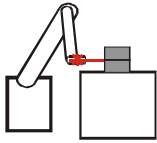
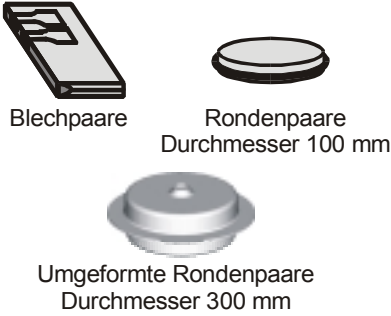
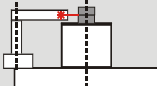
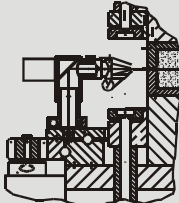
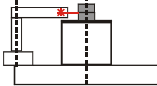

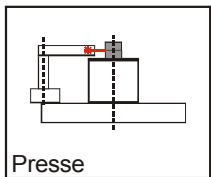
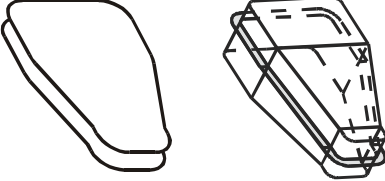
| Phasen und Ziele | Strahlführung und -formung | Führungssystem | Probengeometrie (Werkstoff: DC04) |
|---|---|---|--|
| 1. Modelluntersuchungen <ul style="list-style-type: none"> – Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses – Bestimmung der Auswirkungen der Ein- auf die Ausgangsgrößen – Ermittlung der Anforderungen an den integrierten Fügeboter | Optik 1 $P_L=3,9 \text{ kW}$ $d_0=0,65 \text{ mm}$ |  Knickarmroboter |  Blechpaare Rondenpaare Durchmesser 100 mm Umgeformte Rondenpaare Durchmesser 300 mm |
| 2. Konstruktion und Bau des integrierten Werkzeugs <ul style="list-style-type: none"> – Berücksichtigung der optimierten Prozessführungsparameter aus den Modelluntersuchungen | Optik 2 $P_L=3,2 \text{ kW}$ $d_0=0,86 \text{ mm}$ |  Integrierter Fügeboter |  |
| 3. Grundlagenuntersuchungen des integrierten Fügeprozesses <ul style="list-style-type: none"> – Übertragbarkeit der Modelluntersuchungen | Optik 2 $P_L=3,2 \text{ kW}$ $d_0=0,86 \text{ mm}$ |  Integrierter Fügeboter |  Blechpaare |
| 4. Optimierung des integrierten Fügeprozesses <ul style="list-style-type: none"> – Gleichbleibende Nahtqualität – Dichtheit – Umformbarkeit der Naht | Optik 2 $P_L=3,2 \text{ kW}$ $d_0=0,86 \text{ mm}$ |  Presse Integrierter Fügeboter |  Blechpaare Realbauteile |

Bild 6-1: Überblick über die durchgeführten Untersuchungen

Untersuchte Ein- und Ausgangsgrößen

Für jeden Schweißprozess existiert ein Prozessfenster, das bei gegebener Blechdicke im Allgemeinen durch die Parameter Vorschubgeschwindigkeit und Laserleistung bestimmt wird. Bei geeigneter Prozessführung tritt der gewünschte Tiefschweißeffekt auf (vergleiche Abschnitt 3.3.1). Weitere signifikante Eingangsgrößen wie Fokusslage, Nahtversatz, Nahtform, Verunreinigungen sowie Art und Menge des eingesetzten Schutzgases beeinflussen das Prozessfenster (vergleiche Hügel [110]). Wie bereits bei der mathematischen Modellierung dargestellt, kann bei komplexen Bahnen ein Schweißprozess, bei dem der Laserstrahl immer annähernd senkrecht auf die Oberfläche trifft, nur für sehr langsame Geschwindigkeiten realisiert werden. Deshalb sollen auch die Effekte eines Anstellwinkels ermittelt werden. Da eine zweifache Verschweißung im Bereich der Nahtüberlappung auftritt, werden auch Proben gefertigt, die nach dem Fügen nochmals überschweißt werden.

Die Nahtfestigkeit wird durch die Ausgangsgrößen statische maximale Zugkraft und Dauerfestigkeit beschrieben, die in Zugversuchen und Dauerschwingversuchen analysiert werden können. Die Zugkraft entspricht der Belastung der Naht auf Innendruck beim Umformprozess. Eine weitere Ausgangsgröße stellt die Einschweißtiefe dar, die in Schlifflen bestimmt wird. Aufgrund der Kontamination mit IHU-Medium und Schmierstoff ist von Nahtfehlern auszugehen, die bereits im äußeren Erscheinungsbild der Naht auffällig sind und in optischen und rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen analysiert werden. Weiterhin ist mit einem erhöhten Porenvolumen zu rechnen, das in Röntgengrobstrukturuntersuchungen ermittelt wird. Da die Naht in der integrierten Prozesskette beim Ausformen teilweise eingezogen werden soll, ist ihre Umformbarkeit von Interesse. Diese lässt sich in Modelluntersuchungen in einem Napfziehversuch analysieren. Mit der Umformbarkeit der Naht verbunden ist ihre Aufhärtung infolge thermischer Belastung, die in Härtemessungen untersucht wird. Weiterhin wird in Modelluntersuchungen die Belastbarkeit der Naht auf Innendruck bei einer umlaufend dichten Naht ermittelt. Bei den Schweißversuchen ist auf ein gehäuftes Auftreten von Metallspritzern zu achten. Diese sind zu vermeiden, da sie zu einer Schädigung des Umformwerkzeugs führen können. Die zu untersuchenden Ein- und Ausgangsparameter sind in Bild 6-2 dargestellt. Ihre Korrelation in den durchgeführten Untersuchungen gibt Tabelle 6-1 wieder.

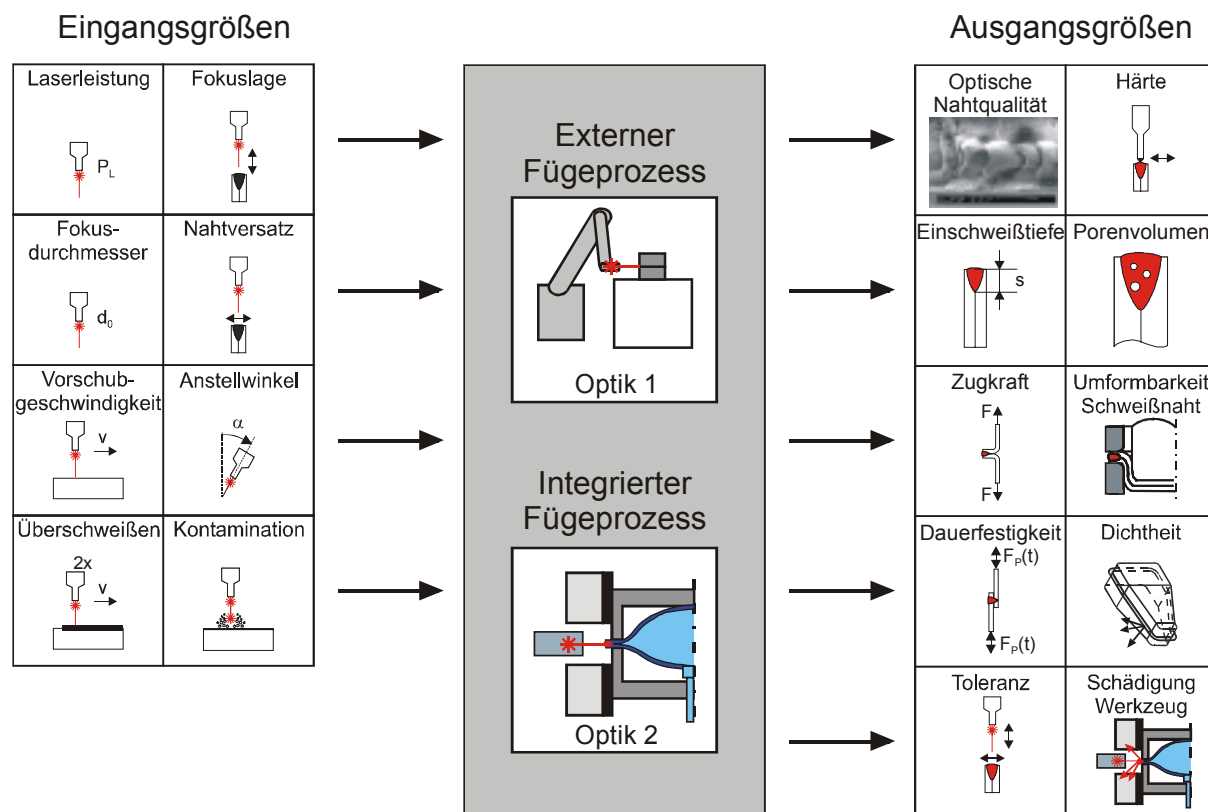


Bild 6-2: Überblick über die untersuchten Ein- und Ausgangsgrößen

| Ausgangsgrößen | Symbol | Optische Nahtqualität | Einschweißtiefe | Max. Zugkraft | Dauerfestigkeit | Zulässige Toleranz | Härteverlauf | Porenvolumen | Umformbarkeit der Schweißnaht | Dichtheit | Schädigung Umformwerkzeug |
|---------------------------------|------------|----------------------------|-----------------|---------------|---------------------|---------------------|--------------|--------------|-------------------------------|--------------|-----------------------------|
| Eingangsgroßen | Symbol | | s | F_{max} | | | | P | | | |
| Laserleistung (Fokusbildmesser) | P_L | X | | | | | | | X | | X |
| Vorschubgeschwindigkeit | v | | X | X | | | | X | | | X |
| Überschweißen (Nahtüberlappung) | | X | X | X | | | | X | | X | X |
| Fokusslage | F | | X | X | | X | | | | | X |
| Nahtversatz | N | | X | X | | X | | | | | X |
| Anstellwinkel | α_A | | X | X | X* | | X | X | | | X |
| Kontamination | K | | X | X | X* | | X | X | X | X | X |
| Angewandte Versuche | | Optische Begutachtung, REM | Schliff | Zugversuch | Dauerschwingversuch | Schliff+ Zugversuch | Härtemessung | Röntgen | Napfziehversuch | Berstversuch | Prüfung auf Schweißspritzer |

Tabelle 6-1: Untersuchte Ein- und Ausgangsgrößen sowie angewandte Versuche bei den Modell- und Grundlagenuntersuchungen (* nur Modelluntersuchungen; siehe Abschnitt 6.2.1)

6.2 Modell- und Grundlagenuntersuchungen

Der Laserstrahl-Schweißprozess wird bei gegebener Blechdicke im Wesentlichen durch die Parameter Laserleistung und Vorschubgeschwindigkeit bestimmt. Maximale Laserleistung und das Aufschmelzen des Werkstoffs stellen Grenzen des in Bild 6-3 dargestellten allgemeinen schematischen Prozessfensters dar. Übersteigt die Streckenenergie einen bestimmten Wert, so findet zunächst ein Wärmeleitungsschweißen und bei höherer Energie ein Tiefschweißen statt. Die Führungsmaschine sollte so ausgelegt sein, dass möglichst hohe Verfahrgeschwindigkeiten bei möglichst großen Bahngenauigkeiten erreicht werden können. Die Verfahrgeschwindigkeit soll insbesondere größer sein als die maximale Geschwindigkeit, bei der ein Tiefschweißprozess realisierbar ist, damit das Prozessfenster für diesen Tiefschweißprozess eingegrenzt werden kann.

Mit den nachfolgend beschriebenen Versuchen soll dieses allgemeine Prozessfenster für den integrierten Füge-roboter weiterentwickelt und detailliert werden. Dazu müssen sowohl konkrete Werte für das Prozessfenster ermittelt als auch zusätzliche Restriktionen durch die Integration in das IHU-Werkzeug berücksichtigt werden.

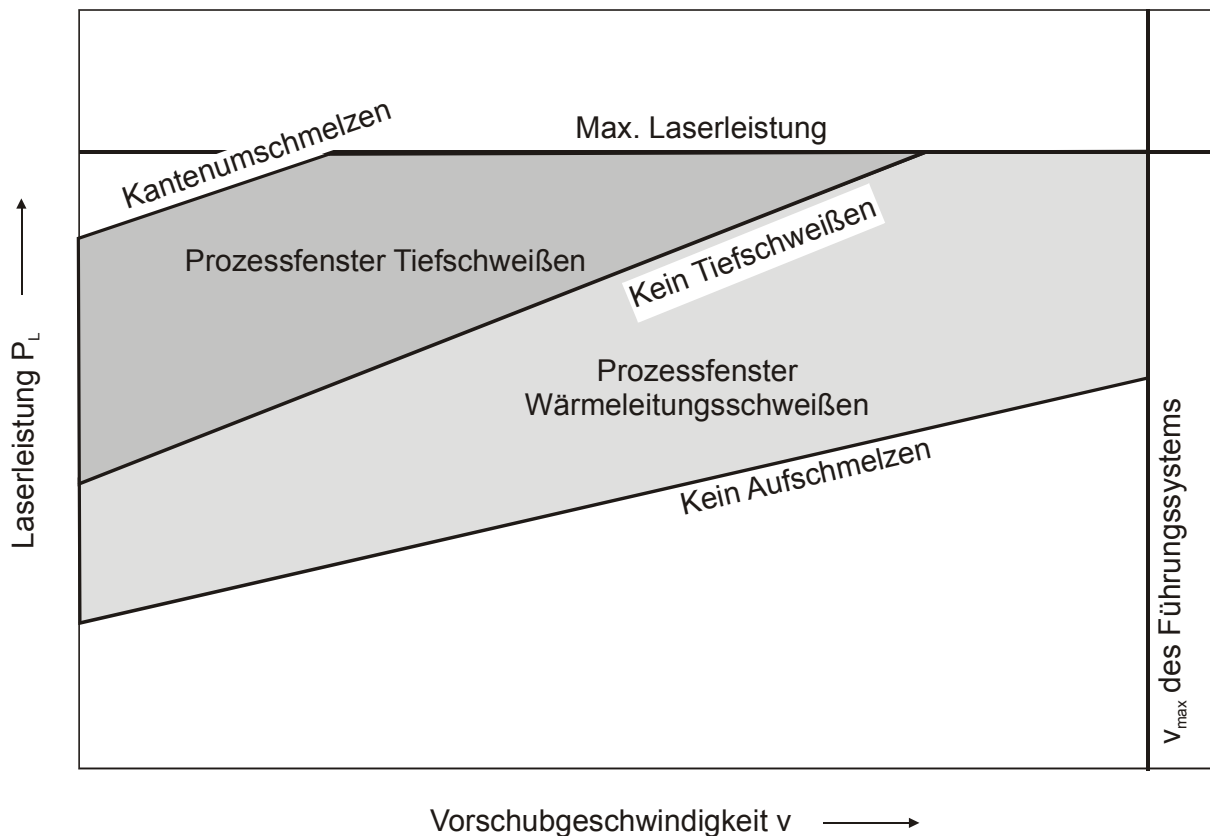


Bild 6-3: Allgemeines schematisches Prozessfenster für das Laserstrahlschweißen

Proben der Modelluntersuchungen

Für die Modelluntersuchungen resultiert aus den dargestellten systemtechnischen Überlegungen die Wahl der Nahtform "Stirnflachnaht". Vorversuche zeigen, dass sich Proben mit einer Stirnflachnaht zwar in Zugversuchen untersuchen lassen, sich aber bei dynamischen Festigkeitsuntersuchungen elastisch aufbiegen. Damit wirkt nur ein kleiner Teil der aufgebrachtten Kräfte auf die Naht. Deshalb werden für Dauerschwingversuche Proben mit einer I-Naht hergestellt.

Die rechteckigen Schweißproben werden mit der maximalen Laserleistung geschweißt. Da die Blechoberfläche nach dem IHU-Prozess mit IHU-Medium und Schmierstoff benetzt ist, wird eine Mischung dieser Verunreinigungen für kontaminierte Proben mit einem Pinsel vor dem Fügen zwischen den Blechen und im Fügespalt aufgetragen und flächig verteilt, so dass keine größeren zusammenhängenden Tropfen auftreten (vergleiche Abschnitt 5.5). Zur Simulation des Bereichs der Nahtüberlappung werden einige Proben zweifach verschweißt.

Neben den in Bild 6-4 dargestellten rechteckigen Blechpaaren werden zusätzlich umgeformte Rondenpaare aus DC04 mit 300 mm Durchmesser und einer Blechdicke von 1,5 mm für Berstversuche (Abschnitt 6.3.2) sowie Rondenpaare aus DC04 mit 100 mm Durchmesser und einer Blechdicke von 0,88 mm und 1 mm zur Untersuchung des Umformverhaltens der Naht (Abschnitt 6.3.5) verschweißt.

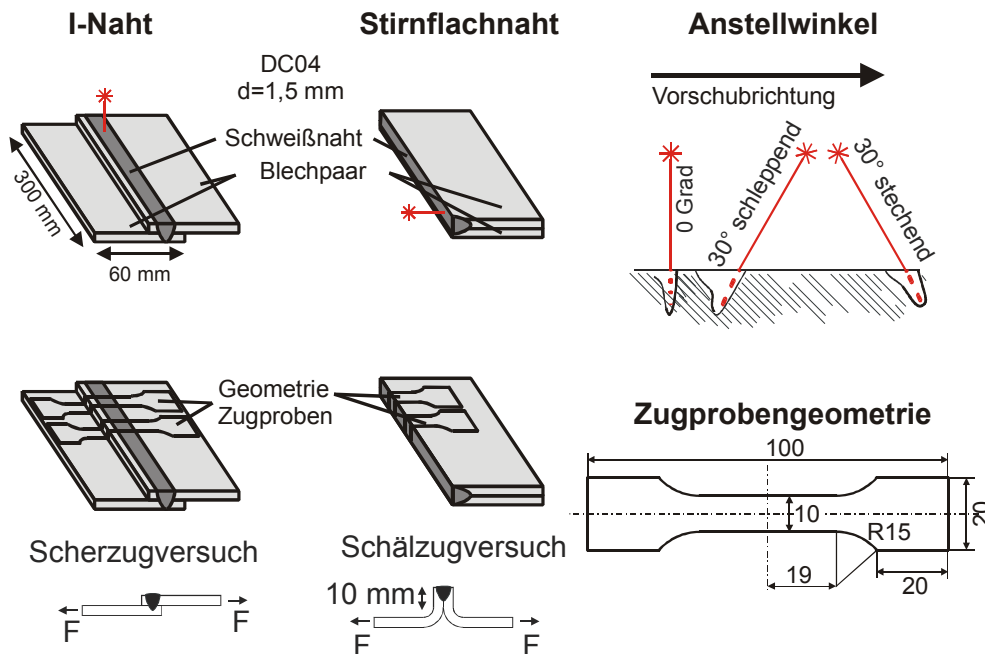


Bild 6-4: Geometrie der Probeschweißungen, Anstellwinkel und Zugprobengeometrie

Allgemeine Beobachtungen und Festlegung der Vorschubgrenzwerte

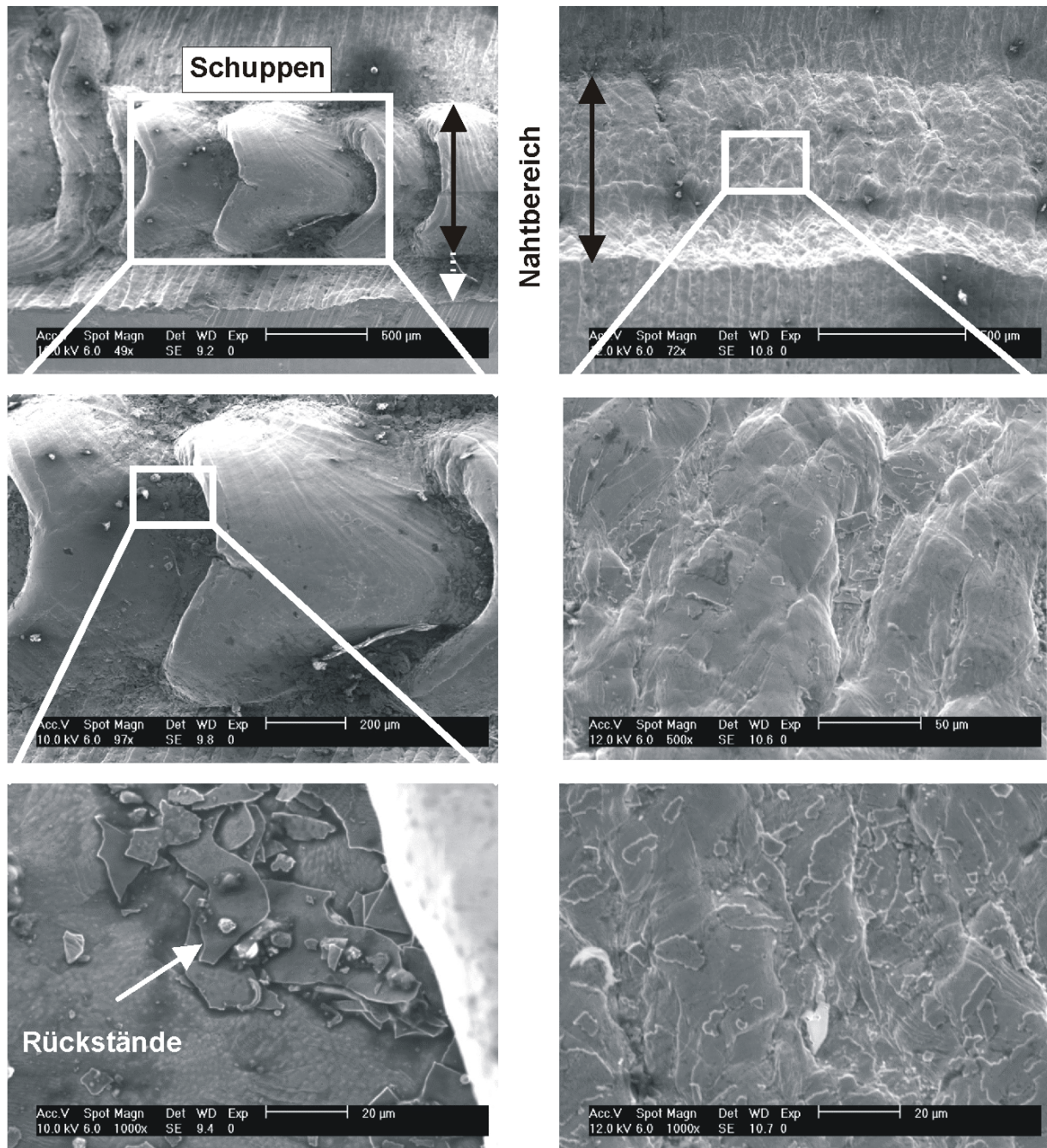
Bei Vorschubgeschwindigkeiten unter 2-2,5 m/min tritt bei beiden Optiken eine starke Bildung von Metallspritzern auf, so dass ein Wert von 2 m/min als Minimum für die Geschwindigkeit festgelegt werden kann. Schweißungen bei Optik 2 führen bei Geschwindigkeiten über 5 m/min zu einer äußerst geringen Einschweißtiefe, während bei Optik 1 auch bei 6 m/min noch gute Nahtergebnisse zu erzielen sind. Als Obergrenze für die Vorschubgeschwindigkeit wird deshalb ein Wert von 5 m/min festgelegt. Bei kontaminierten Proben tritt eine starke Rauch- und Dampfbildung auf, die auf das Verdampfen von IHU-Medium und Schmierstoff zurückzuführen ist. Der Schweißprozess verläuft deutlich unruhiger und Metallspritzer treten häufiger auf.

Einfluss der Laserleistung auf die Nahtqualität

Die Erzielung einer guten Nahtqualität kontaminierter Proben erfordert ein weitgehend rückstandsfreies Verdampfen von IHU-Medium und Schmierstoff im Schweißprozess. Bei den durchgeführten Versuchen zeigt sich, dass bei Laserleistungen über 2.000 W in optischen und mikroskopischen Begutachtungen nur geringe Rückstände beobachtet werden.

Deutliche Rückstände zeigen sich beim Schweißen von Rondenpaaren für Napfziehversuche (siehe Abschnitt 6.3.5). Aufgrund der geringen Blechdicken von 1 mm und weniger kann nur mit niedrigen Laserleistungen von 800-1.400 W gearbeitet werden, um ein Umschmelzen der Außenkanten zu verhindern. Bei der Laserleistung von 800 W zeigen sich Blasen, Schuppen und Ölrückstände an der Oberfläche der Naht, die mit bloßem Auge zu erkennen sind. In Bild 6-5 sind verschiedene rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer kontaminierten und einer unkontaminierten Naht zu sehen. Die Energie des Lasers reicht bei 800 Watt nicht aus, um die Rückstände vollständig zu verdampfen sowie diese gasförmigen Rückstände aus der Schmelze auszutreiben. Die Restkontamination führt zu Einschlüssen, Rückständen an der Oberfläche und zu einer ungenügenden Schweißnaht. Es lässt sich folgern, dass beim

Schweißen im integrierten Fügeprozess eine möglichst hohe Laserleistung anzustreben ist, um zu verhindern, dass sich Rückstände der Kontaminationen in der Naht einlagern. Das Schweißen mit geringerer Laserleistung kann nur an Nahtanfang und -ende sinnvoll sein. Deshalb muss die Laserleistung für die Modell- und Grundlagenuntersuchungen nicht als Eingangsgröße variiert werden, sondern es kann immer die maximal mögliche Leistung eingesetzt werden.

**Optik 1**

$P_L=800 \text{ W}$ $v=3 \text{ m/min}$

$d_0=0,65 \text{ mm}$

Bild 6-5: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen einer Stirnflachnaht eines Rondenpaares aus DC04 mit Blechdicke 0,88 mm
Links: mit Kontamination
Rechts: ohne Kontamination

6.2.1 Korrelation von Einschweißtiefe, Zugkraft und Porenbildung

Eine grundsätzliche Charakterisierung der Schweißnahtqualität kann durch die Ausgangsgrößen Einschweißtiefe, Zugkraft und Porenvolumen erfolgen. Aus diesem Grunde wird die Korrelation der Eingangsgrößen mit diesen Ausgangsgrößen in diesem Abschnitt vorgestellt und diskutiert.

Einschweißtiefe

Zur Bestimmung des tragenden Nahtquerschnitts werden metallografische Schliffe der Stirnflachnähte angefertigt und die Proben unter dem Mikroskop begutachtet (Bild 6-6). Bei einer Naht ohne Nahtversatz entspricht die tragende Nahttiefe einer Stirnflachnaht der Einschweißtiefe. Bei den Modelluntersuchungen werden nicht verunreinigte sowie kontaminierte Proben untersucht. Alle Proben, die mit dem integrierten Schweißroboter gefügt werden, sind kontaminiert. In Bild 6-7 sind die gemessenen Werte der Einschweißtiefe s für verschiedene Eingangsparameter dargestellt. Zur Förderung des indikatorischen Bildverständnisses sind die zentralen Informationen textuell ergänzt (vergleiche Abschnitt 3.4.4.3). Die Einschweißtiefe nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab. Die im Bild eingezeichneten Fehlerbalken stellen den jeweiligen Vertrauensbereich für ein Vertrauensniveau $1-\alpha=95\%$ dar (siehe Pfeifer [174]). Bei Optik 1 liegen die gemessenen Werte für die Schweißungen kontaminierter Proben nur leicht unterhalb der Werte der Proben ohne Kontamination. Ein geringer Teil der Laserenergie wird zur Verdampfung von IHU-Medium und Schmierstoff benötigt. Der Unterschied zwischen kontaminierten und unkontaminierten Proben liegt bei maximal 5% und ist für das gewählte Vertrauensniveau nicht signifikant (vergleiche Pfeifer [174]). Proben, die mit einem schleppten oder stechenden Anstellwinkel von 30° gefügt sind, und Proben mit einer zweifachen Verschweißung zeigen nur geringfügige Unterschiede in der Einschweißtiefe, so dass eine grafische Darstellung dieser Ergebnisse nicht erforderlich ist.

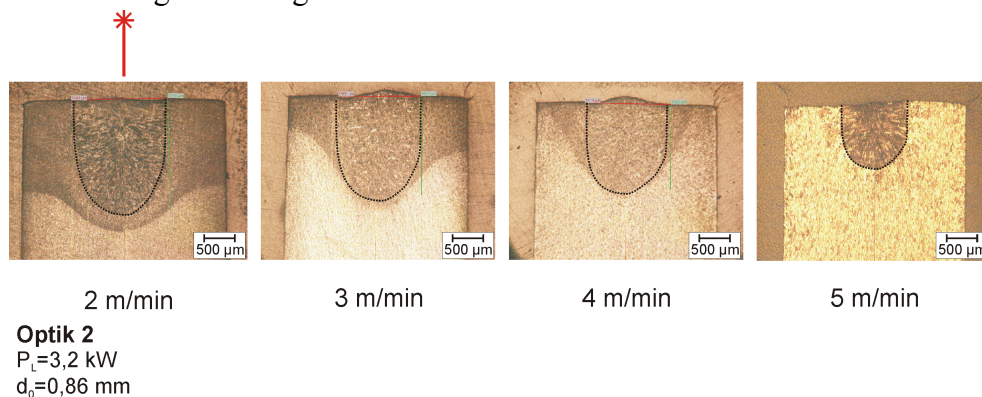
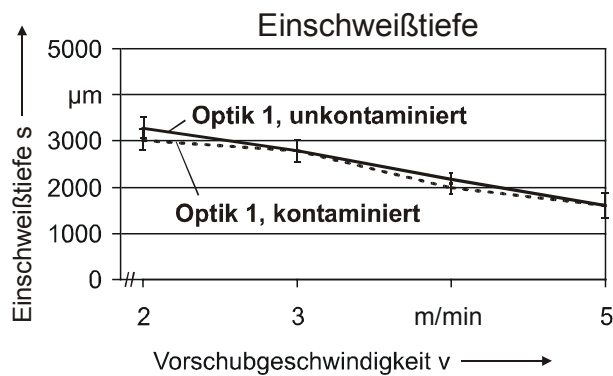
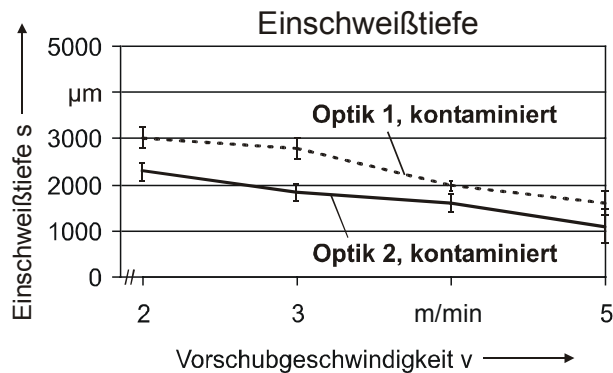


Bild 6-6: Integrierter Prozess: Beispiele für die Einschweißtiefe in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit (Nahtform hervorgehoben)

Nach Literaturangaben (z.B. Hügel [110]) beginnt der Tiefschweißeffekt bei einer Leistungsdichte von 1 bis 10 kW/mm² (siehe Abschnitt 3.3.1). Mit dem verwendeten Nd:YAG-Laser ergibt sich mit Optik 2 bei einem um 30° von der Senkrechten geneigten Strahl eine Leistungsdichte $I_{0,A}$ von 4,6 kW/mm² (vergleiche Tabelle 5-8). Der verwendete Nd:YAG-Laser verfügt damit über eine so hohe Leistungsdichte, dass selbst bei diesem Anstellwinkel noch ein Tiefschweißeffekt gewährleistet ist (siehe auch [192]).



- Lineare Abnahme der Einschweißstiefe mit der Vorschubgeschwindigkeit
- Kein signifikanter Unterschied in der Einschweißstiefe zwischen kontaminierten und unkontaminierten Proben

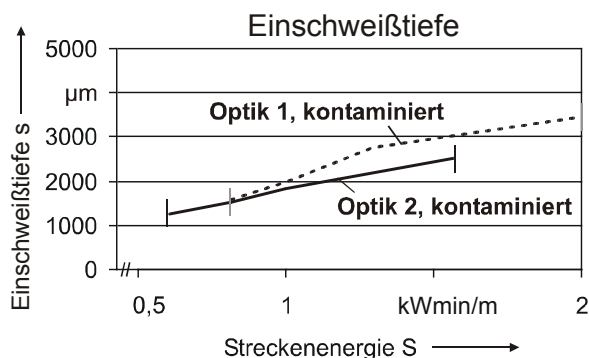


- Lineare Abnahme der Einschweißstiefe mit der Vorschubgeschwindigkeit
- Signifikante Abnahme der Einschweißstiefe bei Optik 2 gegenüber Optik 1

Optik 1 **Optik 2**
 $P_L=3,9 \text{ kW}$ $P_L=3,2 \text{ kW}$ $n=6$
 $d_0=0,65 \text{ mm}$ $d_0=0,86 \text{ mm}$ $1-\alpha=95 \%$

Bild 6-7: Einschweißstiefe s in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit v , Kontamination und verwendeter Optik

Die Einschweißstiefe der Proben, die mit dem integrierten Schweißroboter gefügt sind, ist im Vergleich zu Optik 1 deutlich geringer, wie Bild 6-8 zeigt. Es ist zu untersuchen, ob dieser Effekt vorwiegend auf die geringere Laserleistung zurückzuführen ist oder auch der größere Fokussdurchmesser eine Rolle spielt. Dazu wird für beide Optiken die jeweilige Streckenenergie S berechnet (siehe Abschnitt 3.3.1).



- Auch bei gleicher Streckenenergie geringere Einschweißstiefe bei Optik 2

⇒ Die geringere Einschweißstiefe bei Optik 2 ist sowohl auf die geringere Laserleistung als auch auf den größeren Fokussdurchmesser zurückzuführen.

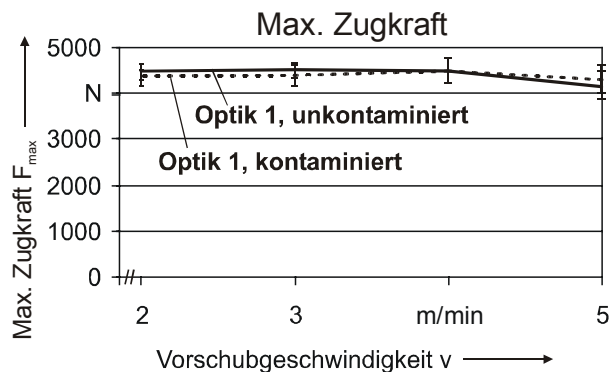
Optik 1 **Optik 2**
 $P_L=3,9 \text{ kW}$ $P_L=3,2 \text{ kW}$
 $d_0=0,65 \text{ mm}$ $d_0=0,86 \text{ mm}$

Bild 6-8: Einschweißstiefe s in Abhängigkeit von Streckenenergie S , Kontamination und verwendeter Optik

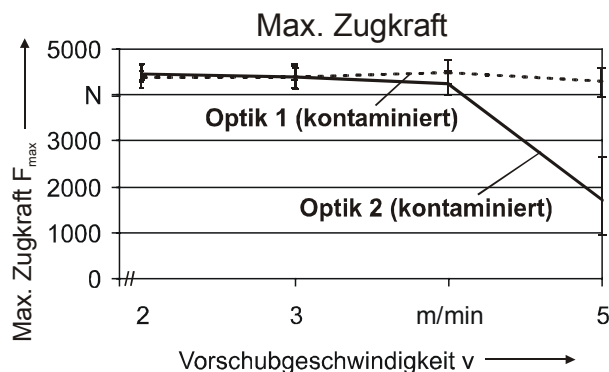
Trägt man die Ergebnisse grafisch auf, so erkennt man, dass auch bei gleicher Streckenenergie die Einschweißtiefe bei Optik 2 geringer ist. Die maximale Streckenenergie liegt bei Optik 1 bei 2 kWmin/m (120 kJ/m) und bei Optik 2 bei 1,6 kWmin/m (96 kJ/m). Als Ergebnis ist festzuhalten, dass die geringere Einschweißtiefe bei Optik 2 sowohl auf einer geringeren Laserleistung als auch auf einem größeren Fokussdurchmesser beruht.

Maximale Zugkraft

In Anlehnung an DIN EN 10002-1 [193] werden aus den verschweißten Blechen Zugproben gemäß Bild 6-4 mit einem CO₂-Laser ausgeschnitten und mechanisch aufgebogen. Beim statischen Zugversuch in einer weggesteuerten Zugprüfmaschine Schenk-Trebel RM 400 werden die Proben mit einer Geschwindigkeit von 40 mm/min bis zum Bruch belastet und während der Lastaufbringung Kraft-, Weg- und Zeitverläufe gemessen. Die Stirnflachnaht wird durch das Umbiegen der Probenenden und das daraus resultierende Umlenken der Krafteinleitung auf Zug und auf Schälung beansprucht.



- Nahezu konstante Zugkraft für untersuchten Geschwindigkeitsbereich
- Kein signifikanter Unterschied in der Einschweißtiefe zwischen kontaminierten und unkontaminierten Proben



- Vergleichbare Zugkraft für Optik 1 und Optik 2 für $v < 3$ m/min
- Sehr starke Abnahme der Zugkraft bei Optik 2 für $v > 4$ m/min

Optik 1 **Optik 2**
 $P_L=3,9$ kW $P_L=3,2$ kW Probenbreite $n=6$
 $d_0=0,65$ mm $d_0=0,86$ mm $b=10$ mm $1-\alpha=95$ %

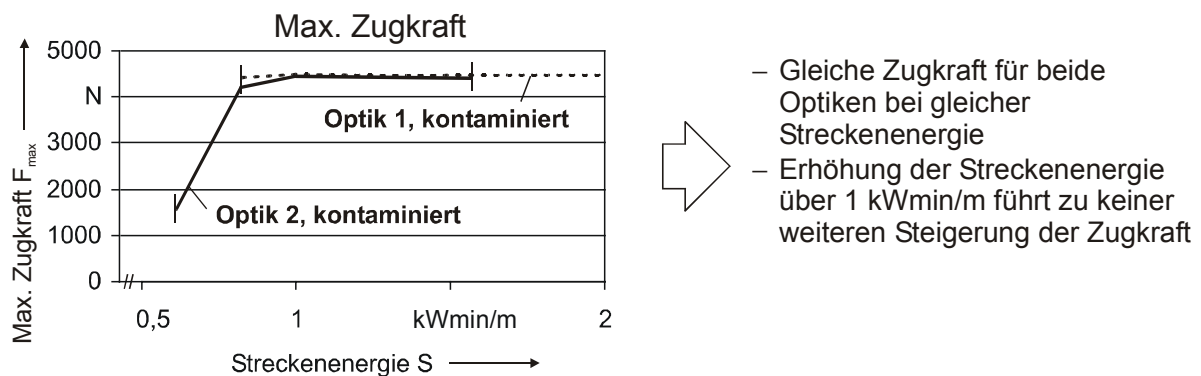
Bild 6-9: Maximale Zugkraft F_{max} in Abhängigkeit von Vorschubgeschwindigkeit v , Kontamination und verwendeter Optik

Die Ergebnisse der Zugversuche in Bild 6-9 zeigen, dass die maximale Zugkraft F_{max} der Schweißnaht bei Optik 1 bis zu einer Vorschubgeschwindigkeit von circa 5 m/min nahezu konstant ist. Auch bei 6 m/min liegt sie noch bei circa 4.000 N (nicht abgebildet). Alle Proben versagen bei den durchgeführten Versuchen nicht in der Naht, sondern in der Wärmeeinflusszone. Der Unterschied zwischen den Proben, die ohne und mit Kontamination verschweißt sind, liegt maximal bei 5 % und ist für das gewählte Vertrauensniveau nicht

signifikant. Dies korreliert mit Ergebnissen von Schultz [120] und Backes [119]. Ein Anstellwinkel und eine zweifache Verschweißung haben ebenfalls keinen signifikanten Einfluss auf die maximale Zugkraft.

Bei Optik 2 ist im Vergleich zu Optik 1 ein deutlicher Abfall der Zugkraft bei Geschwindigkeiten über 4 m/min festzustellen. Bei manchen Proben tritt bei diesen Geschwindigkeiten bereits ein Versagen in der Naht auf, was in hohen Schwankungen der Einzelwerte und einem großen Vertrauensbereich resultiert. Analog zu den Untersuchungen der Einschweißtiefe bewirken ein Anstellwinkel und eine zweifache Verschweißung keine signifikante Änderung der maximalen Zugkraft.

Normiert man - analog zur Diskussion der Werte für die Einschweißtiefe - die Zugkraft auf die jeweiligen Streckenenergien, so erkennt man, dass sich bei gleicher Streckenenergie die gleiche Zugkraft für beide Optiken ergibt und eine Erhöhung der Streckenenergie über 1 kWmin/m (60 kJ/m) keine Steigerung der Zugkraft mehr ermöglicht (Bild 6-10).

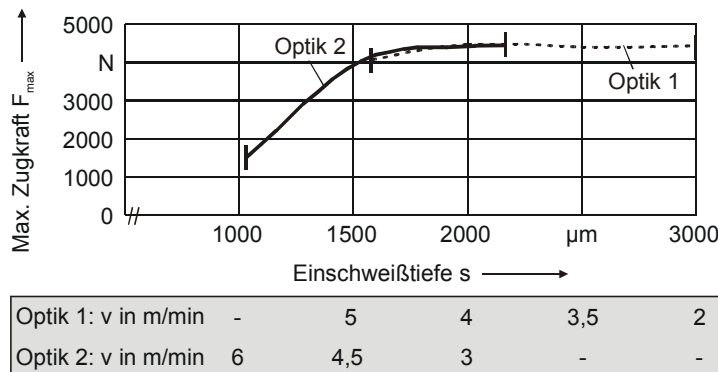


| | | |
|----------------|----------------|--------------|
| Optik 1 | Optik 2 | |
| $P_L=3,9$ kW | $P_L=3,2$ kW | Probenbreite |
| $d_o=0,65$ mm | $d_o=0,86$ mm | $b=10$ mm |

Bild 6-10: Maximale Zugkraft F_{\max} in Abhängigkeit von Streckenenergie S , Kontamination und verwendeter Optik

Korrelation zwischen Einschweißtiefe und Zugkraft

Setzt man Einschweißtiefe und Zugkraft miteinander in Korrelation, wie in Bild 6-11 geschehen, so erkennt man, dass die gleiche Einschweißtiefe bei beiden Optiken in derselben maximalen Zugkraft resultiert. Weiterhin lässt sich ableiten, dass eine Erhöhung der Einschweißtiefe über 2 mm zu keiner signifikanten Verbesserung der Zugkraft führt, sondern lediglich aufgrund der langsameren Vorschubgeschwindigkeit die Prozess- und Taktzeit erhöht. Eine hohe Einschweißtiefe erfordert eine niedrige Vorschubgeschwindigkeit, die zur Häufung von Metallspritzern führt.



- Die gleiche Einschweißtiefe führt bei beiden Optiken zur gleichen Zugkraft.
- Erhöhung der Einschweißtiefe über 2 mm führt zu keiner weiteren Erhöhung der Zugkraft.

Optik 1 **Optik 2**
 $P_L=3,9$ kW $P_L=3,2$ kW
 $d_e=0,65$ mm $d_e=0,86$ mm

Bild 6-11: Korrelation zwischen Einschweißtiefe s , maximaler Zugkraft F_{\max} und Vorschubgeschwindigkeit v (gerundete Werte)

Dauerfestigkeit

Um neben der statischen maximalen Zugkraft auch Richtwerte für die dynamische Festigkeit der Schweißnähte zu gewinnen, werden Dauerschwingversuche mit einem Hochfrequenz-Resonanzpulsator Roell Amsler HFP 5100 durchgeführt. Die Anlage besteht aus einem statischen Maschinenelement zur Generierung einer regelbaren statischen Mittellast und einem auf Resonanzbasis arbeitenden dynamischen Element zur Erzeugung einer regelbaren dynamischen Lastamplitude [194]. Zur Aufbringung einer sinusförmigen dynamischen Kraft wird die Probe als Feder in einen Feder-Masse-Feder-Schwingkreis geschaltet. Die Prüffrequenz ergibt sich aus der Probengeometrie, der Probenmasse und der Massen im Schwingkreis (hierzu zählt beispielsweise die Einspannvorrichtung) zu 60 bis 70 Hertz.

Die Dauerfestigkeit von Stählen ist nach Domke [195] nach einer Million (10^6) Lastwechseln erreicht. Dauerfestigkeitsversuche können nur an I-Nähten durchgeführt werden, da sich auseinandergebogene Proben mit Stirnflachnaht in den Versuchen elastisch verformen und somit nur ein geringer Teil der eingebrachten Kraft auf die Schweißnaht wirkt. Die I-Naht wird auf Zug und auf Scherung belastet. Maximale Zugkraft und Einschweißtiefe von I-Nähten sind mit den Werten von Stirnflachnähten vergleichbar, sofern beide Bleche verschweißt sind (Einschweißtiefe größer als Blechdicke), aber die Bleche nicht durchgeschweißt sind (Einschweißtiefe kleiner als zweifache Blechdicke). Bei einer Durchschweißung tritt ein Teil der Laserleistung und der Schmelze an der dem Bearbeitungskopf gegenüberliegenden Seite wieder aus. Dies führt zur Verringerung von Einschweißtiefe und Zugkraft gegenüber der Stirnflachnaht. Eine Übertragbarkeit der dynamischen Zugversuche auf Stirnflachnähte ist im vorliegenden Fall bei einer Vorschubgeschwindigkeit von circa 3 m/min gegeben. Die Wahl dieser Geschwindigkeit erweist sich zudem als vorteilhaft, weil sie der optimalen Geschwindigkeit im integrierten Prozess entspricht (vergleiche Abschnitt 6.3).

Bei der Niveaumittlung kann in Vorversuchen anhand der Bruchgeometrie festgestellt werden, ob die Probe aufgrund einer zu hohen Grundlast oder einer zu groß gewählten Amplitude versagt. Während die überdimensionierte Grundlast die Schweißnaht relativ früh im Versuch (ungefähr nach 20.000 bis 200.000 Lastwechseln) in der Mitte zwischen beiden

Blechen durchtrennt, wird durch eine zu große Amplitude eines der Bleche an der Schweißnaht aufgetrennt. Dieser Versagensfall tritt etwa ab der Hälfte der angestrebten Lastwechsel auf (Bild 6-12).

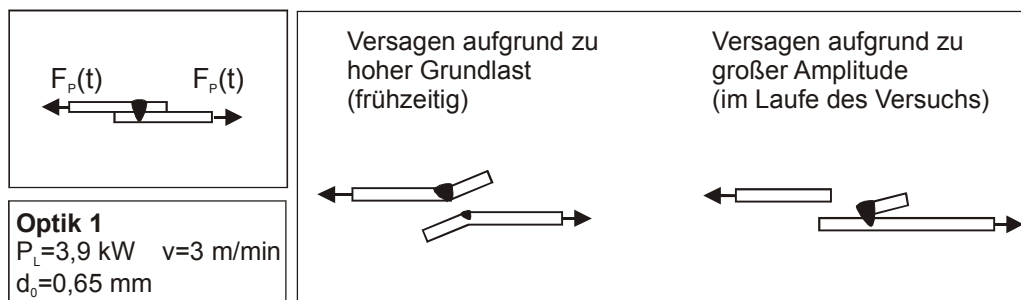


Bild 6-12: Charakteristische Bruchformen der I-Naht im Dauerschwingversuch

Anhand der Bruchgeometrie lässt sich in Vorversuchen ein Prüfniveau von $1,5 \pm 0,45$ kN für unkontaminierte und $1,3 \pm 0,45$ kN für kontaminierte Proben bestimmen. Auf diesen Niveaus werden Hauptversuche mit jeweils 20 Proben ohne Anstellwinkel und je 10 Proben mit einem stechenden bzw. schleppenden Anstellwinkel von 30° durchgeführt, ohne dass ein Versagen auftritt. Ein signifikanter Einfluss eines Anstellwinkels ist damit nicht zu verzeichnen. Verunreinigungen haben damit nur einen geringen Einfluss auf die Dauerfestigkeit der Schweißnaht.

Porenbildung

Bei einer unvollständigen Verdampfung der Kontamination verbleiben Rückstände im Keyhole und in der Schmelze, die nach dem Erstarren der Naht als Poren detektierbar sind. Deshalb werden die Schweißnähte mittels einer Röntgengrobstrukturanalyse auf Poren hin untersucht. Im Röntgenbild sind Einschlüsse von Fremdmaterial oder Luft Einschlüsse (Poren) infolge ihrer geringeren Absorption von Röntgenstrahlung im Vergleich zu Stahl deutlich zu erkennen. Für die Festigkeit der Schweißnähte sind Porenzahl, -größe und -volumen relevant. Im Rahmen der Modelluntersuchungen werden Proben während der Prüfung entlang der Schweißnaht verfahren und die Poren vermessen.

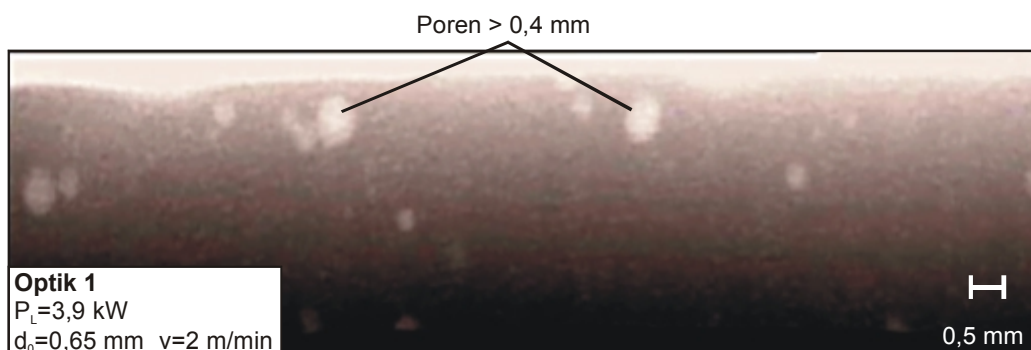
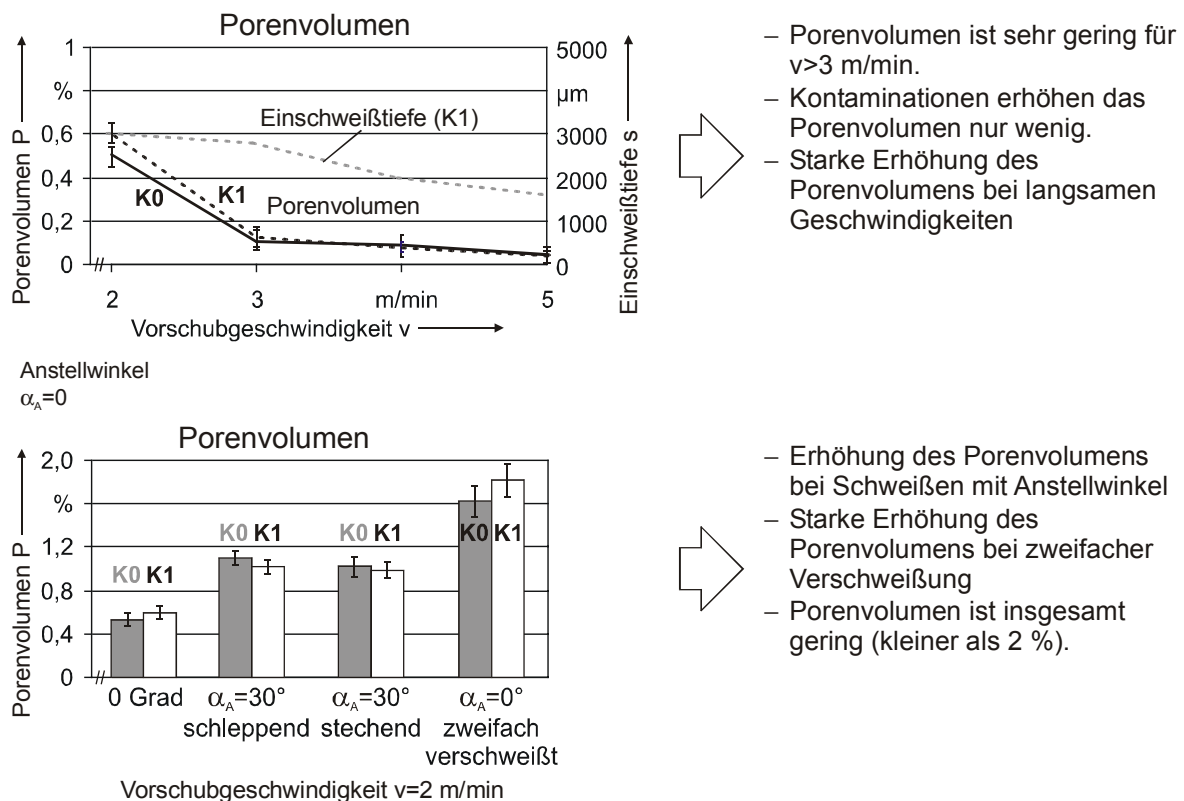


Bild 6-13: Röntgenbild einer Probe (kontaminiert, zweifach geschweißt)

Die gemessenen Poren weisen unabhängig von Vorschubgeschwindigkeit und Anstellwinkel eine durchschnittliche Größe von 0,2 mm und eine maximale Größe von 0,6 mm auf. Zur Quantifizierung bietet sich die Bestimmung des relativen Porenvolumens P an. Das Volumen der Schweißnaht ergibt sich aus Messung der Nahtfläche quer zur Schweißrichtung in

Schliffen multipliziert mit der Nahtlänge. Aus der Größe einer Porenfläche im Röntgenbild ergibt sich bei Annahme einer Kugelform ihr Volumen. Multipliziert man dies mit der Anzahl der Poren, so erhält man das gesamte absolute Porenvolumen einer Naht. Bezieht man Naht- und absolutes Porenvolumen aufeinander, so ergibt sich das relative Porenvolumen. Die Messungen zeigen, dass bei Geschwindigkeiten von 3-5 m/min das relative Porenvolumen weniger als 0,1 % beträgt und damit sehr gering ist. Dies deckt sich mit Literaturangaben [100]. Kontaminationen erhöhen das Porenvolumen nur in geringem Maße (Bild 6-14). Bei $v=2$ m/min erhöht sich das Porenvolumen gegenüber höheren Geschwindigkeiten überproportional zur Vergrößerung der Einschweißtiefe. Diese ist in Bild 6-14 zur Vergleichbarkeit der Werte zusätzlich eingezeichnet.

**Optik 1**

$P_L=3,9$ kW $n=6$ K0=unkontaminiert
 $d_s=0,65$ mm $1-\alpha=95$ % K1=kontaminiert

Bild 6-14: Porenvolumen P und Einschweißtiefe s in Abhängigkeit von Kontamination, Vorschubgeschwindigkeit v, Anstellwinkel α_A und zweifacher Schweißung

Im Gegensatz zu diesen Versuchen zeigte eine Verunreinigung der Proben mit IHU-Medium und Schmierstoff in Versuchen, die dieser Arbeit vorangingen, einen signifikanten Einfluss auf die Porenzahl. Dabei wurde ein Laser mit einer Nennleistung von 2 kW eingesetzt. Bei der hier verwendeten doppelten Laserleistung verdampfen die Kontaminationen weit besser, so dass nur sehr geringe Rückstände von IHU-Medium und Schmierstoff als Fremdkörper zur Porenbildung beitragen.

Bei langsameren Geschwindigkeiten wird mehr Energie pro Flächeneinheit eingebracht und somit mehr Material aufgeschmolzen. Schmelze und Keyhole werden durch die höhere Dynamik besser durchmischt. Infolge dieser Verwirbelung in dem direkt hinter dem Keyhole entstehenden Schmelzebecken wird ein höherer Anteil der Verunreinigungen tief in die

Schweißnaht eingebracht. Die Schmelze erstarrt, bevor die in ihr eingeschlossenen Gase und Rückstände vollständig entweichen können. Bei hohen Vorschubgeschwindigkeiten ist die Menge an geschmolzenem Werkstoff geringer und dadurch die Bewegung innerhalb des Schmelzbad es erheblich reduziert. Da die Rückstände größtenteils verdampfen und aus der Naht austreten, werden weniger Fehlstellen gebildet.

Während die Eingangsgrößen Anstellwinkel und zweifache Verschweißung auf die Ausgangsgrößen Einschweißtiefe und Zugkraft keinen signifikanten Einfluss ausüben, wirken sie sich auf die Porenbildung signifikant aus, wie in Bild 6-14 unten zu erkennen ist. Die Erhöhung des Porenvolumens infolge des Anstellwinkels lässt sich durch eine ungünstigere Ausbildung des Keyholes erklären, die eine höhere Durchmischung bewirkt und die Ausgasung erschwert.

Eine zweifach verschweißte Probe liefert den höchsten gemessenen Wert mit einem relativen Porenvolumen von 1,8 %. Während des Schweißvorgangs verdampfen und zersetzen sich die Schmierstoffkomponenten im Bereich der Schweißstelle. Solange die Naht noch nicht geschlossen ist, entweichen die Gase und Rückstände hauptsächlich in Richtung des Spalts vor der Naht und in Richtung des Laserstrahls (Bild 6-15 links). Im Gegensatz dazu ist beim Schweißen auf eine bereits bestehende Naht ein Entgasen nur noch in Richtung des Laserstrahls möglich. Geschieht dies nicht mit der notwendigen hohen Geschwindigkeit, so können Dampfblasen und - im vorliegenden Fall - Reste von IHU-Medium und Schmierstoff im erstarrenden Schmelzbad eingeschlossen werden (Bild 6-15 rechts). Darüber hinaus werden die in der ersten Naht eingeschlossenen Rückstände erneut aufgeschmolzen und tragen zusätzlich zu einem erhöhten Porenvolumen bei.

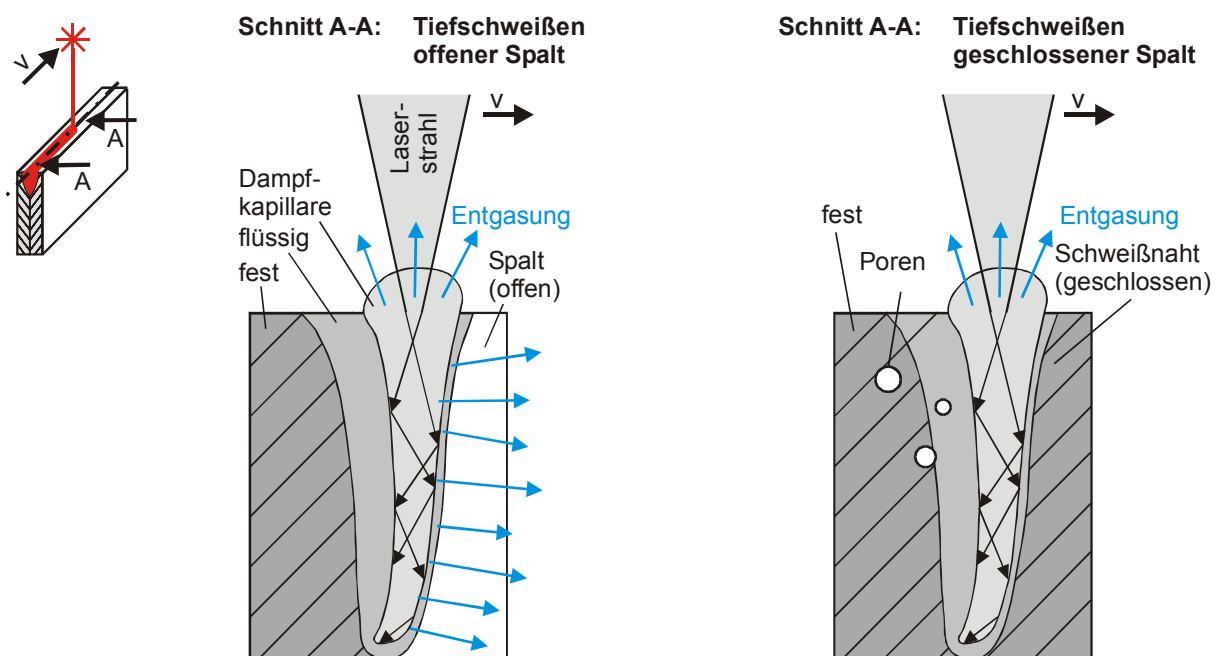


Bild 6-15: Mechanismus der Porenbildung an der Nahtüberlappung (vergleiche Bild 3-5)

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass bei Vorschubgeschwindigkeiten über 2 m/min aufgrund der sehr hohen Strahlleistung fast alle auftretenden Störeinflüsse der Kontamination durch den Laser eliminiert werden. Nach Schultz [120] werden Schweißnähte, deren

Porenvolumina die Grenze von 5 Volumenprozent nicht überschreiten, als sehr gut eingestuft. Damit sind alle Nähte einschließlich der Proben mit Überschweißung als sehr gut zu bewerten.

6.2.2 Bestimmung der zulässigen Toleranz

Zur Ermittlung der Anforderungen an die Positionier- und Wiederholgenauigkeit des zu integrierenden Schweißroboters werden Proben mit Optik 1 gezielt mit einer Defokussierung sowie mit einem Nahtversatz bei einer Geschwindigkeit von 3 m/min geschweißt (vergleiche Bild 4-6) und die Einschweißtiefe sowie die maximale Zugkraft ermittelt.

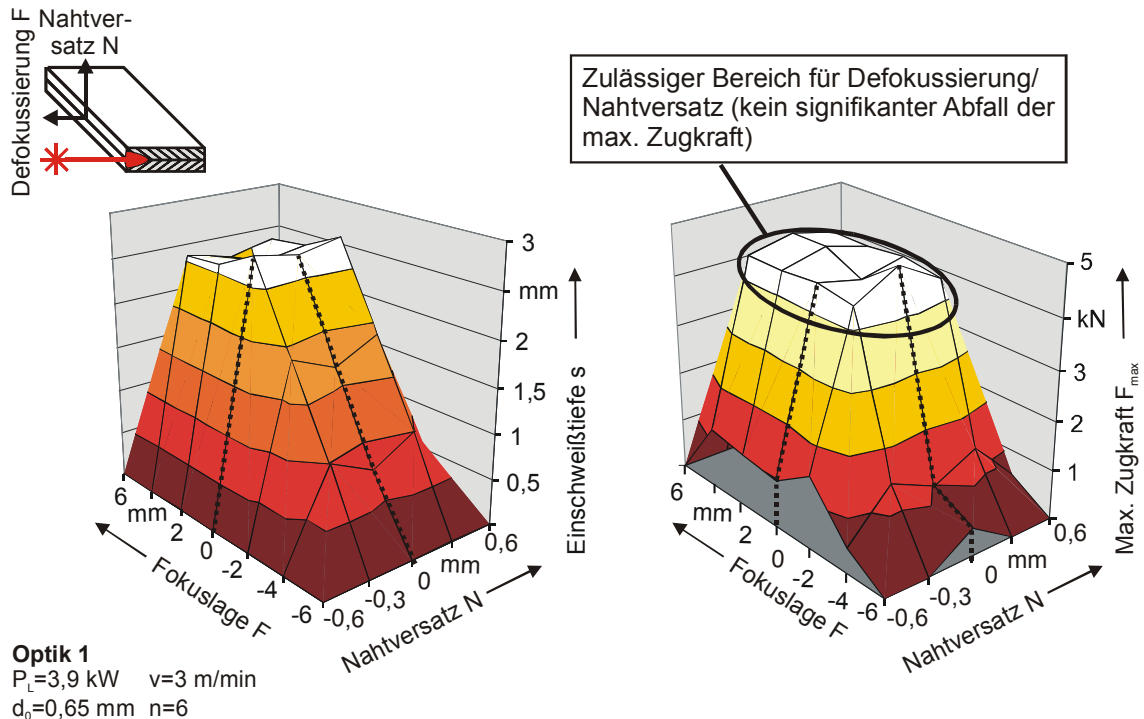
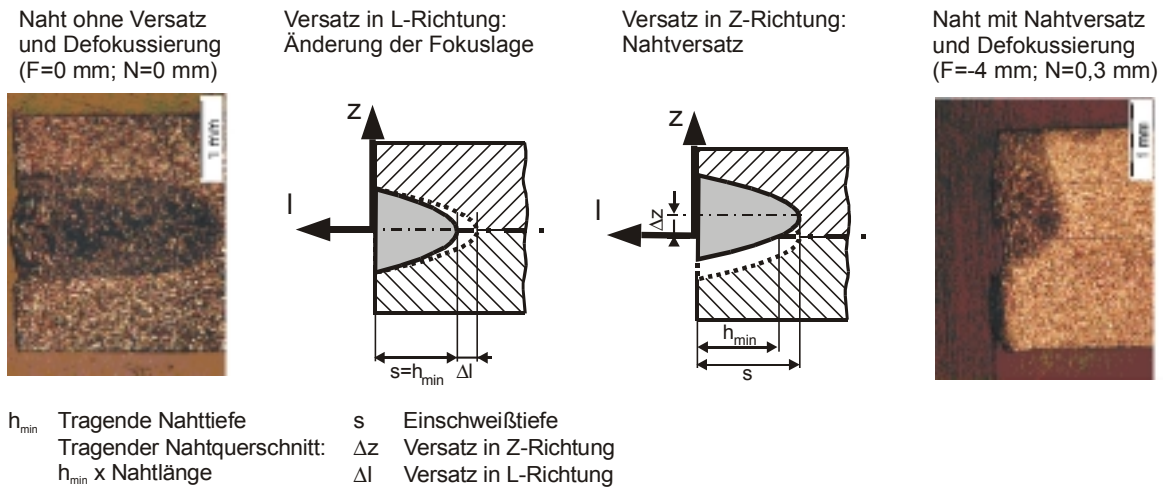


Bild 6-16: Einfluss von Nahtversatz N und Fokusslage F auf Einschweißtiefe s und maximale Zugkraft F_{max}

Wie Bild 6-16 zeigt, kann eine Defokussierung für Optik 1 im Bereich [-2 mm; +4 mm] zugelassen werden, ohne dass die maximale Zugkraft signifikant abfällt. Der zulässige Versatz aus dem Blech heraus entspricht damit fast der Rayleighlänge von 4,8 mm und ein Versatz in das Blech hinein in etwa der halben Rayleighlänge. Analog durchgeführte Versuche mit dem integrierten Schweißroboter zeigen, dass bei Optik 2 eine Defokussierung von ± 3 mm zugelassen werden kann.

Ein Nahtversatz ist für beide Optiken im Bereich [-0,3 mm; +0,3 mm] zulässig, ohne dass die maximale Zugkraft signifikant abfällt. Solange mehr als die Hälfte der Fokuskreisfläche auf die Blechkanten trifft, ergibt sich nach Hügel [110] eine Selbstfokussierung der Laserstrahlung in den Fügspalt.

6.2.3 Zusammenfassung der Modell- und Grundlagenuntersuchungen

Mit den dargestellten Modelluntersuchungen ist der prinzipielle Nachweis erbracht, dass ein Schweißen im Umformwerkzeug trotz Verunreinigungen auf den Blechen durch IHU-Medium und Schmierstoff bei guter Nahtqualität möglich ist. Aus den Untersuchungen sind folgende Ergebnisse für den Einsatz des Laserstrahlschweißens im IHU-Werkzeug festzuhalten:

- Ein Tiefschweißprozess liegt bei Leistungsdichten von $4,6 \text{ kW/mm}^2$ und höher vor. Zur rückstandsfreien Verdampfung von Kontaminationen sind möglichst hohe Laserleistungen zu applizieren.
- Die Kontamination mit IHU-Medium und Schmierstoff spielt bei Laserleistungen über 2 kW und Vorschubgeschwindigkeiten über 2,5 m/min als Störgröße eine untergeordnete Rolle. Das Schweißen im Umformwerkzeug lässt damit keine signifikante Beeinflussung der Nahtfestigkeit durch die Kontamination erwarten.
- Voraussetzung für eine hohe Nahtqualität ist eine optisch fehlerfreie Naht (hohe optische Nahtqualität)
- Die gewählte Vorschubgeschwindigkeit muss so hoch sein, dass eine starke Verwirbelung der Schmelze vermieden wird, da sonst Oberflächenkontaminationen in die Naht eingebracht werden und eine starke Metallspritzerbildung auftritt. Andererseits muss die Geschwindigkeit so niedrig sein, dass eine Einschweißtiefe von mindestens 1,5 mm zum Erzielen einer hohen Nahtfestigkeit erreicht wird. Dies ist bei Geschwindigkeiten von 3-4 m/min gegeben. Zur Sicherstellung einer gleichbleibenden Nahtqualität muss die gesamte Naht mit möglichst konstanter Geschwindigkeit geschweißt werden. Zu erreichen ist dies durch Zulassen einer Defokussierung von bis zu 3 mm oder durch Anstellen des Laserstrahls in engen Radien. Dabei kann ein stechender oder schleppender Anstellwinkel von 30° zugelassen werden. Die Bahnungenauigkeit des Roboters sollte kleiner als 0,2 mm sein.
- Die Porenbildung nimmt mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ab, da Einschweißtiefe, Nahtvolumen und Verwirbelungen stark reduziert werden. Der Bereich einer Nahtüberlappung ist zu minimieren, da eine zweifache Verschweißung das Porenvolumen stark erhöht.

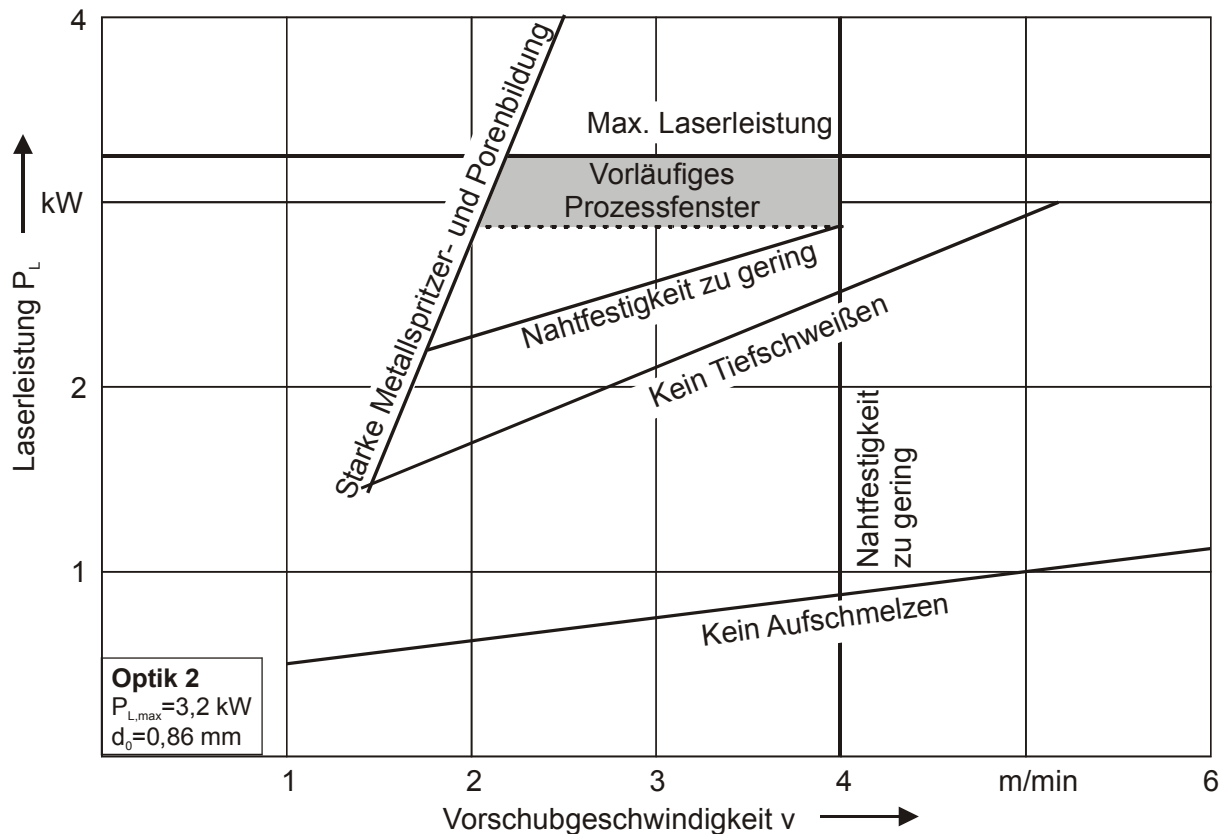


Bild 6-17: Vorläufiges Prozessfenster des integrierten Fügeprozesses (für Blechpaare aus DC04 mit einer Blechdicke von je 1,5 mm; vergleiche hierzu auch Bild 6-3 und Bild 6-41)

Mit den ermittelten Ergebnissen lässt sich das allgemeine Prozessfenster aus Bild 6-3 nun für den integrierten Fügeprozess, wie in Bild 6-17 dargestellt, erweitern. Eine untere Grenze für die Vorschubgeschwindigkeit ergibt sich durch eine starke Metallspritzer- und Porenbildung unterhalb von circa 2,5 m/min bei maximaler Laserleistung. Mit den Ergebnissen der Zugversuche lässt sich eine obere Grenze bei 6 m/min für Optik 1 und bei 4 m/min für Optik 2 festsetzen. Die maximal mögliche Laserleistung von 3,2 kW bildet die obere Grenze des Prozessfensters. Stichprobenversuche zeigen, dass eine Laserleistung von 90 % (2,9 kW) bei Optik 2 nur geringfügig niedrigere Werte für die Zugkraft ergibt als die maximale Laserleistung von 3,2 kW. Damit lässt sich eine vorläufige Untergrenze des Prozessfensters bestimmen. Die Verläufe für den Beginn des Wärmeleitungs- und des Tiefschweißens sowie für eine zu geringe Nahtfestigkeit werden ebenfalls in weiteren Schweißversuchen ermittelt.

Tabelle 6-2 gibt die aus den Untersuchungen abgeleitete Klassifizierung der Ein- und Ausgangsgrößen wieder. Diese ergänzt die theoretische Klassifizierung aus Tabelle 4-7 bis Tabelle 4-11. Die Ausgangsgrößen Härteverlauf, Umformbarkeit der Schweißnaht und Dichtheit werden in den Abschnitten 6.3.4 und 6.3.5 beschrieben.

| Klassifizierung | | | A | B | A | B | A | B | A | B | A | B |
|-----------------|---------------------------------|----------------|-----------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------------|--------------|--------------|-------------------------------|-----------|---------------------------|
| Klassifizierung | Ausgangsgröße | Symbol | Optische Nahtqualität | Einschweißtiefe | Max. Zugkraft | Dauerfestigkeit | Zulässige Toleranz | Härteverlauf | Porenvolumen | Umformbarkeit der Schweißnaht | Dichtheit | Schädigung Umformwerkzeug |
| | Eingangsgröße | | | | | | | | | | | |
| Symbol | | | | s | F _{max} | | | | P | | | |
| A | Laserleistung (Fokusbildung) | P _L | X | | | | | | | X | | X |
| A | Vorschubgeschwindigkeit | v | | X | X | | | | X | | | X |
| B | Überschweißen (Nahtüberlappung) | | X | X | X | | | | X | | X | X |
| B | Fokusbildung | F | | X | X | | X | | | | | X |
| B | Nahtversatz | N | | X | X | | X | | | | | X |
| B | Anstellwinkel | α _A | | X | X | X | | X | X | | | X |
| B | Kontamination | K | | X | X | X | | X | X | X | X | X |

Tabelle 6-2: Klassifizierung der Ein- und Ausgangsgrößen (vergleiche Tabelle 6-1)

Folgerungen für die Integration des Schweißprozesses

Aus den vorangegangenen Ergebnissen der Modelluntersuchungen mit dem Knickarmroboter werden für den in Abschnitt 5.3 dargestellten Konstruktions- und Optimierungsprozess folgende Punkte berücksichtigt:

– Zugänglichkeit

IHU-Werkzeug und Presseneinbauraum bestimmen den für die Realisierung der Schweißbewegung zur Verfügung stehenden Raum. Beim Verfahren innerhalb des Umformwerkzeugs beschränken die Außenkontur des Werkzeugs und die maximale Öffnungshöhe der äußeren Niederhalter die Zugänglichkeit zum Bauteilflansch. Aufgrund der beengten Einbauverhältnisse ist der Roboter möglichst klein zu bauen. Insbesondere ist eine Optik mit kleinem Linsendurchmesser und kleinem Fokusabstand einzusetzen.

– Verfahrensweg

Eine Überschweißung der Bahn ist notwendig. Dazu muss der Roboter mehr als 360° verfahrbar sein. Aufgrund der starken Porenbildung ist der Bereich der Nahtüberlappung klein zu halten. Je größer der Verfahrensweg des Roboters ist, umso mehr Möglichkeiten gibt es, Nahtanfang und -ende in einen unkritischen Bereich des Flansches zu legen.

- Anforderungen an die Achskinematik
Die Toleranzforderungen an die Achsen liegen mit circa 0,2 mm im Bereich der Bahngenauigkeit handelsüblicher Achsbaugruppen. Der Roboter muss eine Vorschubgeschwindigkeit von 2-5 m/min ermöglichen. Diese muss konstant eingehalten werden, um eine gleichbleibende Einschweißtiefe und Zugfestigkeit sicherzustellen.
- Umgang mit Prozessemissionen
Unter den Begriff Prozessemissionen fallen beim Laserstrahlschweißen Metallspritzer, Rauch (insbesondere Ruß), Aerosole, Gase und Strahlung. Bei starker Spritzerbildung besteht die Gefahr einer Werkzeugschädigung. Außerdem beeinflussen auch kleine Spritzer auf den Niederhaltern und auf den Blechen die Reibungsverhältnisse während des Umformens und somit die Umformeigenschaften des Bauteils. Durch eine geeignete Prozessführung mit Vorschubgeschwindigkeiten über 2 m/min ist die Spritzerbildung gering zu halten.
- Steuerung
Aufgrund der komplexen Flanschgeometrie und zur Erleichterung der Bahnoptimierung soll der Roboter in globalen kartesischen Koordinaten programmierbar sein. Dazu ist eine geeignete Steuerung zur Achstransformation einzusetzen.
- Dichtheit
Ist eine durchgängige Dichtheit der Naht gewünscht, so sind die an massiven Schmierstoffrückständen gelegentlich auftretenden Nahtfehler in Form von Mikrolöchern und Undichtigkeiten im integrierten Prozess gesondert zu untersuchen.

6.3 Optimierung des Fügeprozesses in der integrierten Prozesskette

Nachdem das vorläufige Prozessfenster für den integrierten Fügeprozess festgelegt ist, kann nun die Optimierung des Gesamtprozesses erfolgen. Dazu sind folgende Zielrichtungen zu verfolgen:

- Optimierung der Schweißbahn für die Realbauteile
- Erzielung einer gleichbleibenden, hohen Einschweißtiefe und Zugkraft in der integrierten Prozesskette
- Realisierung einer durchgehend dichten Schweißnaht in der integrierten Prozesskette
- Erarbeitung eines Prozessfensters aus den gewonnenen Parametern

6.3.1 Optimierung der Schweißbahn

Während die Schweißbahn in den Modell- und Grundlagenuntersuchungen eine Gerade darstellt, ist sie bei den Realbauteilen wesentlich komplexer. Ziel der Optimierung der Schweißbahn ist das Sicherstellen einer konstanten Bahngeschwindigkeit am TCP von bis zu $v=5$ m/min bei möglichst konstanter Fokusslage, um bei konstanter Laserleistung eine gleichbleibende Streckenenergie und somit eine konstante Energieeinbringung über die gesamte Werkstückkontur während des gesamten Schweißprozesses zu gewährleisten. Hierzu wird aufbauend auf den Untersuchungen von Backes [119], Schultz [120] und Otto [5] (vergleiche Abschnitt 3.3.2) der in Bild 6-18 dargestellte Optimierungsalgorithmus angewendet.

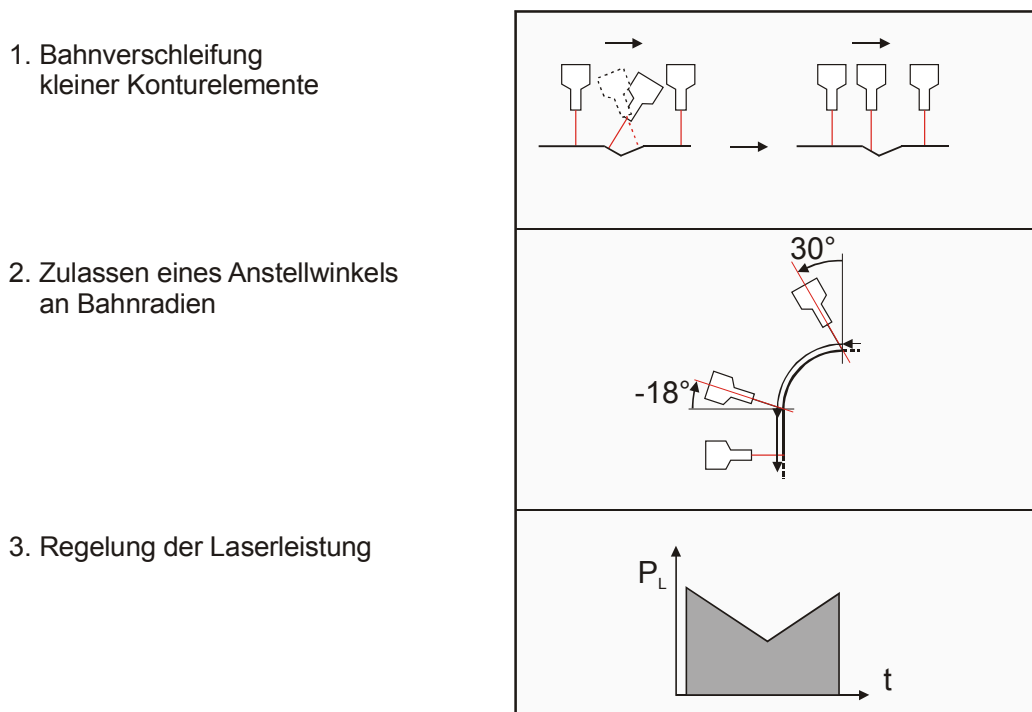
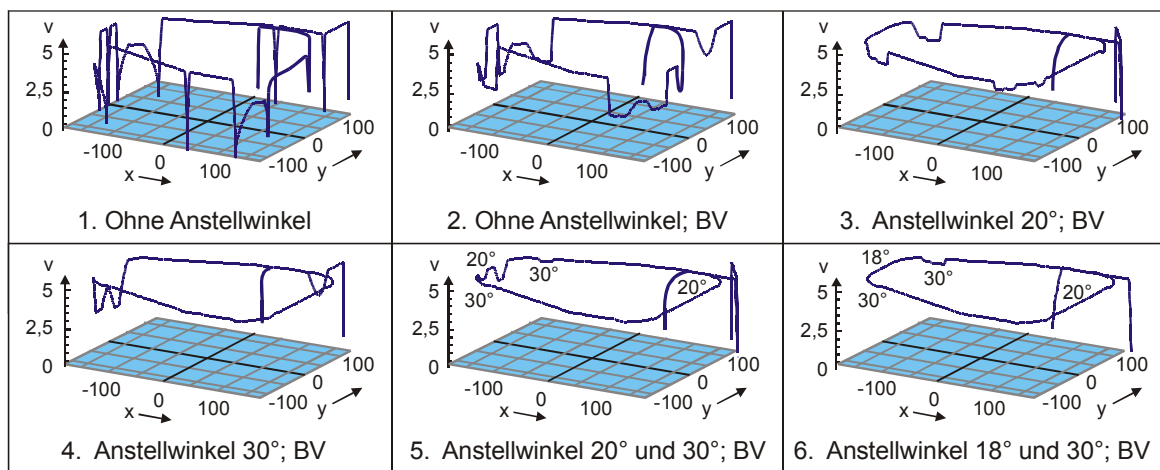


Bild 6-18: Algorithmus zur Bahnoptimierung (in Anlehnung an Backes [119])

Die Schweißbahn entspricht dem Flansch nach dem mechanischen Scherschneiden. Die genauen Maße sind im Anhang wiedergegeben. In Bild 6-19 wird für die verschiedenen Optimierungsstrategien die Geschwindigkeit über die X- und Z-Koordinate dargestellt. Die

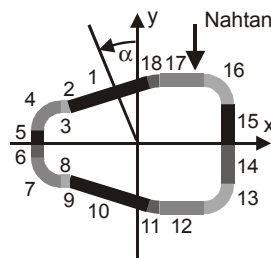
Werte für die Geschwindigkeit des TCP werden mit einem selbst entwickelten Trace-Programm durch die Robotersteuerung protokolliert. Im einfachsten Fall wird jeder Punkt mit der Genauigkeit der Steuerung angefahren, wobei die Geschwindigkeit an jedem Stützpunkt fast auf Null sinkt (Bild 6-19, Diagramm 1). Ein derartig exaktes Abfahren der Kontur ist zwar für Fräsprozesse notwendig, für Schweißungen allerdings unbrauchbar. Deshalb wird das Programm mit einer Bahnverschleifung abgefahren, in der für jeden Stützpunkt per NC-Befehl eine Ungenauigkeit von 0,02 mm zugelassen wird. Der Genauhalt an Nahtanfang und Nahtende wird vermieden, indem diese Bereiche mit konstanter Geschwindigkeit überfahren werden und während des Fahrens der Laser mit einem Synchronbefehl der Robotersteuerung an- bzw. ausgeschaltet wird (vergleiche hierzu Otto [5]). Wie aus der Auswertung der dynamischen Anforderungen für den theoretisch optimalen Schweißprozess zu erwarten ist, erweisen sich die Geometrien der Bereiche 2/3 und der spiegelbildlich angeordneten Bereiche 8/9 aufgrund ihrer extrem kleinen Radien und ihrer geringen Längen des Kreisbogens als besonders problematisch. Da die für eine ideale Schweißbahn notwendige hohe Geschwindigkeit des Drehkranzes mit dem vorliegenden Roboteraufbau nicht zu realisieren ist, wird dieser Bereich - wie in der a-priori-Bahnplanung vorgesehen - zunächst linear überfahren. Die dadurch entstehende Defokussierung von über 6 mm überschreitet die zulässige Toleranz von 3 mm (vergleiche Abschnitt 6.2.2) und resultiert in einer starken Verringerung von Einschweißtiefe und Nahtfestigkeit. Einen guten Kompromiss zwischen hoher Vorschubgeschwindigkeit und hoher Nahtfestigkeit liefert das Setzen von Stützpunkten jenseits der exakten Bahn, die mit einer Bahnverschleifung überfahren werden. Damit entfällt die ansonsten notwendige Richtungsumkehr des Drehkranzes in diesen Bereichen und die hohen dynamischen Anforderungen an alle Achsen reduzieren sich (Bild 6-19, Diagramm 2). Die entstehende lokale Defokussierung von 2 mm liegt innerhalb der zugelassenen Toleranz.



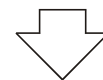
$v_{\text{Soll}}=5 \text{ m/min}$; x,y in mm; v in m/min



CAD-Modell des Bauteils



Bereichseinteilung



Es ist ein Schweißen mit nahezu konstanter Vorschubgeschwindigkeit möglich.

Bild 6-19: Anwendung des Lösungsalgorithmus zur Optimierung der Schweißbahn (BV=Bahnverschleifung)

Das bewusste Anstellen des Bearbeitungskopfes stellt eine wirkungsvolle Strategie dar, um beim Laserstrahlschweißen ein Absinken der Bahngeschwindigkeit an stark gekrümmten Konturbereichen zu vermeiden oder zumindest deutlich zu reduzieren (vergleiche Abschnitt 3.3.2). Während sich ein Anstellwinkel von 20° als zu gering erweist (Bild 6-19, Diagramm 3), ergibt sich ein gutes dynamisches Verhalten bei Wahl der Anstellwinkel zu 30° (Bild 6-19, Diagramm 4). In den Bereichen 5 und 6 ist für diese Anstellwinkel ein Abfallen der Bahngeschwindigkeit festzustellen, was aus einem zu kurzen Anstellweg resultiert. Die in den Bereichen 5 und 6 vorhandene Strecke von 25 mm im Nachlauf und Vorlauf reicht nicht aus, um die erforderliche Umorientierung des Bearbeitungskopfes von 30° bei einer vorgegebenen Soll-Bahngeschwindigkeit von 5 m/min abzuschließen.

Die für eine Drehung der A-Achse um einen Anstellweg α_A erforderliche Zeit t_{erf} lässt sich überschlägig aus der maximalen Drehgeschwindigkeit der A-Achse $\dot{\alpha}_{\text{max}}$ wie folgt abschätzen:

$$t_{\text{erf}} = \frac{\alpha_A}{\dot{\alpha}_{\text{max}}} \quad (13)$$

Der hierfür erforderliche Anstellweg l_{erf} folgt aus der vorgegebenen Soll-Vorschubgeschwindigkeit v_s .

$$l_{\text{erf}} = v_s t_{\text{erf}} \quad (14)$$

Mit einer maximalen Drehgeschwindigkeit der A-Achse von 3.600 °/min (10 U/min, siehe Tabelle 5-2) und einer Soll-Vorschubgeschwindigkeit von 5 m/min ergeben sich die in Tabelle 6-3 dargestellten minimalen Anstellwege.

| Anstellwinkel α_A | Anstellweg l_{erf} in mm |
|--------------------------|-----------------------------------|
| 15° | 20,8 |
| 20° | 27,8 |
| 30° | 41,7 |
| 45° | 62,5 |

Tabelle 6-3: Benötigter Anstellweg in Abhängigkeit vom Anstellwinkel für $v=5$ m/min

Steht dieser Anstellweg nicht zur Verfügung, so reduziert die Maschinensteuerung die Bahngeschwindigkeit, bis die Drehungen der A- und B-Achse abgeschlossen sind. Die programmierte Vorschubgeschwindigkeit entlang der Bearbeitungskontur kann damit nicht eingehalten werden (vergleiche [118]). Die übrigen Konturbereiche erweisen sich diesbezüglich als unkritisch. Systematische Versuche ergeben einen optimalen Anstellwinkel von 18° zu Anfang bzw. Ende der Abschnitte 5 und 6. Damit ist es möglich, die Bahngeschwindigkeit nahezu konstant auf einem Niveau von 5 m/min entlang der gesamten Werkstückkontur zu halten (Bild 6-19, Diagramm 6).

Da die systemtechnischen Voraussetzungen zur Ansteuerung des Lasers mit einer Rampenfunktion zum Zeitpunkt dieser Versuche nicht vorliegen, wird die Laserleistung an Nahtanfang und -ende über eine Stufenfunktion gesteuert, um einen ansonsten auftretenden Einbrand zu verhindern. Die Schweißstrategie ist in Bild 6-20 dargestellt.

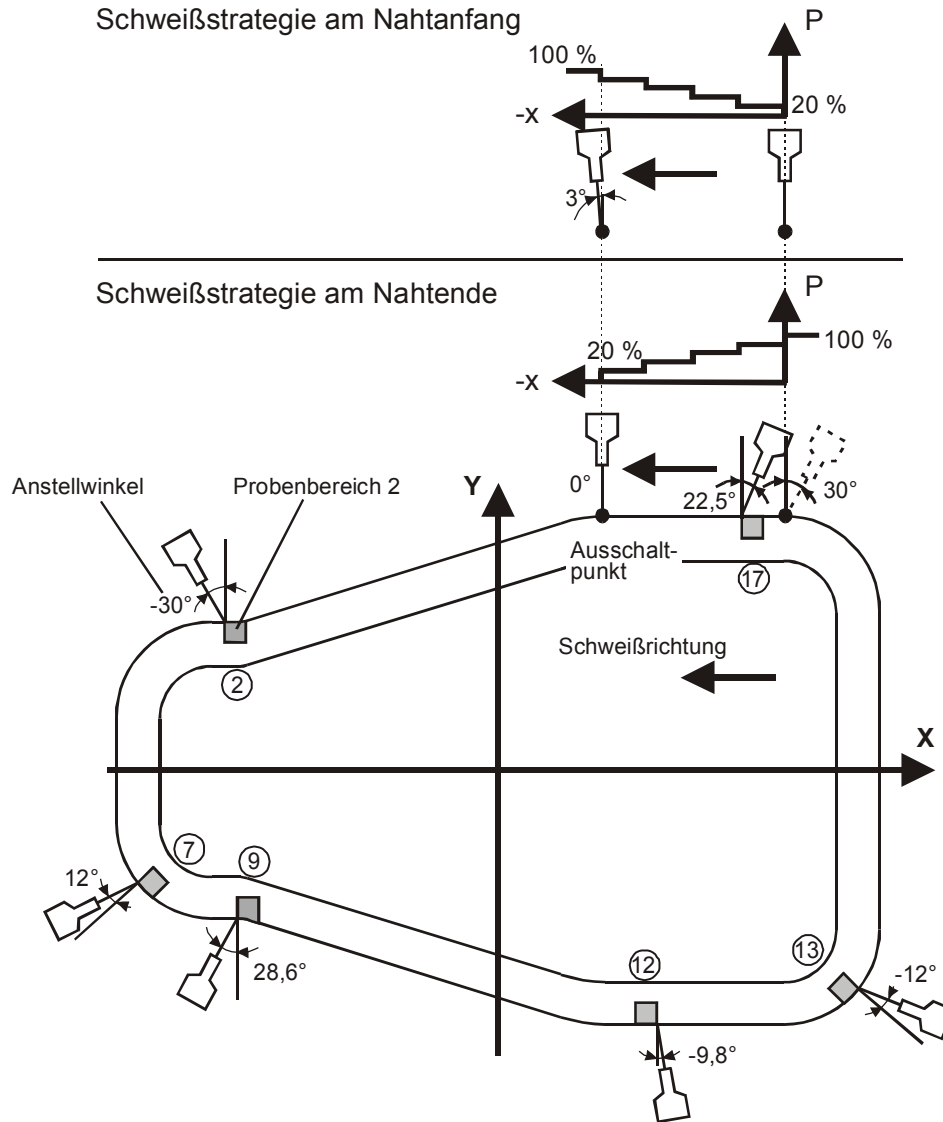


Bild 6-20: Schweißstrategie, Anstellwinkel und Probenbereiche

Zur Herstellung der nachfolgend untersuchten Bauteile wird die integrierte Prozesskette mit verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten vollständig durchlaufen. Die Eckdaten des IHU-Prozesses sind in Tabelle 6-4 dargestellt. Das Füllvolumen des Bauteils beträgt circa 3,6 l. Bild 6-21 zeigt die Bauteilgeometrie bzw. den Schnittabfall nach jedem Einzelprozess.

| | Max. Innendruck p in bar | Max. Niederhalter- kraft F_N in kN |
|-----------|-----------------------------|---|
| Vorformen | 216 | 800 |
| Ausformen | 322 | 3.000 |

Tabelle 6-4: Eckdaten des IHU-Prozesses

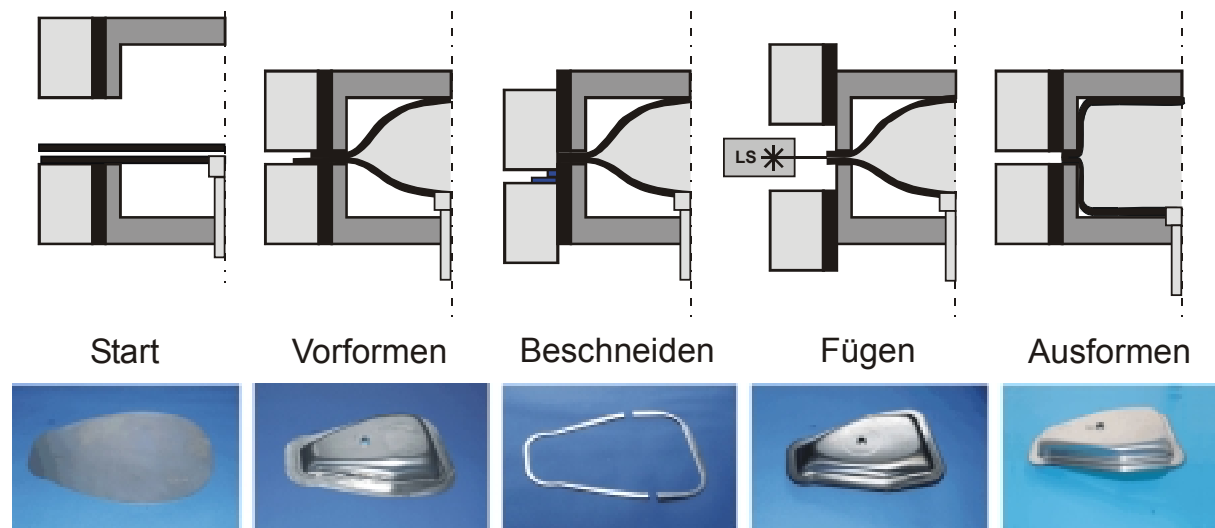


Bild 6-21: Integrierte Prozesskette mit Bauteilgeometrie bzw. Schnittabfall nach jedem Einzelprozess

Proben mit einer Breite von 10 mm werden aus dem Flansch in den relevanten Bereichen 2, 7, 9, 12, 13 und 17 durch Aussägen entnommen (zur Bereichseinteilung vergleiche Bild 6-20). In Schliffrufen und Zugversuchen werden Einschweißtiefe und maximale Zugkraft bestimmt. Bei den Versuchen sind im Vergleich zu den Modelluntersuchungen höhere Schwankungen der Einzelwerte infolge der größeren Anzahl an Einflussgrößen zu erwarten. So werden die Bereiche mit verschiedenen Anstellwinkeln geschweißt, das Bauteil erwärmt sich in Radien überproportional stark, das Werkzeug erwärmt sich im Laufe der Zeit, die Fokusslage ist nicht konstant und die Menge der Kontaminationen verändert sich stärker von Probe zu Probe. Weiterhin werden Proben in geradlinigen und in gebogenen Flanschabschnitten untersucht, was in unterschiedlichen Werten der Zugversuche resultieren kann. Die Schliffe aller Bereiche sind für ein Bauteil exemplarisch in Bild 6-24 dargestellt.

Die Versuche zeigen, dass sich eine gute Nahtqualität bei Vorschubgeschwindigkeiten von 3-4 m/min erzielen lässt. Der Schweißprozess dauert in diesem Fall circa 15-20 s. Die Dauer der gesamten Prozesskette hängt in großem Maße vom eingestellten Innendruck ab, der vom Hochdruckaggregat beim Vorformen und beim Ausformen aufgebaut werden muss, und beträgt je nach Umformgrad 90-180 s. Bei Vorschubgeschwindigkeiten unter 2 bis 2,5 m/min tritt die bereits in den Modelluntersuchungen beobachtete starke Spritzerbildung auf, die zu einer Schädigung der Werkzeugkanten und der Optik führen kann.

Die beste Nahtqualität ergibt sich bei $v=3$ m/min. Eine Serie von 6 mit diesen Parametern verschweißten Realbauteilen wird nachfolgend als Versuchsreihe 1 bezeichnet. Die gemessene Einschweißtiefe schwankt - abgesehen vom Bereich der Nahtüberlappung - von Bereich zu Bereich wie die maximale Zugkraft nur um maximal 20 % (vergleiche Bild 6-22). Im Bereich 17 (Nahtüberlappung) ist die Einschweißtiefe am geringsten. Dies jedoch wirkt sich nicht auf die Zugkraft aus.

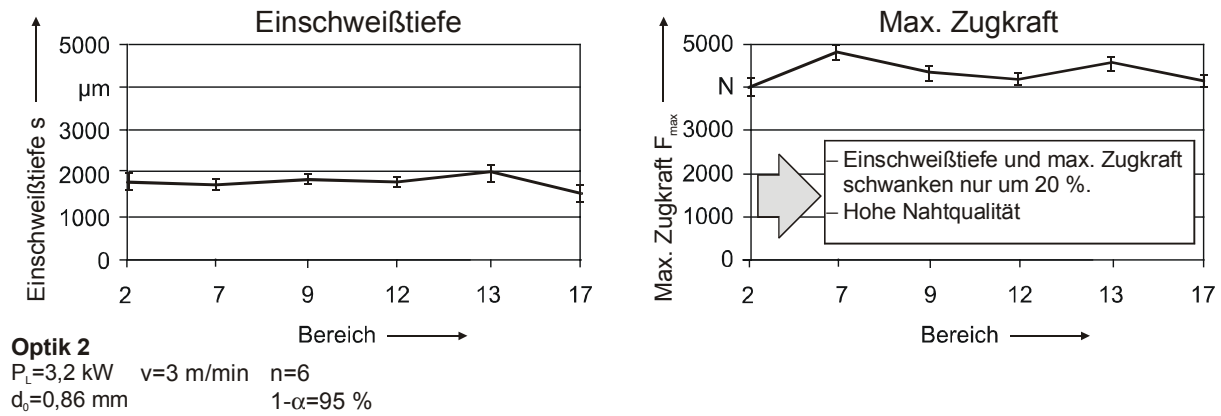


Bild 6-22: Einschweißtiefe und maximale Zugkraft der Versuchsreihe 1 (Schmierstoff VP 411). Zur Bereichseinteilung siehe Bild 6-20.

Das Versagen der Proben erfolgt in der Versuchsreihe 1 stets in der Wärmeeinflusszone und nicht in der Schweißnaht. Gelegentlich treten an der Nahtüberlappung Mikrolöcher auf, die eine vollständige Dichtheit der Naht verhindern. Grund sind lokale Ansammlungen des eingesetzten Schmierstoffs Oemeta VP 411 in Form größerer Tropfen. Die Fehlstellen sind mit dem bloßen Auge (Bild 6-23 und Bild 6-33 links) erkennbar. Röntgenuntersuchungen zeigen, dass es sich um Mikrolöcher handelt, die sich über die gesamte Einschweißtiefe der Naht erstrecken (Bild 6-23 rechts). Die Schweißnaht selbst ist in der Röntgenaufnahme nicht erkennbar. Da die Menge an IHU-Medium, die durch die Mikrolöcher entweicht, wesentlich geringer ist als die durch das Hochdruckaggregat zugeführte Menge, wirkt sich die Undichtigkeit nicht signifikant auf den Druckverlauf beim Ausformen und Kalibrieren aus.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass es sich beim Schweißen der Realbauteile im Werkzeug um einen robusten Prozess handelt, der durch eine optimierte Prozessführung trotz der dargestellten Schwankungen der Einflussgrößen reproduzierbare Ergebnisse liefert.

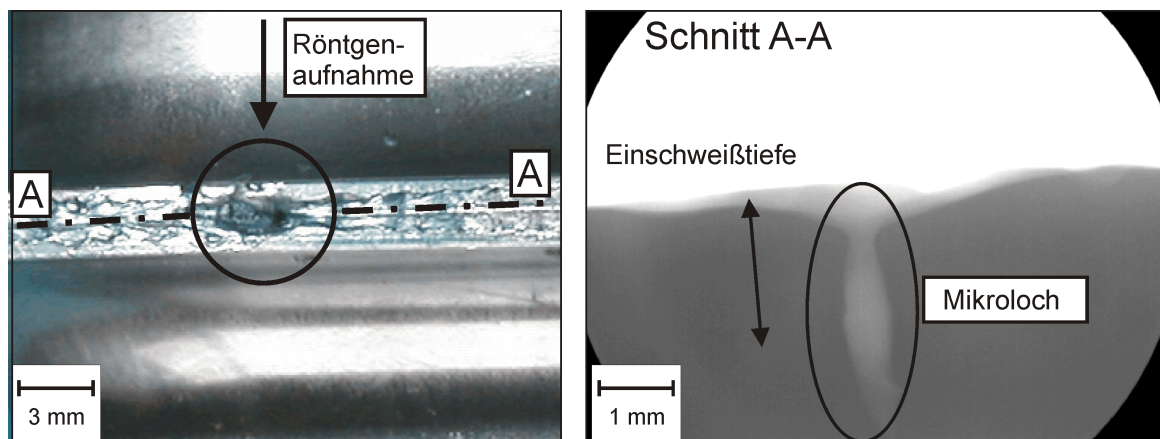
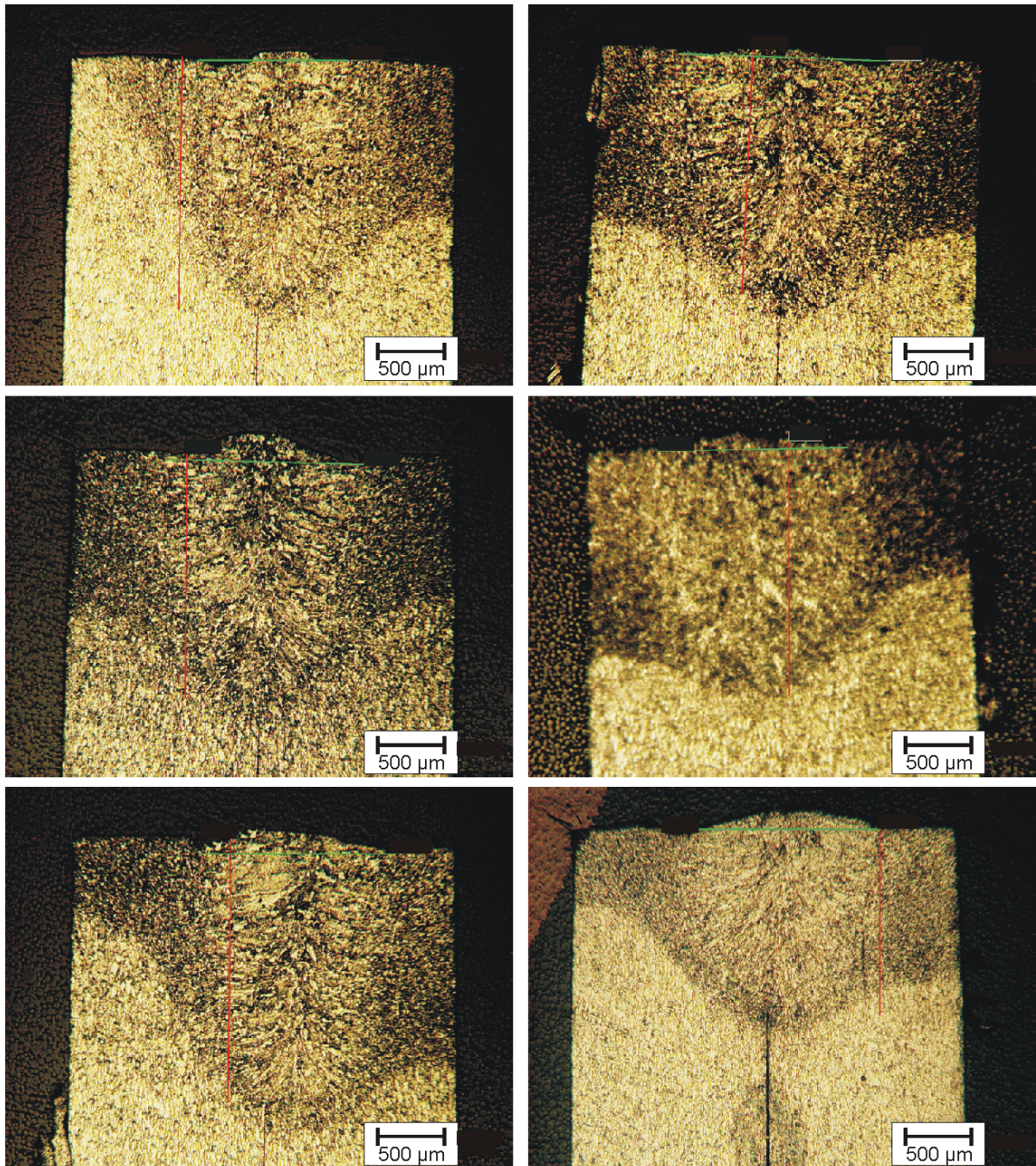


Bild 6-23: Mikroloch am Nahtanfang (Bereich 17, Versuchsreihe 1)
 Links: Foto aus Richtung der Flanschaußenseite
 Rechts: Röntgenaufnahme

**Optik 2** $P_L = 3,2 \text{ kW}$ $d_0 = 0,86 \text{ mm}$ $v = 3 \text{ m/min}$ **Bild 6-24:** Schliffbilder der Schweißnähte an Realbauteilen (Versuchsreihe 1)

Oben: Bereich 2, 7

Mitte: Bereich 9, 12

Unten: Bereich 13, 17

6.3.2 Dichtheit der Schweißnaht

Im Anforderungskatalog des integrierten Schweißroboters ist unter anderem festgelegt, dass eine umlaufende hochfeste Schweißnaht zu applizieren ist. Durch Anwendung der elaborierten Prozessführungsstrategien werden alle Anforderungen an den integrierten Fügeprozess erfüllt. Für Träger- und Strukturbauteile spielt die Dichtheit der Schweißnaht keine Rolle, da diese Teile oftmals über großflächige Durchbrüche verfügen. Um aber die Einsatzbereiche der integrierten Prozesskette im Hinblick auf geschlossene Hohlkörper (zum Beispiel Kraftstofftanks) zu erweitern, besteht im Anforderungskatalog der Wunsch nach einer durchgehend dichten Schweißnaht. Die Realisierbarkeit dieses Wunsches soll in der zweiten Phase der Optimierung geprüft werden.

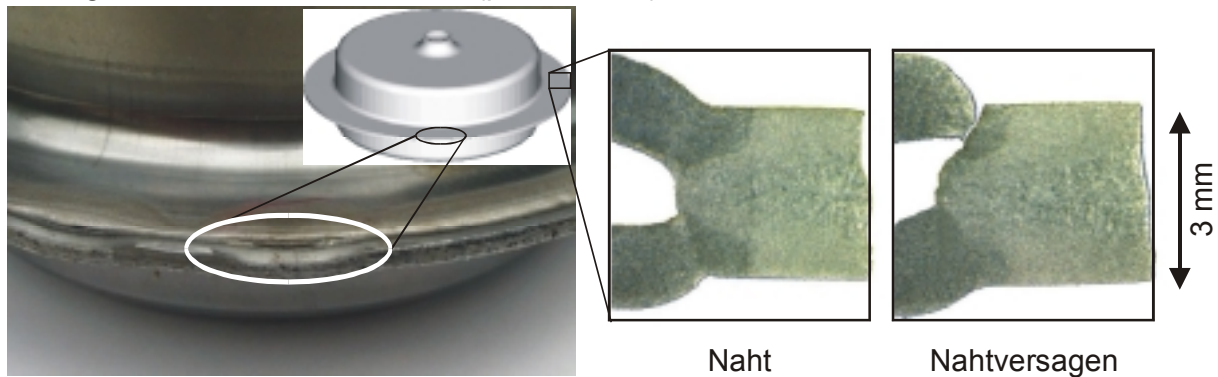
Berstversuche an Rondenpaaren (Modelluntersuchungen)

In Versuchen, die dieser Arbeit vorangingen, bestimmte Hein [4] das Umformverhalten verschweißter, ebener Rondenpaare in einem rotationssymmetrischen IHU-Werkzeug (vergleiche Bild 6-25 oben links). Dabei konnte eine Stirnflachnaht ohne Kontamination die Dichtheit des Hohlraumes bei Drücken bis zu 800 bar zuverlässig gewährleisten.

Im Rahmen der Modelluntersuchungen wird nun in Berstversuchen mit diesem rotationssymmetrischen Werkzeug geprüft, bis zu welchem Innendruck eine kontaminierte Stirnflachnaht belastet werden kann, um Anhaltswerte für den maximalen Innendruck beim Ausformen in der integrierten Prozesskette zu gewinnen. Dazu werden fünf Rondenpaare mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Blechdicke von 1,5 mm im IHU-Werkzeug vorgeformt (vergleiche Hein [4]), kontaminiert und auf einer Drehvorrichtung mit einer Geschwindigkeit von 3 m/min bei einer Nahtüberdeckung von 10 mm mit Optik 1 bei $P_L=3,9$ kW verschweißt. Die Rondenpaare werden anschließend im geschlossenen IHU-Werkzeug bis zum Bersten mit Innendruck beaufschlagt. Da abgesehen von der Schweißnaht die gesamte Außenkontur durch das Werkzeug abgestützt wird, wird der Blechwerkstoff nur auf Druck belastet und es ist von einem Versagen in der Schweißnaht oder in der Wärmeeinflusszone auszugehen.

Die Bauteile bersten in der Naht bei 1.100-1.400 bar. Bauteile, die bei einem Druck zwischen 1.100 und 1.200 bar versagen, zeigen kurze Risse von 5-8 mm, während Bauteile, die bei höherem Druck bersten, Risse von mehreren Zentimetern Länge aufweisen. Daraus ist abzuleiten, dass in ersterem Fall eine lokale Schwachstelle in der Naht zum Versagen führt, während in letzterem Fall die Nahtfestigkeit generell überschritten wird. Es ist anzumerken, dass die Durchführung von Berstversuchen nicht ungefährlich ist. Beim Bersten können Schutzvorrichtungen wie Sichtfenster an Schutztüren durch abgesprengte Teile der Naht oder durch den Strahl des IHU-Mediums durchschlagen werden. Deshalb wird der Versuchsumfang bewusst niedrig gehalten. Berstversuche in der integrierten Prozesskette werden vermieden, um eine Beschädigung des Fügeroboters zu vermeiden. Da die Naht in den Berstversuchen erst bei Drücken über 1.000 bar versagt, ist davon auszugehen, dass eine korrekt applizierte Schweißnaht in der integrierten Prozesskette trotz der dort verfügbaren geringeren Laserleistung von maximal 3,2 kW den maximalen Innendruck beim Ausformen von bis zu 322 bar (siehe Tabelle 6-4) ohne Versagen erträgt.

Versagen in lokaler Schwachstelle ($p=1.130 \text{ bar}$)



Versagen über großen Nahtbereich hinweg ($p=1.400 \text{ bar}$)

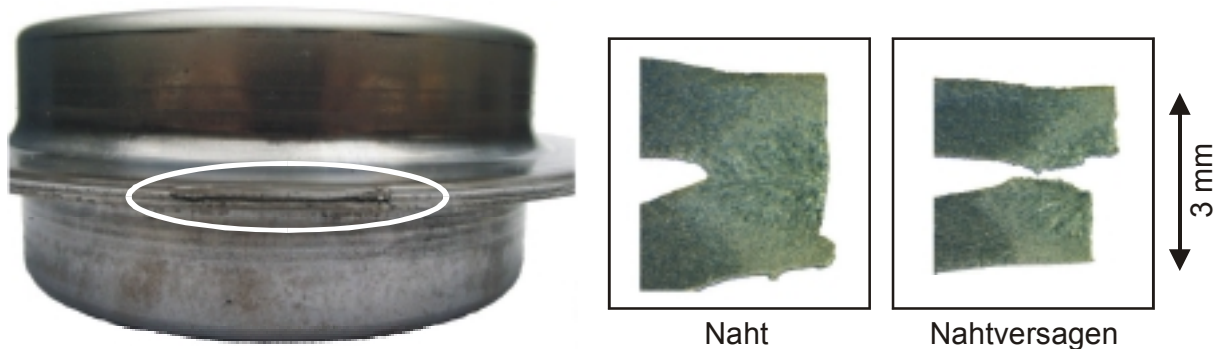


Bild 6-25: Berstversuche an Ronden (Modelluntersuchungen) und Versagensverhalten in Abhängigkeit des Innendrucks p

Integrierte Prozesskette

Während in der integrierten Prozesskette das IHU-Medium aufgrund seines hohen Wassergehalts von 95 % beim Schweißen rückstandsfrei und schnell genug vor Erstarren der Schmelze verdampft, treten beim Verschweißen der Blechplatinen, die mit Schmierstoff kontaminiert sind, während der Prozesskettendurchläufe gelegentlich die bereits in den Grundlagenuntersuchungen beobachteten Unregelmäßigkeiten in der Schweißnaht auf. Sie äußern sich in lokalen Mikroporen, die zu Undichtigkeiten der Bauteile beim abschließenden Ausformen führen können (vergleiche Bild 6-33 links).

Da diese Nahtfehler ausschließlich im Bereich der Nahtüberlappung und bei großen Schmiermitteltropfen auftreten, handelt es sich bei ihrer Entstehung nach Otto [5] um extrinsisch transiente Prozesse, die in [5] und [196] bereits eingehend untersucht wurden. Ursache für die Nahtfehler ist eine Kontraktion des Werkstoffs beim Erstarren. Da am Nahtende kein flüssiges Material mehr nachfließen kann, besteht die Gefahr der Entstehung von Rissen und Nahtfehlern. In Verbindung mit der vorliegenden Kontamination der Bleche mit Schmierstoff und IHU-Medium treten die beobachteten Undichtigkeiten auf.

Während des Schweißvorgangs verdampfen und zersetzen sich die Schmierstoffkomponenten im Bereich der Schweißstelle. Da bei der Stirnflachnaht keine Durchschweißung möglich ist, können die Gase und Schmiermittlrückstände nicht zur Nahtunterseite entweichen. Solange die Naht noch nicht geschlossen ist, können die Gase und Rückstände sowohl in den Spalt vor

der Naht als auch in Richtung der Flanschaußenseite ausgasen. Das Verhalten entspricht dem in Bild 6-15 links dargestellten Prozess. Bei geschlossener Naht kann ein Entgasen nur noch an der Flanschaußenseite stattfinden. In Schlifflinien sind in der Wärmeeinflusszone dunkle Punkte in einem koronaförmigen Bereich um die Naht erkennbar, bei denen es sich um Zersetzungsbestandteile des Schmiermediums handelt, die nicht rückstandsfrei verdampfen (Bild 6-26). Es besteht eine gewisse Ähnlichkeit zu den Schwierigkeiten beim Schweißen verzinkter Bleche, wobei die dort auftretenden Nahtfehler infolge mangelhafter Ausgasung des Zinkdampfes wesentlich problematischer sind [173], [197].

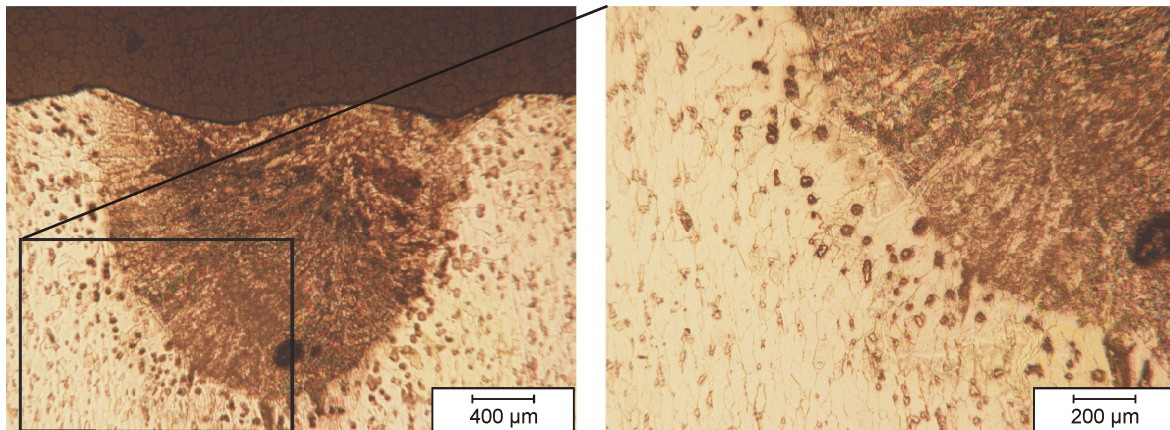


Bild 6-26: Zersetzungsbestandteile des Schmiermediums im Bereich eines Mikroloches bei 50facher (links) und 100facher Vergrößerung (rechts); Schmierstoff VP 411

Einfluss des Schmierstoffs auf die Dichtheit

Da mit dem bislang eingesetzten Hochleistungsschmierstoff Oemeta VP 411 die Prozesssicherheit für eine durchgängig dichte Naht nicht sicherzustellen ist, werden in einer systematischen Versuchsreihe insgesamt 12 verschiedene mittel- bis hochviskose Schmiermedien in einem Viskositätsbereich von 66-580 mm²/s in ihrer Schweißbeignung verglichen. Pro Schmierstoff werden je drei auf die Schnittkontur zugeschnittene ebene Blechpaare mit Schmierstoff kontaminiert und mit Hilfe des integrierten Schweißroboters mit $v=3$ m/min gefügt. Das Auftreten von Schweißspritzern wird in Bezug auf Schäden an der Bearbeitungsoptik kritisch begutachtet. Bei einigen Schmierstoffen ist bereits - trotz Einsatzes des Spritz- und Strahlenschutzes - nach 1-2 Schweißungen aufgrund starker Schweißspritzerbildung ein Schutzglastausch notwendig. Der Schweißprozess verläuft bei anderen Schmierstoffen ruhig. Die Naht weist allerdings mehrere Undichtigkeiten auf.

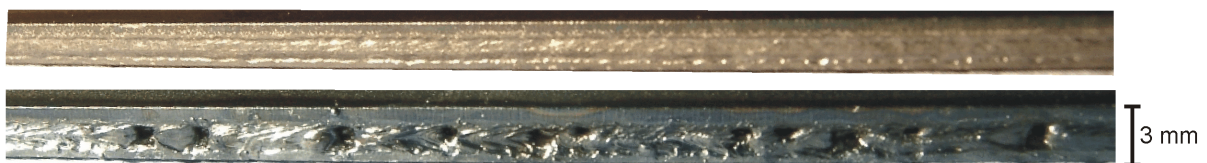


Bild 6-27: Optische Begutachtung der Schweißnaht
Oben: Sehr gute Naht
Unten: Sehr schlechte Naht

Ein einziges Schmiermedium (Zeller+Gmelin Multidraw KTL N16) erweist sich im Hinblick auf den deutlich ruhigeren Schweißprozess und das völlige Fehlen von Undichtigkeiten als sehr gut. Die Viskosität ist im Vergleich zu Oemeta VP 411 wesentlich niedriger (vergleiche Abschnitt 5.5). In Untersuchungen der Herstellerfirma Zeller+Gmelin ergibt sich eine sehr gute Verträglichkeit mit der Hydraulikflüssigkeit Oemeta HF-AS.

Bei einer freien Umformung mit Innenhochdruck ohne Werkzeug ist eine weit höhere Belastung der Naht bei geringen Drücken zu erwarten als bei der Umformung im IHU-Werkzeug. Bei einer Beaufschlagung der mit dem Schmierstoff KTL N16 verschweißten Probeteile mit einem Flüssigkeitsdruck von circa 7 bar aus einem Kühlkreislauf erweisen sich die Proben als dicht. Der Innendruck reicht bereits aus, um eine erhebliche plastische Umformung der Blechteile herbeizuführen (Bild 6-28). Trotz einer sehr starken Umformung und Belastung der Naht auf Zug - insbesondere in den Bereichen 2 und 3 - tritt kein Nahtversagen auf. Dies deckt sich mit Ergebnissen von Napfziehversuchen in Modelluntersuchungen (vergleiche Abschnitt 6.3.5).

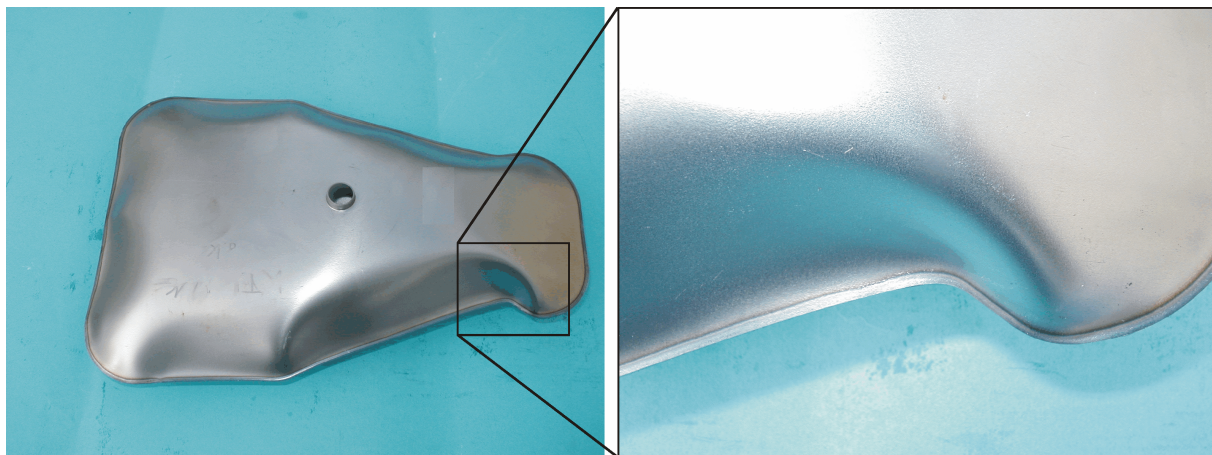


Bild 6-28: Umformung eines mit KTL N16 kontaminierten, zuvor ebenen Blechpaares (ohne Werkzeug, Innendruck p circa 7 bar)
Links: Gesamtansicht
Rechts: Detailansicht der Umformung in den Bereichen 2 und 3

Generell lässt sich ableiten, dass eine höhere Viskosität mit schlechterem Schweißverhalten und geringerer Nahtqualität einhergeht. Die im Schweißverhalten besseren, dünnflüssigeren Schmierstoffe sind oftmals für hohe Umformgrade beim IHU nicht geeignet, da sie bei der Umformung abgeschert werden können und dann ein direkter Kontakt zwischen den Blechen sowie zwischen Blech und Werkzeug vorliegt, der in einer höheren Reibung resultiert. Dies führt zu einem früheren Übergang von kombiniertem Tief- und Streckziehen zu reinem Streckziehen und damit zu einem früheren Versagen eines Bleches und zu einem geringeren Umformvermögen. Da eine Dichtheit der Naht nur in bestimmten Fällen notwendig ist, muss für jeden Einsatzfall zwischen der Optimierung der Prozesskette in Richtung maximale Umformbarkeit oder beste Schweißnahtqualität abgewogen werden. Ein Verzicht auf Schmierstoff führt zu unzureichenden Umformergebnissen.

6.3.3 Optimierung der Schweißstrategie und Detaillierung des Prozessfensters

Zur weiteren Verbesserung der Nahtqualität wird die Schweißbahn nochmals optimiert, um eine gleichmäßige Einschweißtiefe aller Bereiche und eine Dichtheit der Naht sicherzustellen. Als Schmierstoff wird Zeller+Gmelin KTL N16 verwendet, mit dem eine vollständige Dichtheit der Naht erreicht werden soll. Das IHU-Medium Oemeta HF-AS wird unverändert eingesetzt.

Der Bereich der Nahtüberlappung wird vom Außenradius 16 versetzt und sowohl am Nahtanfang als auch am Nahtende ohne Anstellwinkel geschweißt. Eine deutliche Verbesserung der Nahtqualität kann nach Otto [5] und [198] durch eine Steuerung der Laserleistung mit einer Rampenfunktion erreicht werden. Dies wird durch eine Erweiterung der Robotersteuerung ermöglicht. Da ein Aufschmelzen der Bleche erst ab circa 25 % der Laserleistung stattfindet (vergleiche hierzu das vorläufige Prozessfenster in Bild 6-17), wird eine Rampenfunktion mit Laserleistungen von 35 % bis 100 % programmiert. Bei wesentlich geringerer Startleistung besteht zudem die Gefahr eines nicht linearen, sondern schwingenden Anstiegs der Laserleistung bei einer vorgegebenen Rampe durch kurzzeitige Ausbildung einer thermischen Linse. Der Bereich der Nahtüberlappung wird auf 10 mm reduziert. Durch eine größere Nahtüberlappung lassen sich zwar im Bereich 17 die gleiche Einschweißtiefe und Zugfestigkeit erzielen wie in den anderen Bereichen (Bild 6-29 links), zur Verhinderung von Mikrolöchern erweist es sich aber als vorteilhaft, die Nahtüberlappung zu minimieren. Der Startpunkt der Einschalttrampe entspricht somit genau dem Startpunkt der Ausschalttrampe (Bild 6-29 rechts). Die Verringerung der Einschweißtiefe wird damit bewusst in Kauf genommen, um eine Dichtheit des Bauteils sicherzustellen. Im Bereich 13 wird die Laserleistung auf 95 % reduziert. In den anderen Bereichen wird mit der maximalen Leistung geschweißt.

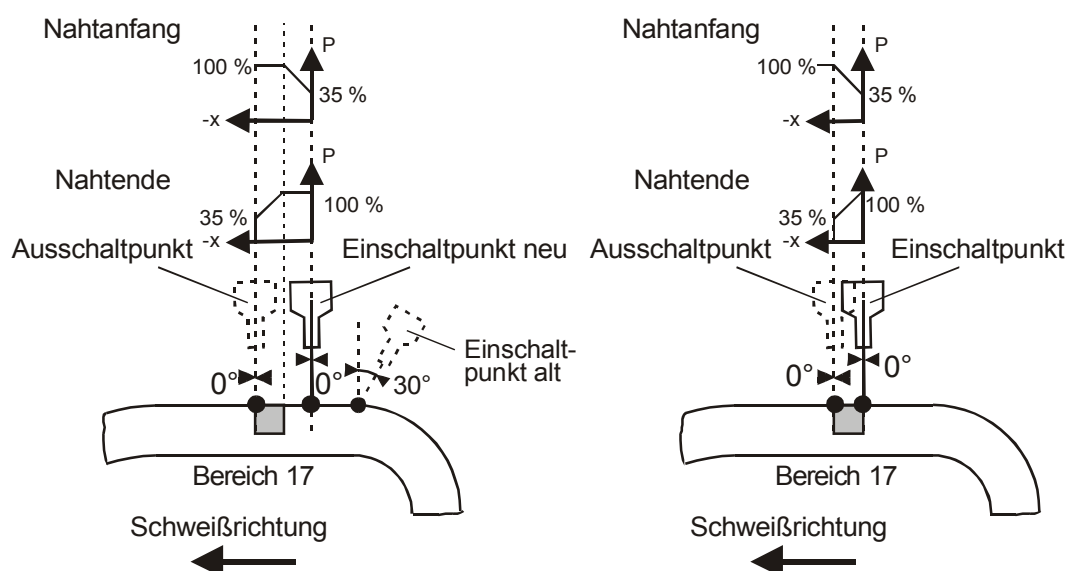


Bild 6-29: Schweißstrategien am Nahtanfang (Bereich 17; vergleiche Bild 6-20)
 Links: Gleichmäßige Einschweißtiefe durch größere Nahtüberlappung
 Rechts: Verhinderung von Mikrolöchern durch minimale Nahtüberlappung

Zur Detaillierung des Prozessfensters werden mit den dargestellten optimierten Parametern fünf Serien von Probeschweißungen mit je fünf ebenen Blechpaaren durchgeführt, die auf die

Realkontur zugeschnitten sind (Versuchsreihen 2-6). Die Parameter der Versuchsreihen sind in Tabelle 6-5 dargestellt.

| Reihe | v in m/min | P _L in kW | Schmierstoff | Proben | Dichtheit | Nahtqualität* |
|-------|------------|----------------------|--------------|--------------|-----------|---------------|
| 1 | 3 | 3,2 | VP 411 | Realbauteile | - | + |
| 2 | 3 | 2,9 | KTL N 16 | Blechpaar | + | + |
| 3 | 4 | 2,9 | KTL N 16 | Blechpaar | + | - |
| 4 | 4 | 3,2 | KTL N 16 | Blechpaar | + | + |
| 5 | 3 | 3,2 | KTL N 16 | Blechpaar | + | + |
| 6 | 5 | 3,2 | KTL N 16 | Blechpaar | + | - |

Tabelle 6-5: Parameter der Versuchsreihen

(* in Bezug auf gleichmäßig hohe Einschweißtiefe und maximale Zugkraft)

Es zeigt sich, dass bei Geschwindigkeiten von 3 m/min sowohl bei einer Laserleistung von 90 % als auch von 100 % sehr gute Werte für Einschweißtiefe und Nahtfestigkeit zu erzielen sind. Bei einer Geschwindigkeit von 4 m/min ist demgegenüber eine Laserleistung von 90 % nicht mehr ausreichend, sondern es muss mit der maximalen Leistung geschweißt werden. Bei Geschwindigkeiten von 5 m/min lassen sich keine ausreichend hohen Nahtqualitäten mehr erzielen. Mit den gewonnenen Daten kann das Prozessfenster weiter ergänzt werden (Bild 6-32). Stichprobenversuche mit P_L=2,3 kW und v=2 m/min liefern ebenfalls gute Nahtqualitäten.

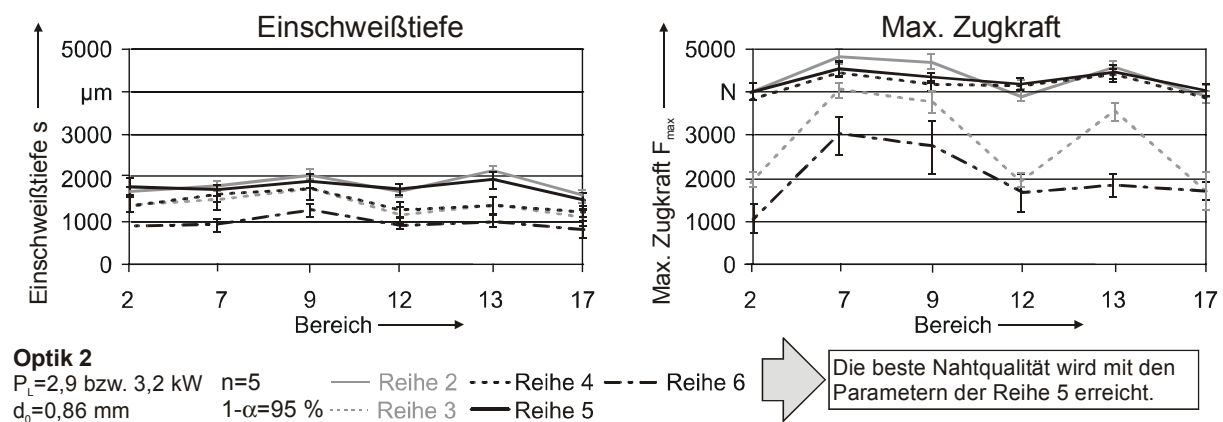
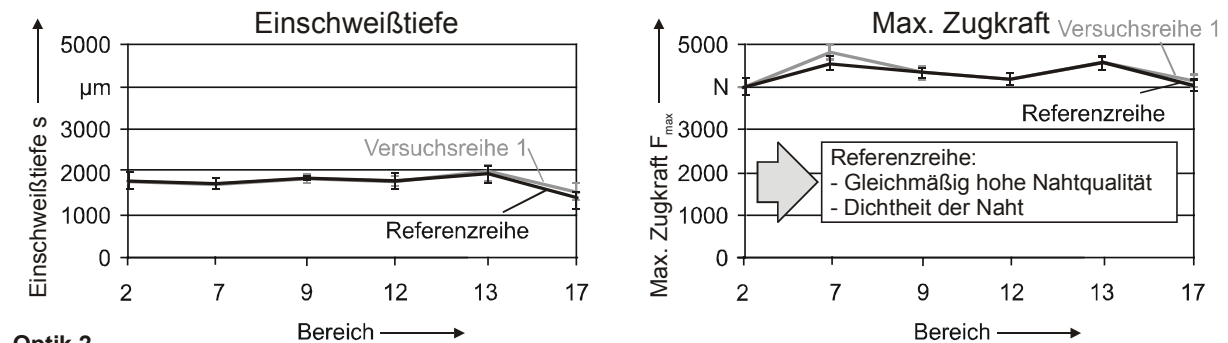


Bild 6-30: Einschweißtiefe s und maximale Zugkraft F_{\max} von fünf Versuchsreihen (Probeschweißungen ebener Blechpaare, Schmierstoff KTL N 16). Zur Bereichseinteilung siehe Bild 6-20.

6.3.4 Referenzreihe

Die optimalen Parameter im Hinblick auf gleichmäßig hohe Werte für Einschweißtiefe und Zugkraft liefert die in Tabelle 6-5 dargestellte Versuchsreihe 5. Mit den dargestellten optimierten Schweißparametern der Versuchsreihe 5, dem Schmierstoff KTL N16 und den Eckdaten des Umformens aus Tabelle 6-4 wird eine Referenzreihe von Bauteilen hergestellt, indem die Prozesskette vollständig durchlaufen wird. Wie Bild 6-31 zeigt, variieren Einschweißtiefe und maximale Zugkraft über die untersuchten Bereiche nur noch um maximal 12 % (abgesehen vom Nahtanfang in Bereich 17, bei dem eine Verringerung der

Einschweißtiefe in Kauf genommen wird, um die Dichtheit zu garantieren). Ein Nahtversagen findet stets in der Wärmeeinflusszone statt.



Optik 2

$P_L=3,2$ kW $v=3$ m/min $n=4$
 $d_0=0,86$ mm $1-\alpha=95$ %

Bild 6-31: Einschweißtiefe s und maximale Zugkraft F_{\max} der Referenzreihe im Vergleich zur Versuchsreihe 1. Zur Bereichseinteilung siehe Bild 6-20. (Schmierstoff KTL N 16)

Die Referenzreihe weist keine Undichtigkeiten mehr auf (vergleiche Bild 6-33 rechts). Vergleicht man sie mit Versuchsreihe 1 (Bild 6-31), so ist zu erkennen, dass sich die Änderung des Schmierstoffes nicht signifikant auf Einschweißtiefe und maximale Zugkraft auswirkt. Einschweißtiefe und Zugkraft sind in Bereich 17 durch die minimale Nahtüberlappung mit reduzierter Einschweißtiefe geringer. Dieser Abfall ist tolerierbar.

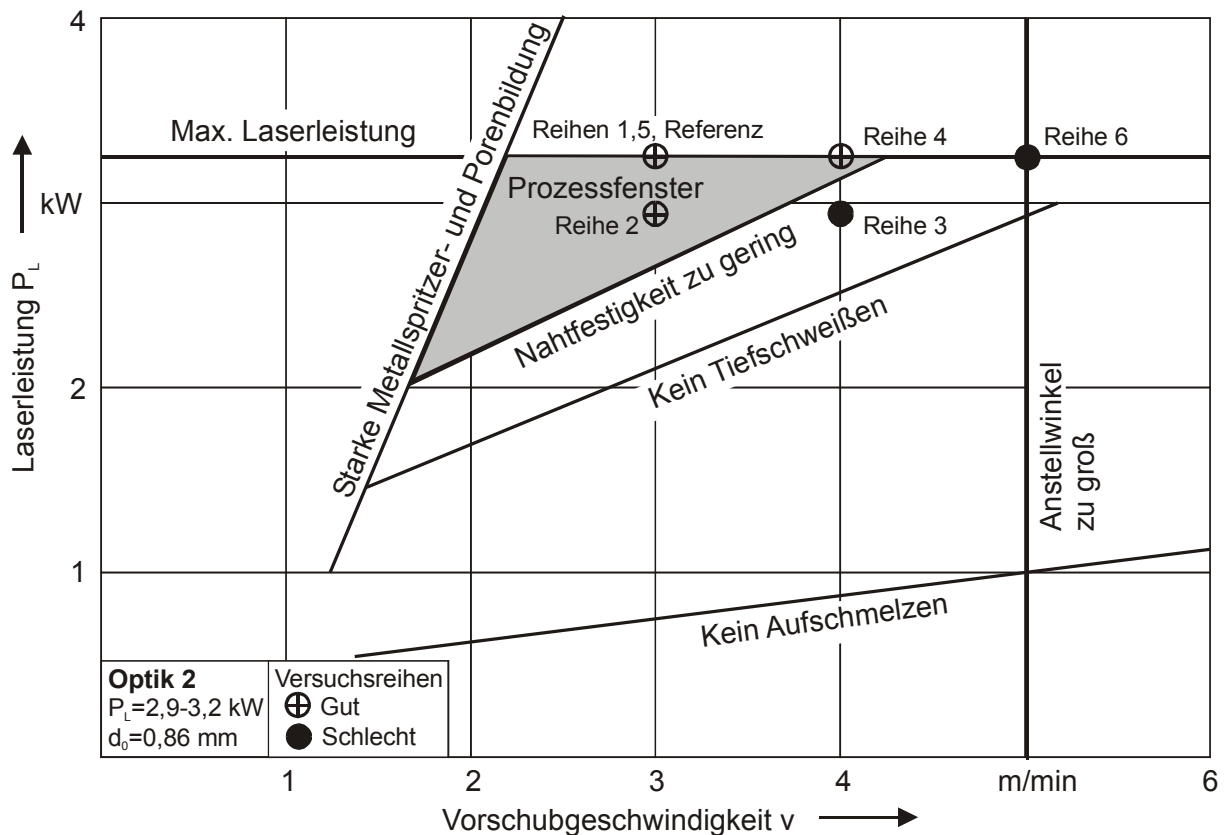


Bild 6-32: Ergänzung des Prozessfensters mit den Versuchsreihen 2-5 und der Referenzreihe (vergleiche Bild 6-3 und Bild 6-17)

Zum Vergleich der Nähte zeigt Bild 6-33 links eine sehr schlechte, undichte Nahtüberlappung an einem Bauteil der Versuchsreihe 1, bei der die Nahtüberlappung mit einer Treppenfunktion zur Steuerung der Laserleistung geschweißt ist und der Schmierstoff Oemeta VP 411 zum Einsatz kommt. Im Gegensatz dazu ist die rechts abgebildete Nahtüberlappung eines Bauteils der Referenzreihe als sehr gut zu bewerten.

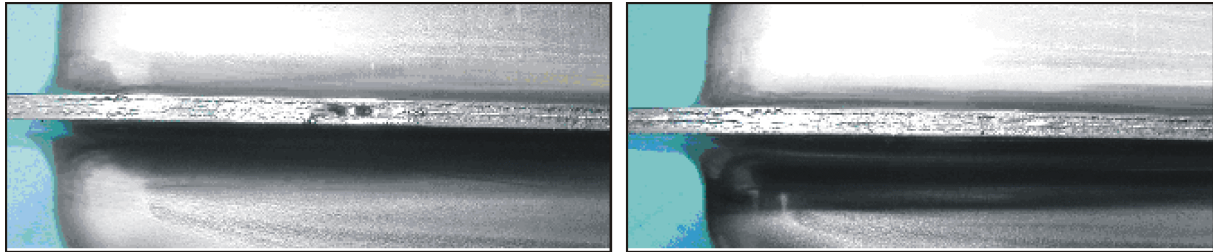


Bild 6-33: Links: Schlechte, undichte Nahtüberlappung (Versuchsreihe 1)
Rechts: Sehr gute, dichte Nahtüberlappung (Referenzreihe)

Eine vollständige Röntgenrobinstrukturuntersuchung der gesamten Flanschlänge aller Proben der Referenzreihe zeigt keine messbaren Poren mehr in den Bereichen 1-16. Gelegentlich treten noch Mikroporen an der Nahtüberlappung im Bereich 17 auf (Bild 6-34 links). Die Bauteile weisen allerdings keine Undichtigkeiten mehr auf. Röntgenaufnahmen (Bild 6-34 rechts) zeigen, dass die Poren wesentlich kleiner sind als die Einschweißtiefe und sie die Dichtheit damit nicht beeinflussen.

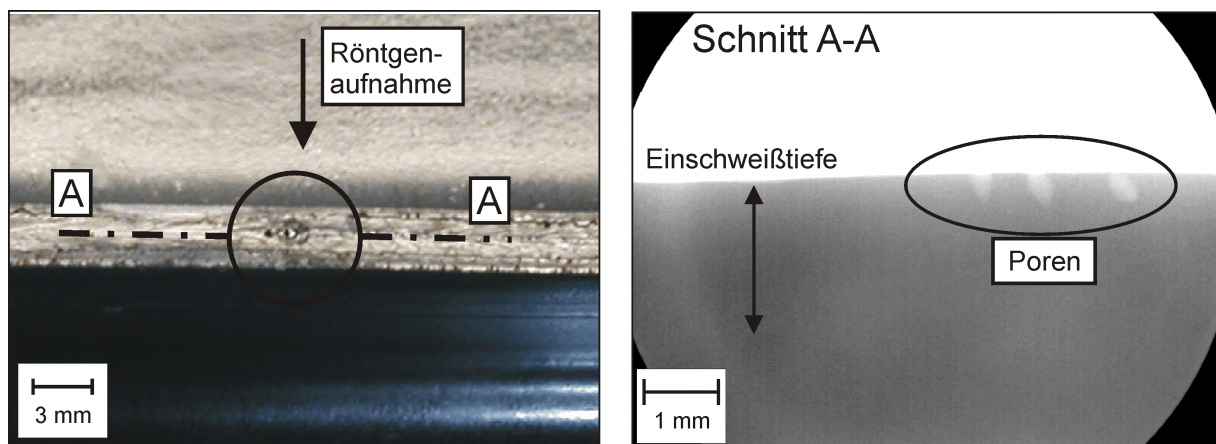


Bild 6-34: Mikroporen am Nahtanfang (Referenzreihe ohne Undichtigkeiten; vergleiche Bild 6-23)
Links: Foto aus Richtung der Flanschaußenseite
Rechts: Röntgenaufnahme von oben

Härteverlauf

Die Härte kann als Kennwert für die Umformbarkeit einer Naht dienen, da hohe Härtewerte meist mit einer Versprödung und damit einer Verringerung des Umformvermögens einhergehen. Deshalb werden Härtemessungen an Schliften der Referenzreihe mit einem Härtemessgerät Leco M400 nach Vickers durchgeführt. Die Prüflast beträgt 1 N und die Einpressdauer 15 s. Die Härtemessungen der untersuchten Bereiche sind in Bild 6-35 dargestellt. Die Grenzen zwischen den Werkstoffbereichen können im geätzten Schliff anhand

einer anderen Farbe, Korngröße und Kornart unterschieden werden und sind in Bild 6-35 zusätzlich eingezeichnet. Meist ist keine exakte Festlegung der Grenzen möglich, sondern es müssen Übergangsbereiche definiert werden. Die Härte­werte aller Bereiche streuen nur leicht. Lediglich der Werkstoffbereich der Nahtüberlappung zeigt infolge der geringeren Energieeinbringung eine niedrigere Härte. Die Härte des Grundwerkstoffes beträgt nach Literaturangaben 100-120 HV [191]. Ausgehend von der gemessenen Härte des Grundwerkstoffes mit circa 100 HV steigt die Härte im Nahtmittelpunkt auf bis zu circa 200 HV an. An der Nahtüberlappung ist die Härte infolge der geringeren Energieeinbringung geringer und liegt nur bei maximal circa 180 HV.

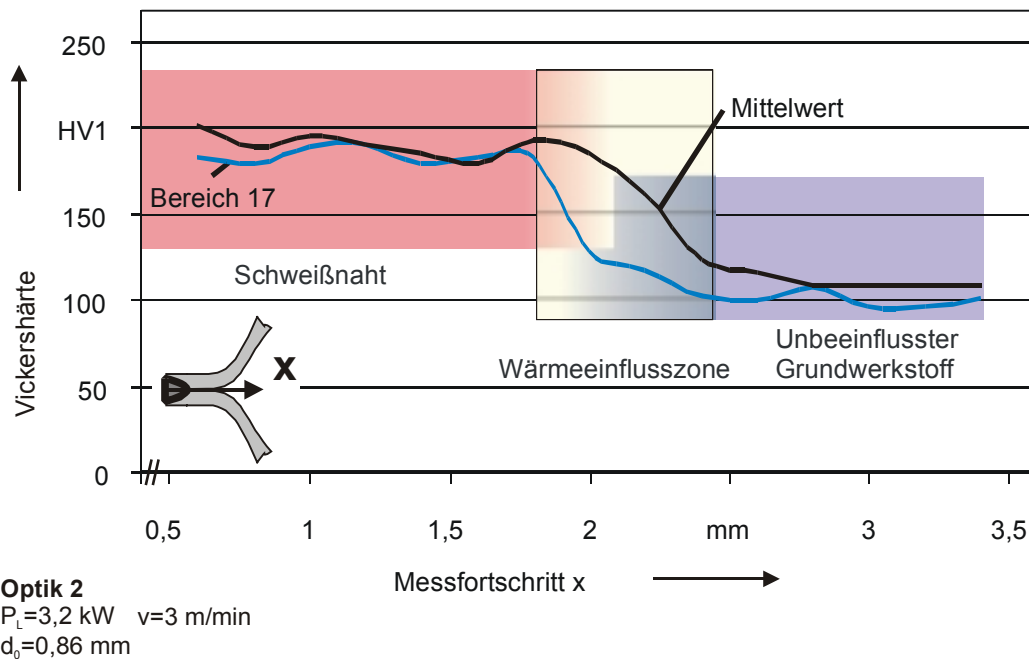


Bild 6-35: Übersicht über die Härteverläufe der Referenzreihe: Mittelwert (Bereiche 2, 7, 9, 12, 13) und Bereich 17 (Nahtüberlappung). Zur Bereichseinteilung siehe Bild 6-20.

Ein Vergleich der Härteverläufe mit Messungen der Modelluntersuchungen (Bild 6-36) zeigt ähnliche Werte für die verschiedenen Werkstoffbereiche und damit eine gute Übertragbarkeit. Die Aufhärtung erstreckt sich infolge der breiteren und tieferen Schweißnaht über einen größeren Bereich. Eine schleppend geschweißte Naht weist eine Aufhärtung sowohl im Nahtbereich als auch in der Wärmeeinflusszone auf, während sich bei den anderen Proben die Aufhärtung im Wesentlichen auf die Schweißnaht beschränkt. Die maximalen Härte­werte liegen für beide Proben bei circa 200 HV. Die größere Härte des Grundwerkstoffes ist auf die Verwendung einer anderen Blechcharge zurückzuführen.

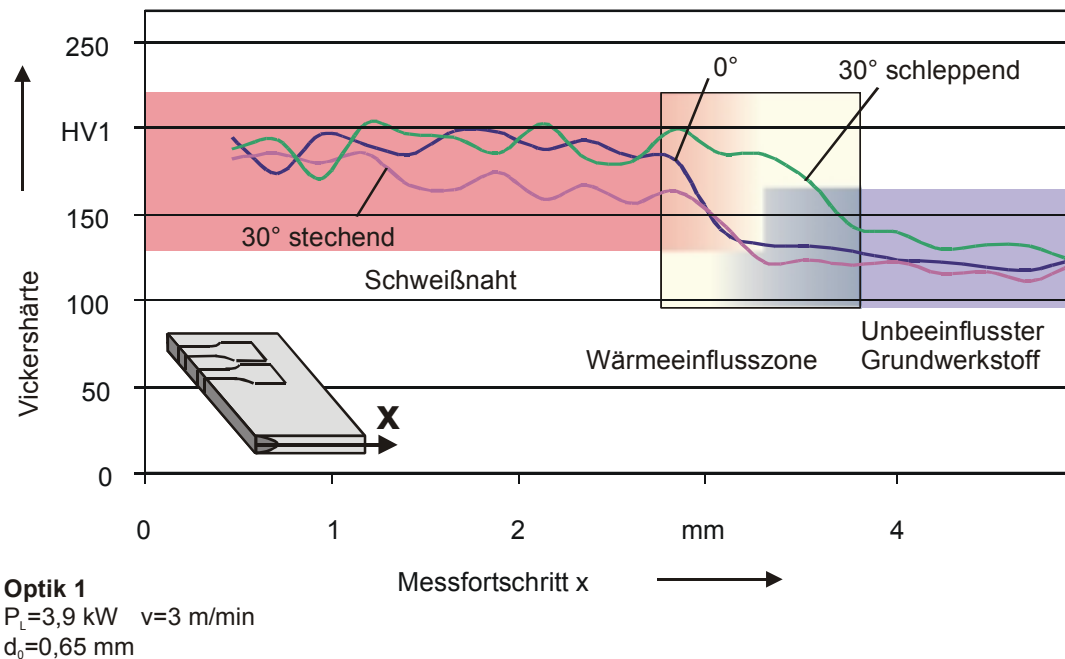


Bild 6-36: Exemplarische Übersicht über die Härteverläufe (Modelluntersuchungen)

Die ermittelten Härtewerte für die Schweißnaht lassen keine signifikante Verschlechterung des Umformverhaltens der Naht gegenüber dem Grundwerkstoff erwarten. Dieses Ergebnis wird in den nachfolgenden Umformversuchen auf seine Gültigkeit hin überprüft.

6.3.5 Umformbarkeit der Schweißnaht

Da ein Flansch- und Nahteinzug in der integrierten Prozesskette nach dem Schweißen erwünscht sein kann, wird das Umformverhalten der Naht untersucht. Dazu wird zunächst in Modelluntersuchungen eine sehr hohe Umformung realisiert, um anschließend das Umformverhalten der Naht in der integrierten Prozesskette bei wesentlich geringerer Umformung zu qualifizieren. In den Modelluntersuchungen werden Rondenpaare aus DC04 mit einem Durchmesser von 100 mm in der Blechdicke 0,88 mm sowie 1 mm mit Optik 1 gefügt und in einem Napfziehversuch nach Swift (vergleiche Lange [13]) mit einem vorhandenen Tiefziehwerkzeug umgeformt (Bild 6-37). Ziel ist die Gewinnung von Erkenntnissen auf folgenden Gebieten:

- Einfluss der Stirnflachnaht auf die Umformkraft
- Verhalten der Naht bei Einzug, Umformung und Verkürzung
- Einfluss der Naht auf den notwendigen Ziehspalt beim Einziehen zwischen Niederhalter und Gegenhalter

Aufgrund der geringen Blechdicke kann beim Schweißen der Proberonden nicht mit der maximalen Laserleistung, sondern lediglich mit maximal 1.600 W gearbeitet werden. Bei höheren Leistungen beschränkt sich das Aufschmelzen des Werkstoffs nicht auf die gewünschte Nahtzone, sondern beide Ronden schmelzen über die gesamte Blechdicke am Flansch auf. Die minimale Laserleistung muss 1.000 W betragen, um Schmierstoff und IHU-Medium weitgehend zu verdampfen (vergleiche Abschnitt 6.2).

Zum Tiefziehen der Rondenpaare kommt ein Werkzeug mit einem Stempel mit 50 mm Außendurchmesser und eine Matrice mit 54,6 mm Innendurchmesser zum Einsatz. Daraus resultiert ein Ziehspalt von 2,3 mm. Vor dem Umformen werden die verschweißten Rondenpaare mit dem Schmierstoff Oemeta IHV 36 benetzt, um die entstehende Reibung zu minimieren. Zusätzlich werden Versuche mit Einzelronden und unverschweißten Rondenpaaren durchgeführt.

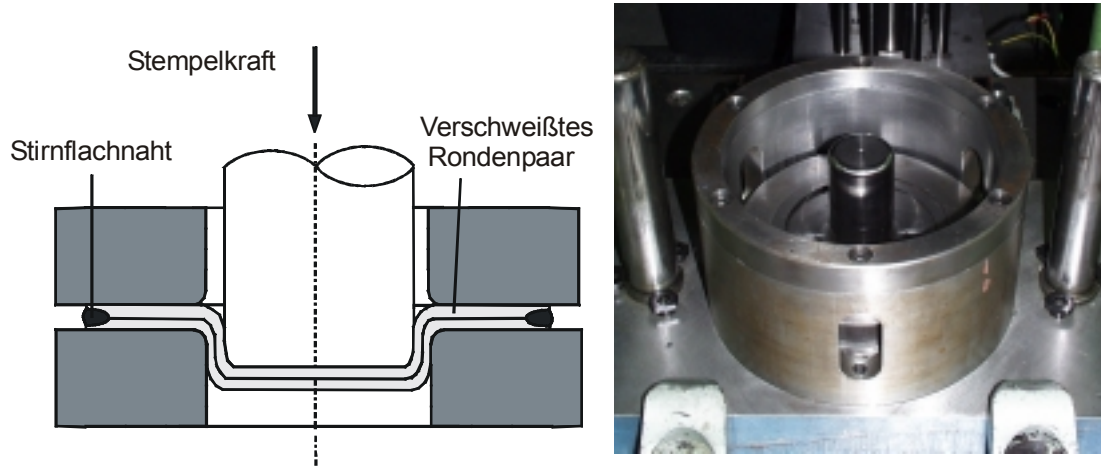


Bild 6-37: Tiefziehwerkzeug für Napfziehversuch

Während des Tiefziehvorgangs werden Zeit, Stempelweg und Ziehkraft aufgenommen. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Kraftverläufen für die verschiedenen Laserleistungen P_L von 1.000, 1.200 und 1.400 W ist nicht festzustellen. Der Unterschied im Kraftverlauf zwischen verschweißten und unverschweißten Rondenpaaren ist minimal. Lediglich im letzten Bereich der Kraft-Weg-Kurve zeigen die geschweißten Näpfe einen leichten Anstieg im Kraftverlauf (Bild 6-38). In diesem Bereich wird die Schweißnaht eingezogen und umgeformt. Ein Einzelblech erfordert bei der Umformung in etwa die halbe Umformkraft.

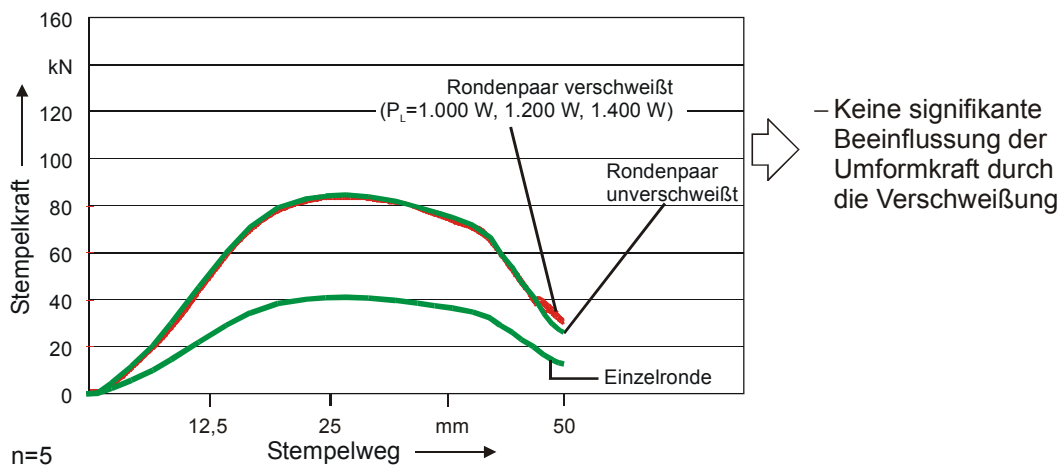


Bild 6-38: Verlauf der Umformkraft über den Stempelweg für verschweißte und unverschweißte Rondenpaare sowie für Einzelronden

Bei unverschweißten Rondenpaaren schieben sich äußere und innere Schale abwechselnd übereinander. Die Verschiebung der Bleche liegt in der Zipfelbildung beim Tiefziehen und in der Reibung zwischen den Blechen begründet und tritt bei verschweißten Rondenpaaren nicht auf. Während der Ausgangsdurchmesser der hier verwendeten Ronden bei 100 mm liegt, beträgt der Durchmesser der Näpfe nur noch 50 mm, was in einer Verkürzung der Nahtlänge

von circa 50 % resultiert. Bei den Näpfen sind Nahtfehler nach dem Umformen nur bei unzureichend verschweißten Rondenpaaren festzustellen. So führt beispielsweise ein nicht ausreichend überschweißter Nahtanfang zu lokalen Verwerfungen, die bei optischer Begutachtung wie auch in einer Röntgengrobstrukturanalyse deutlich erkennbar sind (Bild 6-39). Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Naht sehr große Umformungen ohne Versagen erträgt. Ein Flanscheinzug in der integrierten Prozesskette kann damit zugelassen werden.

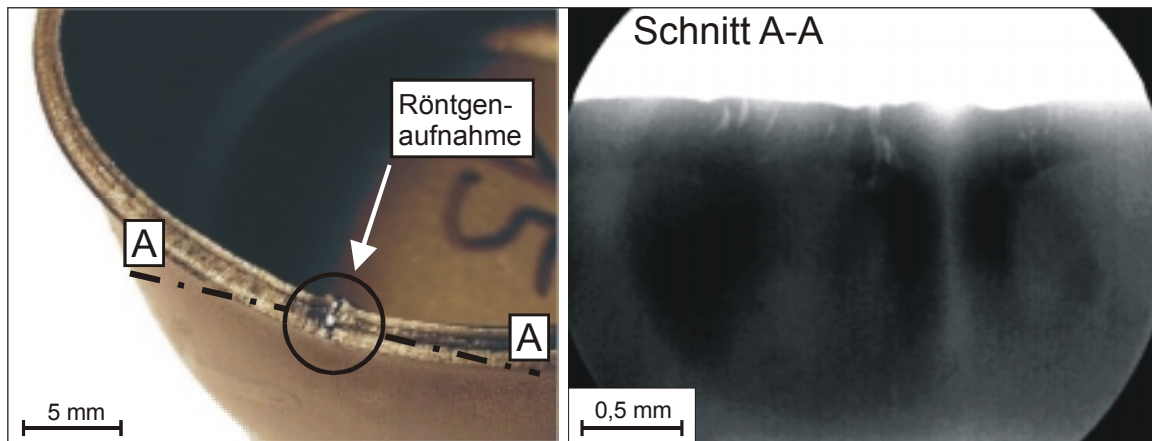


Bild 6-39: Oberkante der Näpfe
 Links: Nahtüberlappung an einem Rondenpaar
 Rechts: Röntgenbild der Nahtüberlappung

In der integrierten Prozesskette ist der maximal erreichbare Flanscheinzug wesentlich geringer. Er lässt sich durch Reduzierung der Niederhalterkraft beim Ausformen auf 1.750 kN erreichen (vergleiche Tabelle 6-4). Bild 6-40 vermittelt einen Eindruck über den erreichbaren Einzug. Aufgrund der Fließbehinderungen findet nur ein geringer Einzug des Flansches an den Bauteilecken statt und der Einzug beschränkt sich weitgehend auf die geraden Flanschabschnitte. Der maximale Einzug E_B liegt an der Grenze zwischen Bereich 14 und 15 und beträgt dort 12,1 mm. Schlitze, Zugversuche und eine Röntgengrobstrukturuntersuchung der Bereiche 14 und 15 zeigen keinerlei Schädigung der Naht. Dies korreliert mit den Untersuchungen zum freien Aufweiten des Bauteils (Abschnitt 6.3.2) und den Napfziehversuchen der Modelluntersuchungen, bei denen trotz erheblicher Zugbelastung und Umformung der Naht kein Nahtversagen auftritt.

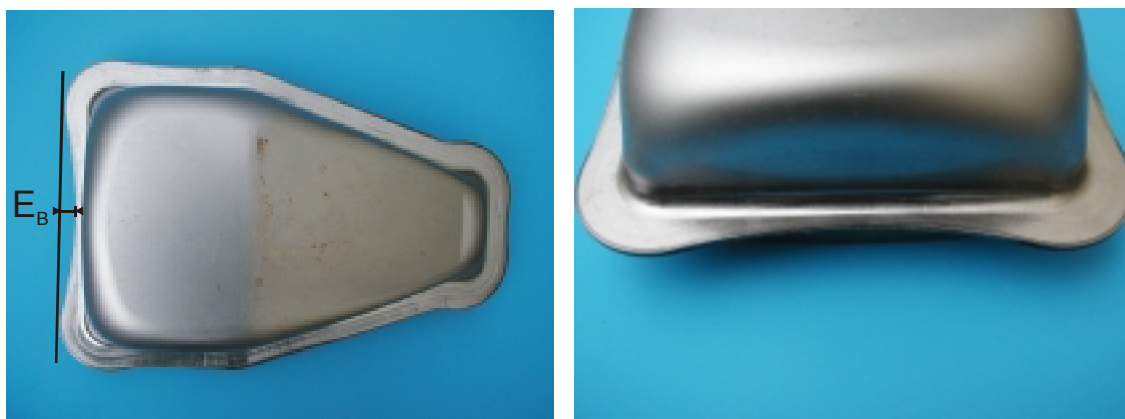


Bild 6-40: Bauteil mit maximalem Flanscheinzug E_B

6.4 Zusammenfassung

Mit den dargestellten Optimierungsmethoden werden sämtliche Anforderungen und Wünsche der Anforderungsliste für den integrierten Fügeboter erfüllt. Beim Schweißen im Umformwerkzeug handelt es sich um einen robusten Prozess mit reproduzierbaren Ergebnissen. Zur Realisierung eines optimalen Fügeprozesses lassen sich folgende Strategien ableiten:

- Die Vorschubgeschwindigkeit muss so hoch gewählt werden, dass eine starke Metallspritzerbildung vermieden wird, die zu Schäden an Werkzeug und Optik führen kann.
- Die Vorschubgeschwindigkeit muss so niedrig sein, dass eine ausreichende Einschweißtiefe und Zugkraft erzielt werden können.
- Die Vorschubgeschwindigkeit soll möglichst konstant sein. Dies lässt sich durch Anwendung von Bahnplanungsstrategien wie Bahnverschleifung, Zulassen eines Anstellwinkels und Regelung der Laserleistung erreichen.
- Die Laserleistung soll möglichst hoch gewählt werden, um das Verdampfen der Kontaminationen zu fördern.
- An Nahtanfang und -ende ist eine Rampenfunktion zur Regelung der Laserleistung zu implementieren. Zur Minimierung von Poren ist der Bereich der Nahtüberlappung klein zu halten.
- Nahtfehler in Form von Mikrolöchern und Poren lassen sich meist mit dem bloßen Auge und mit sehr hoher Sicherheit in Röntgenaufnahmen detektieren.
- Zur Minimierung von Poren und Mikrolöchern ist ein möglichst niedrigviskoses und wenig temperaturbeständiges Schmiermedium einzusetzen, das beim Schweißen schnell und rückstandsfrei verdampfen kann. Dabei ist auf eine ausreichende Belüftung bzw. Absaugung zu achten.
- Ein Flanscheinzug mit Nahtumformung kann beim Umformen ohne Schädigung der Naht zugelassen werden. In Modelluntersuchungen zeigt sich, dass die Naht ohne Versagen bis zu 50 % verkürzt werden kann.

Bild 6-41 zeigt das endgültige Prozessfenster für den integrierten Fügeprozess. Die optimalen Parameter im Hinblick auf Einschweißtiefe, maximale Zugkraft, Schweißspritzer, Taktzeit und dynamisches Verhalten des Roboters liegen bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 3 m/min und maximaler Laserleistung. Nachfolgend werden die eingezeichneten Grenzen erläutert.

Maximale Laserleistung

Unabhängig von eingesetzter Optik und Führungsmaschine stellt die maximale Laserleistung eine obere Grenze für das Prozessfenster dar.

Metallspritzer- und Porenbildung

Bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten erhöht sich die Dynamik des Keyholes stark. Durch die Verwirbelungen werden mehr Gase und Kontaminationen in die Schmelze eingebracht. Die Folge ist eine starke Porenbildung in der Naht sowie eine starke Metallspritzerbildung, die optische Komponenten oder das Umformwerkzeug schädigen können.

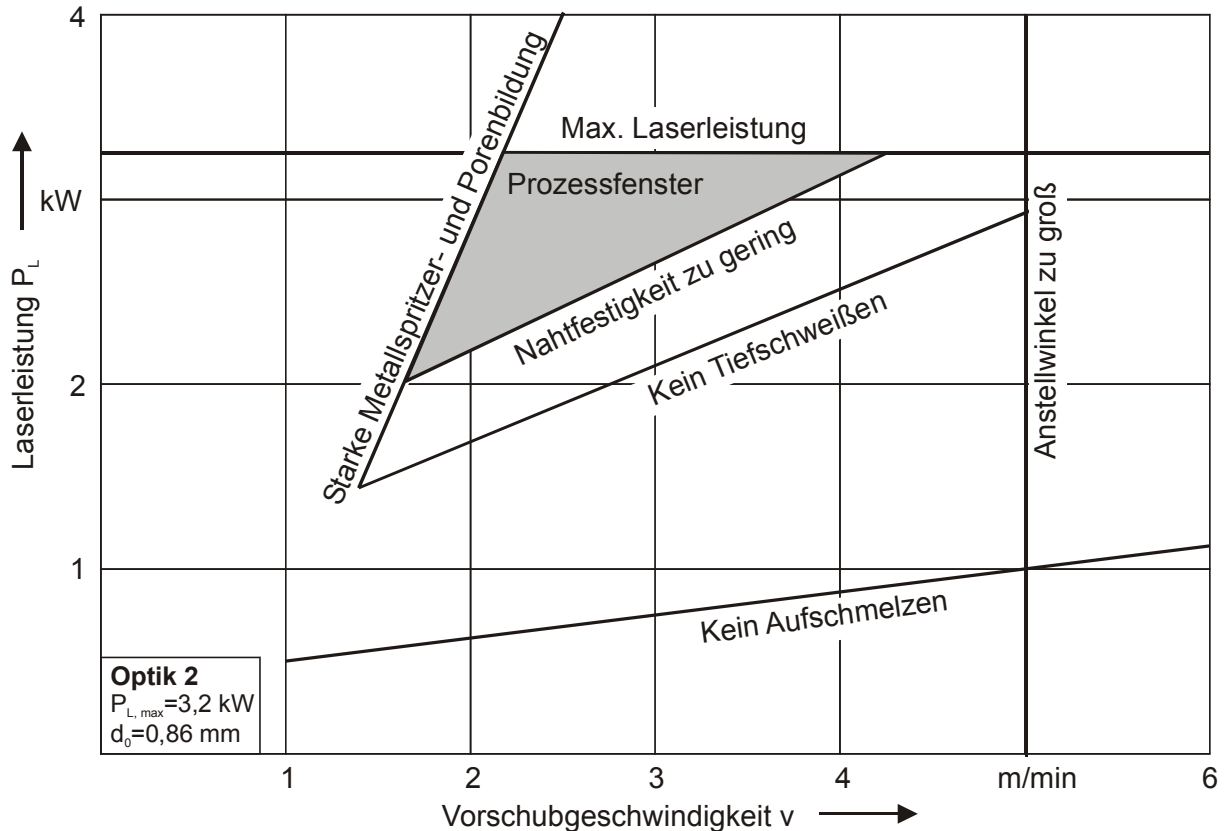


Bild 6-41: Prozessfenster des integrierten Fügeprozesses (vergleiche Bild 6-3, Bild 6-17 und Bild 6-32)

Anstellwinkel

Unabhängig von eingesetztem Laser und Optik kann das verwendete Führungssystem oberhalb einer bestimmten Vorschubgeschwindigkeit bei komplexen Schweißbahnen die Umorientierung des Bearbeitungskopfes nicht mehr schnell genug durchführen, um die vorgegebenen maximalen Anstellwinkel einzuhalten. Die Folge ist entweder eine Verringerung der Vorschubgeschwindigkeit durch die Steuerung oder ein Überschreiten der zulässigen Anstellwinkel.

Aufschmelzen

Unterhalb einer bestimmten Grenze ist die eingebrachte Laserenergie zu gering und es findet kein Aufschmelzen statt. Oberhalb dieser Grenze, aber unterhalb der Grenze zum Tiefschweißen, liegt der Bereich des Wärmeleitungsschweißens. Hier verdampfen die Rückstände nicht in genügend hohem Maße, so dass große Poren entstehen und teilweise nur dünne, brückenförmige Strukturen die geschweißten Bleche verbinden. Blasen, Schuppen und Rückstände bilden sich auf der Nahtoberfläche und sind teilweise schon mit dem bloßen Auge erkennbar.

Tiefschweißen

Oberhalb dieser Grenze bildet sich eine Dampfkapillare aus und es entsteht ein Tiefschweißprozess. Die Rückstände verdampfen weitgehend rückstandsfrei. Bei zweifacher Verschweißung, wie sie an der Nahtüberlappung auftritt, können bei nicht für den Schweißprozess optimierten Schmiermedien Mikrolöcher auftreten.

Nahtfestigkeit

Unterhalb dieser Grenze kann keine ausreichende Nahtfestigkeit erzielt werden. Der tragende Nahtquerschnitt ist so gering, dass die maximale Zugkraft der Naht stark abfällt und starke Schwankungen zwischen einzelnen Messungen auftreten. In Zugversuchen ist ein Versagen nicht mehr ausschließlich in der Wärmeeinflusszone, sondern auch direkt in der Schweißnaht zu beobachten.

7 Implementierung der tele- und multimedialen Präsentation

7.1 Einleitung und Überblick

In diesem Abschnitt erfolgt zunächst eine allgemeine Darstellung der Methodik zur Implementierung der tele- und multimedialen Präsentation. Im Anschluss daran wird die Anwendung der dargestellten methodisch-didaktischen Grundlegung exemplarisch für eine Bildschirmseite dargestellt.

Eine Dissertation dient - im Gegensatz zu einem Lehrbuch - in größerem Maße dem Aufbau deklarativen als prozeduralen Wissens. Aus der dargestellten Typologie von Lernprogrammen (siehe Abschnitt 3.4.4.2) lässt sich ableiten, dass die Variante einer tele- und multimedialen Präsentation als Lernprogramm besonders geeignet ist. Im Sinne einer Lernergemäßheit (siehe Tabelle 3-7) erfolgt damit eine Differenzierung der Lerngruppe. Die Lernenden können nach ihrer bevorzugten Lernmethode zuerst die gedruckte Form der Arbeit oder zuerst die multimediale Präsentation rezipieren. Auch aus Gründen der Effizienz (siehe Abschnitt 3.4.4.1) bietet sich eine tele- und multimediale Präsentation an. Die Erstellung eines Tutorensystems oder einer Simulation würde leicht den Umfang einer eigenen Dissertation umfassen, wie es beispielsweise in [147] erfolgt. Bei der Präsentation soll ein kognitivistischer Ansatz verfolgt werden. Da das Lesen längerer Texte am Bildschirm ermüdend sein kann, werden die erläuternden Kommentare meist als Audiodateien wiedergegeben. Zahlreiche Visualisierungen dienen zur Doppelcodierung des gesprochenen oder geschriebenen Textes (siehe Abschnitt 3.4.4.3).

7.2 Methodische Vorgehensweise

Die Entwicklung der multimedialen, internetbasierten Präsentation erfolgt in Anlehnung an das in Pfeifer [199] nach [200] und [201] beschriebene Schema der Prototypenentwicklung. Die Erstellung einer tele- und multimedialen Präsentation ist hierbei im Gegensatz zur stufenweisen Entwicklung ein iterativer Kreislauf, der auf den verschiedenen Ebenen der Programmerstellung mehrfach durchlaufen wird. Nach diesem Schema erfolgen die Entwicklung der gesamten Präsentation, die Implementierung der Kapitel sowie die Programmierung jeder einzelnen Seite. Nach jedem Durchlauf ergibt sich eine abgeschlossene, lauffähige Präsentation, die aber nicht notwendigerweise den vollständigen Funktionsumfang der geforderten Problemlösung wiedergibt.

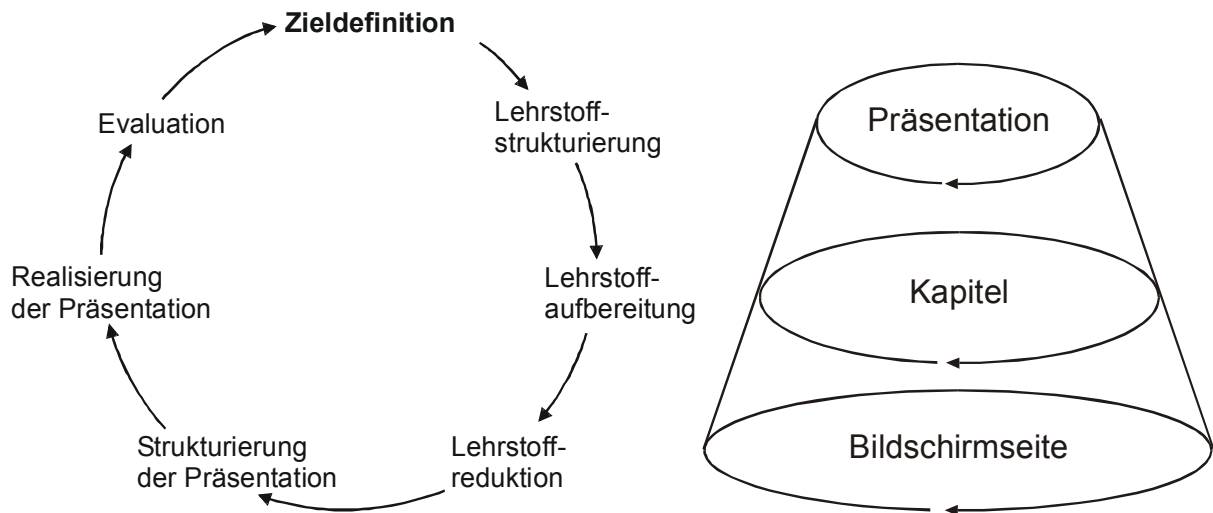


Bild 7-1: Schema der Prototypenentwicklung (in Anlehnung an Pfeifer [199])

Zieldefinition

Anhand von globalen Zielen des Lernprogramms und Richtzielen für die einzelnen Kapitel wird die Intention des Lernprogramms definiert. Dazu dient die kognitive Lernziel-Hierarchie (vergleiche Tabelle 3-4).

Lehrstoffstrukturierung

Bei zunehmender Größe eines Themengebiets steigt die Komplexität der darin enthaltenen Informationen und insbesondere ihrer Zusammenhänge überproportional an, so dass eine systematische Analyse für das Erfassen der Interdependenzen notwendig wird. Gerade bei wissenschaftlichen Forschungsergebnissen, die über Jahre hinweg erarbeitet werden, ist oftmals eine Restrukturierung notwendig. Die Strukturierung erfolgt durch eine Modularisierung der Lerninhalte, die sich im Wesentlichen nach den Kapiteln und Abschnitten der Dissertation richtet.

Lehrstoffaufbereitung

Die Lernziele und der angestrebte Lernprozess werden in einen Lehrprozess umgesetzt (siehe Abschnitt 3.4.2). Dazu ist unter anderem zu bestimmen, welche Medien und Beispiele für jeden Lehrprozess sinnvoll eingesetzt werden können. Fragen der didaktisch besten Lehrstoffdarbietung und der programmiertechnischen Realisierbarkeit werden bereits hier geklärt. Weiterhin ist zu prüfen, ob die Integration zusätzlicher Hintergrundinformationen für das Verständnis der Lernenden erforderlich ist. Die zusätzlichen Materialien werden durch klar definierte Verweise und Vermerke in die Thematik der Präsentation eingebunden.

Lehrstoffreduktion

Aus der Lehrstoffstrukturierung und -aufbereitung ergibt sich ein Maximalmodell der Lehrinhalte. Für die rechnergestützte Präsentation wird der Stoff in Kernseiten und Ergänzungsseiten eingeteilt. Die Kernseiten enthalten die wesentlichen Aussagen jeder

Thematik. Ergänzungsseiten dienen zur Illustration und Vertiefung des Wissens sowie zur Auflockerung.

Strukturierung der Präsentation

Dieser Unterpunkt beinhaltet die Auswahl eines geeigneten Programmes und die Ablaufplanung mit Grob- und Feinzielen. Der zu vermittelnde Lehrinhalt wird untergliedert in Grobziele (Umfang eines Kapitels) und Feinziele (einzelne Seite). Durch diese Unterteilung kann die Präsentation aus Modulen aufgebaut werden. In der sogenannten Sequenzierung wird der Aufbau einer Bildschirmseite festgelegt. Es ist darauf zu achten, dass zusammengehörige Informationen zeitsynchron präsentiert werden. Die in der Lehrstoffstrukturierung ermittelten Abhängigkeiten zwischen den Informationen werden durch die Integration bedingter Sprunganweisungen ("Hyperlinks") berücksichtigt.

Realisierung der Präsentation

In dieser Phase wird ein Teil der Präsentation implementiert. Ebenfalls werden Richtlinien zum Layout, zur Gestaltung von Text, Bildern, Animationen und zum Präsentationsablauf (Transparenz, Motivation der Lernenden) angewandt (vergleiche [202], [203]). Die Implementierung umfasst die Unterpunkte Auswahl bzw. Programmierung der Funktionsmodule, Erstellung der Medien und Integration der Module.

Evaluation

Bevor die Präsentation freigegeben werden kann, muss sie eingehend auf inhaltliche, methodische und technische Mängel hin untersucht werden. Tabelle 7-1 gibt die Unterpunkte der Evaluation wieder.

| Qualitätsprüfung | Punkte |
|------------------|---|
| Inhaltlich | <ul style="list-style-type: none"> – Sind die Zielvorgaben vollständig erreicht worden ? – Verständlichkeit der Darbietung (Übersichtlichkeit und Formulierung) – Rechtschreibung, Grammatik |
| Methodisch | <ul style="list-style-type: none"> – Wissenspräsentation – Benutzerführung – Navigationsmöglichkeiten, Interaktivität – Medieneinsatz – Sind die Gestaltungsrichtlinien umgesetzt worden ? |
| Technisch | <ul style="list-style-type: none"> – Test auf fehlerfreien und logischen Präsentationsablauf – Prüfung der einzelnen Funktionsmodule und Präsentationsabschnitte auf Funktionsfähigkeit – Prüfung des Zusammenspiels der einzelnen Funktionsmodule und Präsentationsabschnitte |

Tabelle 7-1: Qualitätsprüfung der rechnergestützten Präsentation nach Pfeifer [199]

Optimierung

Die Präsentation wird basierend auf den Ergebnissen der Evaluation optimiert, indem die Evaluation wieder als Ausgangspunkt für die Zieldefinition herangezogen und der gesamte Kreislauf erneut durchlaufen wird.

7.3 Anwendung

7.3.1 Gliederung der Dissertation und der Präsentation

Die globalen Ziele der Präsentation liegen in der Veranschaulichung und Vertiefung des Wissens parallel zum Lesen der schriftlichen Arbeit. Auch die Gewinnung eines deklarativen Überblickswissens und eines Verständnisses der wesentlichen Inhalte ohne vollständige Lektüre der Dissertation gehören zu den ganzheitlichen Zielen.

Als Gliederung der gedruckten Arbeit bietet sich eine realgenetische oder eine linear-synthetische Strukturierung an (siehe Abschnitt 3.4.3.1 und Bild 7-2). Für die vorliegende Arbeit wird eine linear-synthetische Gliederung verwendet, die Konstruktion und Implementierung des integrierten Fügeoboters sowie die Untersuchungen mit dem Knickarm- und dem integrierten Fügeoboter aus einem statisch-finalen Blickwinkel heraus betrachtet. Neben einer knapperen Darstellung bietet sie die Möglichkeit einer besseren Diskussion der Versuchsergebnisse. Die umfangreichen Arbeiten der Konstruktion werden nur knapp ausgeführt. Die Gliederung der Präsentation folgt den Kapiteln der gedruckten Arbeit. Die Kapitel der Präsentation weisen - abgesehen von Einleitung und Zusammenfassung - die in Tabelle 7-2 dargestellte einheitliche Struktur auf.

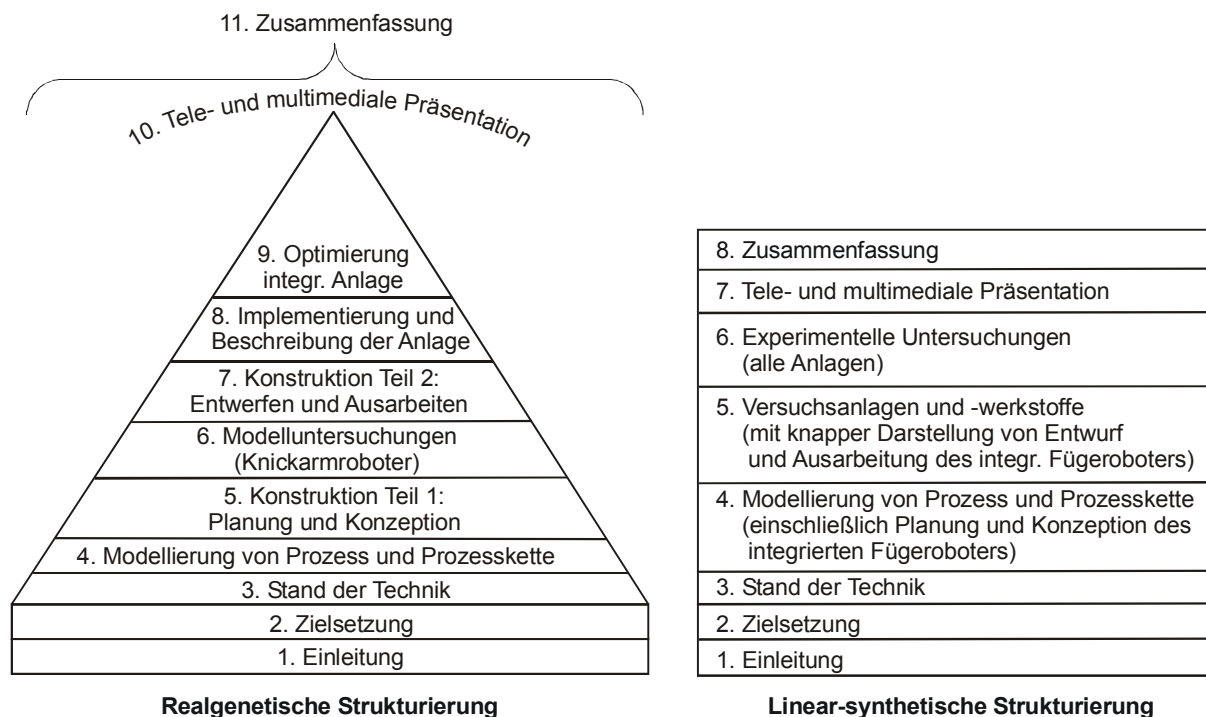


Bild 7-2: Strukturierungsmöglichkeiten der Dissertation

| Bezeichnung | Funktion |
|---------------------------------|--|
| Titelbild und Gliederung | Einführung und Übersicht über das Kapitel |
| Dauer, Motivation und Lernziele | Vorbereitung des selbstgesteuerten Lernprozesses |
| Hauptteil | Präsentation des Lehrstoffs |
| Wissensquiz | Verständnisfragen zur Erfolgskontrolle |
| Ergänzungsseiten | Vertiefender Lehrstoff (z.B. Versuchsparameter) und ergänzende Videosequenzen zur Erhöhung der Anschaulichkeit |

Tabelle 7-2: Gliederung der Kapitel der Präsentation (vergleiche "Instruktionale Ereignisse" in Tabelle 3-10)

7.3.2 Exemplarische Darstellung der Entwicklung einer Seite

In diesem Abschnitt wird die didaktische Aufbereitung der Seite "Einschweißtiefe" nach dem beschriebenen Schema der Prototypenentwicklung durchgeführt. Das Grobziel des Kapitels besteht in einem Verständnis der Lernenden über die wichtigsten experimentellen Ergebnisse der Arbeit (dieses Lernziel ist nicht operationalisiert). Es bietet sich an, im Hauptteil dieses Kapitels mit einer Übersicht über die durchgeführten Versuche einzuleiten, dann die Versuche logisch aufeinander aufbauend darzustellen und ihre Ergebnisse zu diskutieren.

1. Zieldefinition

Feinziel (nicht operationalisiert)

- Kenntnis und Verständnis des Einflusses von Vorschubgeschwindigkeit und Kontamination auf die Einschweißtiefe einer Stirnflachnaht (vergleiche Tabelle 3-4)

Alternativ: Feinziel (operationalisiert)

- Die Lernenden sollen einen quantitativen Verlauf der Einschweißtiefe über die Vorschubgeschwindigkeit für beide Optiken skizzieren können.
- Die Lernenden sollen den Einfluss einer Kontamination auf die Einschweißtiefe erläutern können.

2. Lehrstoffstrukturierung

Eine realgenetische Strukturierung wird durch folgende Gliederung erzielt: Beschreibung der Schweißungen (Laser- und Schweißparameter, Werkstoff) - anschauliche Darstellung des Versuchsablaufs (Schliffe) - Präsentation und Diskussion der Ergebnisse.

3. Lehrstoffaufbereitung

An Datenmaterial zur Präsentation existieren neben den Schweißparametern, wie beispielsweise der Laserleistung, Bilder der Schliffe und die Messwerte. Eine exemplarische Darstellung der Messwerte erfolgt in Tabelle 7-3. Weiterhin wird der Schweißprozess auf Video aufgezeichnet.

| Lfd. Nr. | Datenquelle | Optik | Naht (0=I; 1=Stirn) | Kontamination | Anstellwinkel 0=0°; 1=30° stechend; 2=30° schleppend | Vorschubgeschwindigkeit v in m/min | Defokussierung F in mm | Nahtersatz N in mm | Mittelwert der Einschweißtiefe in mm | Probe 1: Einschweißtiefe in mm | Probe 2: Einschweißtiefe in mm | Probe 3: Einschweißtiefe in mm | ... |
|----------|-------------|-------|---------------------|---------------|--|------------------------------------|---------------------------|--------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----|
| 1 | K | 1 | 1 | 0 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3,4 | 3,4 | 3,5 | 3,0 | ... |
| 2 | K | 1 | 1 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 2,7 | 2,7 | 2,8 | 2,65 | ... |
| 3 | K | 1 | 1 | 0 | 0 | 4 | 0 | 0 | 2,3 | 2,15 | 2,2 | 2,4 | ... |
| 4 | K | 1 | 1 | 0 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1,6 | 1,45 | 1,8 | 1,6 | ... |
| 5 | K | 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 0 | 0 | 3,1 | 3,1 | 3,3 | 3 | ... |
| 6 | K | 1 | 1 | 1 | 0 | 3 | 0 | 0 | 2,7 | 2,55 | 2,7 | 2,85 | ... |
| 7 | K | 1 | 1 | 1 | 0 | 4 | 0 | 0 | 2,1 | 2 | 2,2 | 2,1 | ... |
| 8 | K | 1 | 1 | 1 | 0 | 5 | 0 | 0 | 1,6 | 1,55 | 1,6 | 1,6 | ... |

Tabelle 7-3: Exemplarische Werte für die Einschweißtiefe

4. Lehrstoffreduktion

Als Kerninhalte werden eine knappe Darstellung des Versuchsablaufes, die Darstellung der Ergebnisse in Diagrammform und die Ableitung der zentralen Information (indikatorisches Bildverständnis) gewählt. Die Einzelwerte werden nicht präsentiert. Schliffbilder erhöhen die Anschaulichkeit (vergleiche Abschnitt 3.4.3.2). Das Video des Schweißprozesses wird nicht in den obligatorischen, sondern in den fakultativen Teil des Kapitels aufgenommen. Dies erhöht die Anschaulichkeit und regt zum selbstgesteuerten und Explorativen Lernen an (vergleiche Abschnitte 3.4.1.6 und 3.4.1.5).

5. Strukturierung und Realisierung der Präsentation

Die Darstellung des Versuchsablaufs erfolgt in Piktogrammen mit Konstruktionsfunktion (siehe Abschnitt 3.4.4.3), wobei die verwendeten Anlagen nicht mit abgebildet werden. Dies erlaubt eine didaktische Reduktion der Komplexität (Elementarisierung, Ökonomie) und spricht gezielt das Vorwissen der Lernenden auf dem Gebiet des Laserstrahlschweißens sowie auf dem Feld der werkstoffkundlichen Untersuchungen (Schliffe) an. Damit wird dem fundierenden Unterrichtsprinzip Lernergemäßheit Rechnung getragen (siehe Abschnitt 3.4.3.1). Die einfache Struktur (Laserstrahlschweißen - Schliffe - optische Messung der Einschweißtiefe) ermöglicht ein natürliches Bildverstehen. Das indikatorische Bildverstehen wird durch ergänzende textuelle und auditive Kommentare gefördert.

Die Darstellung der Einzelwerte in Tabellenform ist nicht lernergemäß. Anschaulichkeit und Motivierung zum Weiterlernen ergeben sich durch eine abstrakte, logisch-analytische Visualisierung der Messwerte in einem Diagramm, dessen Messreihen sich schrittweise aufbauen (genetische Strukturierung). Dazu erfolgt zunächst die Berechnung der Mittelwerte für jede Geschwindigkeit und die Ermittlung der Vertrauensbereiche für ein Vertrauensniveau von 95%. Die Darstellung wird anhand eines Liniendiagrammes mit Fehlerbalken für die Vertrauensbereiche durchgeführt.

Sowohl aus dem abstrakten Diagramm (Visualisierung) als auch aus dem konkreten Abbild der Schliffe dieser Seite ist die existentielle Aussage ableitbar, dass die Einschweißtiefe näherungsweise linear mit der Vorschubgeschwindigkeit abnimmt. Eine Doppelcodierung findet durch den gesprochenen Text und die Darstellung in Ergebnisfenstern (siehe Bild 7-3 Nr. 3 und 4) statt, die dieses Ergebnis zusammenfassend wiedergeben. Durch diese dreifache Darstellung ist sichergestellt, dass eine Rezeption und Memorierung dieser Lerninhalte stattfindet.

Die Seite wird nun in Microsoft Powerpoint XP erstellt. Dazu werden die Schliffbilder mit einem Maßstab versehen und eine Skizze des Versuchsablaufs gezeichnet. Zur besseren Diskriminierbarkeit werden die einzelnen Elemente in Kästen gruppiert. Die Verständlichkeit wird durch eine genetische Sequenzierung des Bildaufbaus erhöht. Die textuellen bzw. bildlichen Lehrinhalte werden synchron mit den auditiven Kommentaren präsentiert. Die Reihenfolge entspricht damit dem Versuchsablauf und gliedert sich, wie in Bild 7-3 dargestellt, nach folgender Struktur:

- Darstellung des Versuchsablaufs zur Generierung von Überblickswissen als Hilfe beim Aufbau des mentalen Modells (1)
- Präsentation einer Serie von Schliffen mit symbolischer Darstellung des Laserstrahls (1)
- Darstellung des Liniendiagrammes der Werte für die Einschweißtiefe der mit Optik 1 verschweißten unkontaminierten Proben mit simultaner auditiver Erläuterung der Ergebnisse (2)
- Einblenden der Reihe kontaminierter Proben der Optik 1 und Darstellung der Kernaussagen in einem Ergebnisfenster mit simultaner auditiver Erläuterung (3)
- Einblenden der Reihe kontaminierter Proben der Optik 2 mit Ergebnisfenster und auditiven Erläuterungen; Verweis auf das Video (4)

Die Navigation erfolgt durch die dargestellten Schaltflächen, mit denen die Seiten vor- und rückwärts durchlaufen werden können. Weiterhin kann ein Sprung zum Menü, zu einer Hilfeseite, zu Beginn und Ende der Präsentation oder zu den Inhalten der gedruckten Arbeit erfolgen. Im nächsten Schritt werden die Audiodateien mit dem erläuternden Text zu den einzelnen Animationsmodulen erstellt und in die Präsentation eingebunden. Zur Offline-Distribution wird eine CD mit der Präsentation und dem Microsoft Powerpoint Viewer erstellt, die ohne Installation auf jedem neueren Windows-PC lauffähig ist und über eine Autostart-Funktionalität verfügt. Das kommerzielle Programm Microsoft Powerpoint ist zum Abspielen der Präsentation nicht erforderlich. Zur Wiedergabe der Audio- und Videodateien sind verschiedene Codecs (MP3 und DivX 4) notwendig, die auf modernen PCs bereits vorhanden sind oder von der CD installiert werden können. Weiterhin ist es möglich, aus der Präsentation zu der elektronischen Version der gedruckten Arbeit zu springen, die mit dem selbststartenden Programm Adobe Acrobat Reader von der CD gelesen werden kann. Auch hierfür ist keine Installation auf dem PC notwendig.

Für die On-line-Distribution erfolgt eine Konvertierung in HTML/Java. Die Daten werden auf einer eigenen Homepage abgelegt [10], von der die Präsentation im kostenlos verfügbaren Microsoft Internet Explorer 6 oder höher gestartet werden kann (siehe Bild 7-4). Alternativ können die Powerpoint-Präsentation und die Acrobat-Datei vollständig heruntergeladen werden.

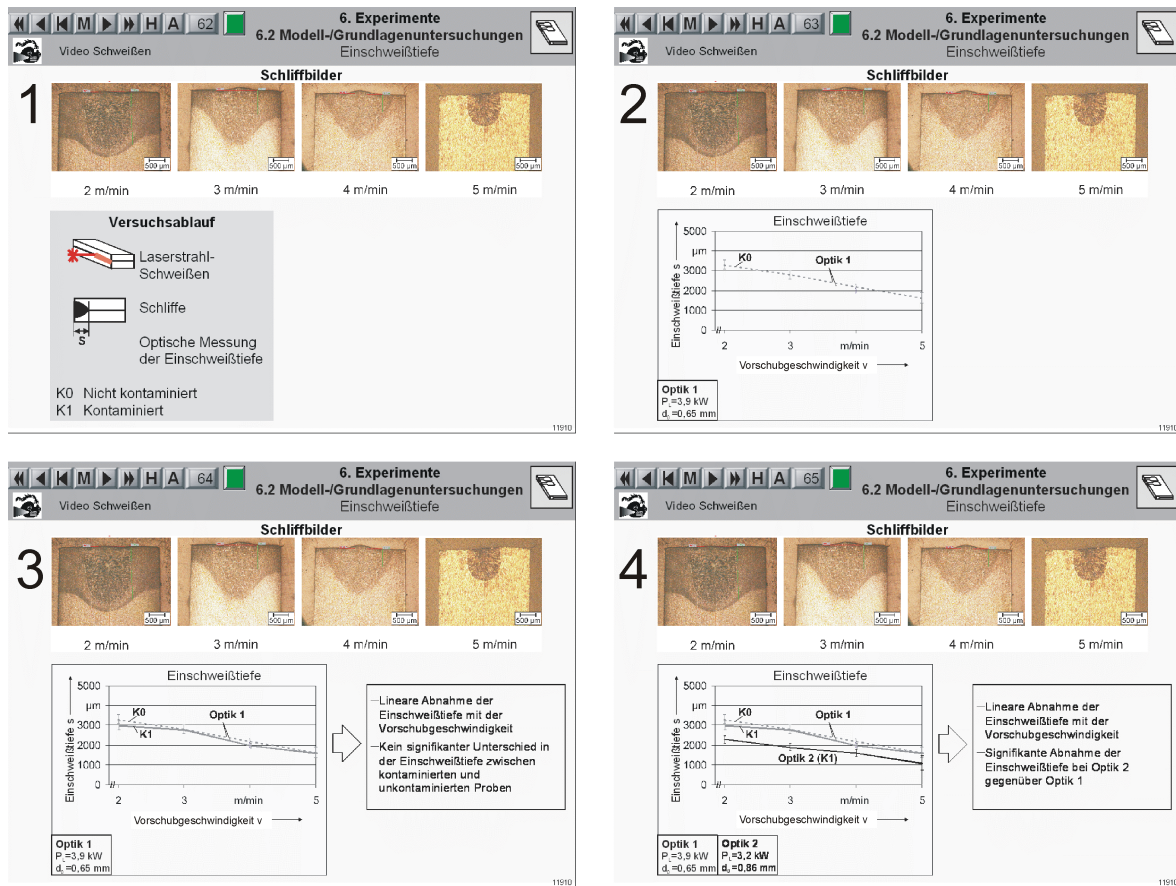


Bild 7-3: Animationsreihenfolge der Seite "Einschweißtiefe" (Off-line-Distribution)

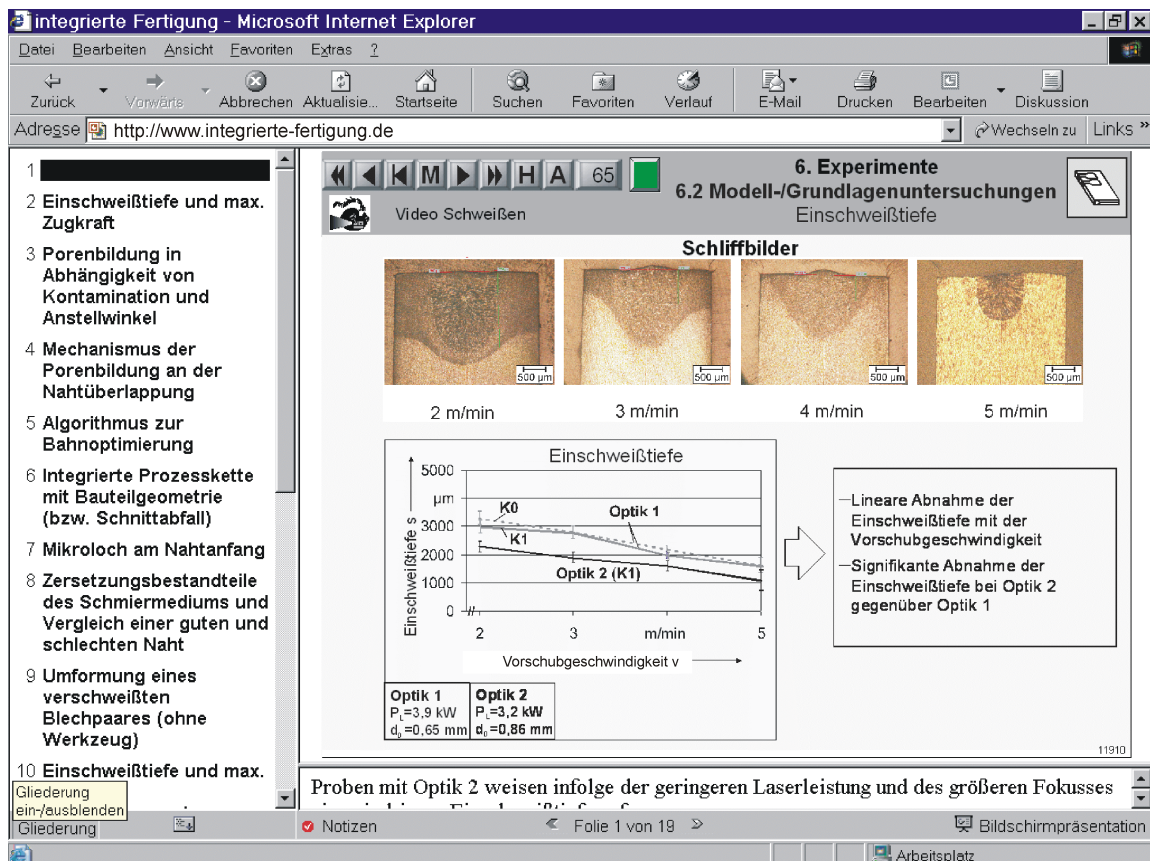


Bild 7-4: Darstellung im Microsoft Internet Explorer 6 (On-line-Distribution)

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Integration von Prozessen und die Verbindung innovativer Fertigungsverfahren bieten eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Verkürzung von Prozessketten bei gleichzeitiger Beibehaltung oder Erhöhung der Komplexität sowie der Bauteilqualität technischer Produkte. Dies ermöglicht die Erschließung von Einsparungspotenzialen durch die Reduzierung von Einzelprozessen.

Aus diesem Grunde wird in vorliegender Arbeit eine Vorgehensweise zur Modellierung von Prozessen und Prozessketten allgemein dargestellt und exemplarisch eine verkürzte Prozesskette zur Herstellung flächiger Leichtbauteile entwickelt. Als Demonstrator dient ein komplexes Hohlformteil aus DC04. Die Prozesskette besteht aus den Prozessen Vorformen mittels Innenhochdruck-Umformen (IHU), Trennen durch mechanisches Scherschneiden, Fügen mittels Laserstrahlschweißen und Ausformen/Kalibrieren durch IHU. Die Schwerpunkte der durchgeführten Arbeiten liegen in einer systematischen Analyse der Integration eines Laserstrahlschweißprozesses in einem Innenhochdruck-Umformwerkzeug, in seiner Optimierung und in der Ableitung allgemeingültiger Erkenntnisse.

Aufbauend auf systemtheoretischen Untersuchungen zur Modellierung von Prozessen und Prozessketten wird für den vorliegenden Anwendungsfall eine prozesstechnische Modellierung des Laserstrahlschweißens mit Betrachtung der Ein- und Ausgangsgrößen sowie eine systemtechnische Modellierung der Kinematik und der notwendigen Verfahrensgeschwindigkeiten und Beschleunigungen der Roboterachsen durchgeführt.

In mehreren Phasen erfolgt eine Optimierung des Fügeprozesses in der verkürzten Prozesskette. Ein vertieftes, verallgemeinerbares Prozessverständnis wird durch systematische Untersuchung der relevanten Ein- und Ausgangsgrößen erarbeitet. Die durchgeführten experimentellen Untersuchungen weisen die prinzipielle Eignung des Laserstrahlschweißens zur Integration in einem IHU-Werkzeug nach. Damit ist auch ein externes Verschweißen von Bauteilen nach dem Umformen mittels IHU in einer konventionellen Prozesskette mit Wegfall eines vorgelagerten Nebenprozesses zur Bauteilreinigung zulässig. Die Möglichkeit der Integrierbarkeit einer Systemtechnik zum Laserstrahlschweißen in einem IHU-Werkzeug ist ebenfalls nachgewiesen. Hierzu dient in der vorliegenden Prozesskette ein Roboter mit zwei Linear- und zwei Rotationsachsen.

Allgemeine aussagekräftige Qualitätsmerkmale einer kontaminierten Schweißnaht sind maximale Zugkraft, Porenvolumen, Dichtheit und Umformbarkeit. Hierbei handelt es sich um Ausgangsgrößen des Fügeprozesses. Obwohl die Blechpaare durch den vorangehenden IHU-Prozess mit IHU-Medium und Schmierstoffen kontaminiert sind, lassen sich diese Qualitätsmerkmale durch eine geeignete Prozessführung so optimieren, dass eine hohe Nahtqualität sichergestellt werden kann. Die Eingangsgrößen des Fügeprozesses mit der höchsten Relevanz sind Vorschubgeschwindigkeit und Laserleistung. Die Vorschubgeschwindigkeit des Tool Center Points muss möglichst konstant sein. Dazu können bei komplexen Schweißbahnen Bahnplanungsstrategien wie Verschleifen kleiner Konturelemente oder Zulassen eines Anstellwinkels dienen. Bei zu hoher Vorschubgeschwindigkeit ist die

maximale Zugkraft zu gering. Bei zu niedriger Geschwindigkeit dagegen führt die höhere Dynamik und Durchmischung des Keyholes zu einer starken Einbringung der Kontaminationen in Keyhole und Schmelze. Dies resultiert in einem drastischen Anstieg des Porenvolumens der Naht. Generell ist eine möglichst hohe Laserleistung zu applizieren, da dadurch ein Verdampfen und Ausgasen der Kontaminationen gefördert wird.

Eine besondere Schwierigkeit stellt die Optimierung des Qualitätsmerkmals Dichtheit dar. Insbesondere im Bereich der Nahtüberlappung, in dem eine zweifache Verschweißung der Bleche vorliegt, führen Kontaminationen zu Mikroporen, die in Undichtigkeiten resultieren können. Durch Verwendung möglichst niedrigviskoser Schmiermedien mit niedrigen Zersetzungstemperaturen und durch die Steuerung der Laserleistung mit einer Rampenfunktion kann eine Nahtüberlappung ohne Undichtigkeiten erzeugt werden. Gegebenenfalls müssen dafür eine niedrigere Einschweißtiefe und eine geringere maximale Zugkraft im Bereich der Nahtüberlappung toleriert werden.

Die durchgeführten Experimente zeigen, dass sich Schweißnähte aus DC04 gut umformen lassen. In Napfziehversuchen mit verschweißten Rondenpaaren ist eine Umformung mit einer Nahtverkürzung um 50 % ohne Versagen möglich. Somit ist ein Flanscheinzug bei einer Umformung nach dem Fügen prinzipiell zulässig.

In der exemplarisch realisierten Prozesskette liegt die optimale Vorschubgeschwindigkeit bei 3 m/min. Der eingesetzte Nd:YAG-Laser mit einer Nennleistung von 4 kW verfügt über eine so hohe Leistung, dass eine prozesssichere Verschweißung auch bei einem Anstellwinkel von bis zu 30° und einer Defokussierung von bis zu 3 mm möglich ist. Durch Einsatz eines mittelviskosen Schmierstoffes und durch die Steuerung der Laserleistung mit einer Rampenfunktion kann eine durchgängige Dichtheit der Naht im Bereich der Nahtüberlappung gewährleistet werden. Die Zeit für den Schweißprozess beträgt circa 20 s. Die Dauer der gesamten Prozesskette hängt im Wesentlichen vom eingestellten Innendruck ab und beläuft sich je nach Umformgrad auf 90-180 s. Die Ergebnisse der fügetechnischen Untersuchungen sind in einem Prozessfenster zusammenfassend dargestellt.

In einer methodisch-didaktischen Grundlegung wird eine Mediendidaktik skizziert. Diese dient als Grundlage für eine tele- und multimediale Präsentation der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit und ermöglicht so die Vermittlung des vorwiegend deklarativen Wissens in einem zeit- und ortsungebundenen E-Learning mit hoher Anschaulichkeit, Flexibilität und Lernwirksamkeit.

Ausblick

Ausblickend bleibt festzuhalten, dass die umformtechnische Fragestellung des Einflusses der Schweißnaht auf den IHU-Prozess, die nicht Thema der vorangegangenen Ausführungen ist, gesondert untersucht werden kann. Hierbei wäre zu prüfen, welche Synergieeffekte genutzt werden können, um die Ausformung der Bauteile im Hinblick auf Umformgrad und Bauteilgenauigkeit zu verbessern. So kann entweder ein höherer Innendruck ohne Undichtigkeit erzielt oder ein stärkerer Flanscheinzug zugelassen werden. Auch eine lokale Wärmebehandlung zur Erhöhung der Umformbarkeit vor oder zwischen den IHU-Prozessen ist denkbar (siehe hierzu auch [169], [204]).

Auf dem Gebiet der Modellierung wurden in einer engen Kooperation mehrerer beteiligter Lehrstühle bereits Einzelprozesse mit Neuronalen Netzen [205], [206] und Bayes-Netzen [207], [208] modelliert. In weiterführenden Arbeiten ist anzustreben, diese Modellierungen auf die gesamte Prozesskette zu erweitern und zusätzlich Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) durchzuführen.

Mit der vorhandenen integrierten Prozesskette kann in einer Wirtschaftlichkeitsbewertung untersucht werden, ob die integrierte Prozesskette mit den dargestellten innovativen Fertigungsverfahren ökonomische Vorteile gegenüber einer konventionellen Prozesskette bietet.

Im Bereich des E-Learning bietet sich an, zur Erhöhung der Lernwirksamkeit und zum verstärkten Aufbau von prozeduralem gegenüber deklarativem Wissen im Sinne einer Handlungsorientierung die Präsentation zu einem Tutorensystem oder zu einer interaktiven Simulation der Prozesskette zu erweitern.

9 Summary

The integration of processes and the combination of innovative manufacturing technologies offer a large variety of possibilities to shorten process chains while maintaining or even enhancing the complexity and quality of technical products. The reduction of processes allows the realization of cost saving potentials.

Therefore, this thesis presents a methodology for the modeling of processes and process chains and shows exemplarily the development of a shortened process chain for the manufacturing of sheet light weight parts, that integrates the processes performing by hydroforming, mechanical shear cutting, joining by laser beam welding and hydrocalibrating in one single tool. The main objectives of the examinations are the systematic analysis of the integration of the laser beam welding process in a hydroforming tool, the optimization of the welding process and the deduction of generally admitted knowledge.

Based on a system-theoretical modeling, a modeling of the input and output factors is developed. The modeling of the system design shows the kinematics and the necessary velocities and accelerations of the welding robot axes. The integrated joining process is optimized in several steps. A systematic experimental analysis of the relevant input and output parameters leads to a deepened understanding of the joining process. The conducted experiments prove the general suitability of the laser beam welding process for the integration in a hydroforming tool and the technical feasibility of the examined process integration.

Maximum tensile force, pore volume, impermeability and forming capability are general significant quality criteria of a weld seam that is contaminated with hydroforming media and lubricants. By using optimized process guiding strategies, the flange can be joined with a good welding quality. Feed speed and laser power are the most significant input parameters of the welding process. The feed speed of the tool center point has to be as constant as possible. If the feed speed is too high, the maximum tensile force of the weld is too low. At low feed speeds, the higher dynamics and mixing of the keyhole in the melt leads to a strong disposal of contaminations in the keyhole and in the melt, resulting in a strong increase of the pore volume. Generally, a high laser power improves the evaporation and outgassing of the contaminations. Lubricants with a high viscosity guarantee a good hydroforming process. Occasionally, they don't evaporate without residues in the welding process, casually resulting in leakages in the weld. By using a specific lubricant with a low viscosity, the impermeability of the weld can be secured even in the critical area of the weld overlap. The weld can be formed without failure, allowing a draw-in of the flange in the final hydroforming process (hydrocalibrating). A process window summarizes the conducted welding experiments.

In an interdisciplinary approach, the essential results of the work are additionally presented in a scientific-based tele- and multimedia presentation that enables a knowledge transfer anywhere at any time with a high clearness, flexibility and learning efficiency.

10 Literaturverzeichnis

- [0] Schwanitz, D.: Bildung. Alles, was man wissen muss. Frankfurt/M.: Eichborn, 1999
- [1] Mittelstraß, J.: Stichwort Interdisziplinarität. Basel, Schweiz: Europainstitut der Universität Basel, 1996 [BASLERSCHRIFTEN zur europäischen Integration, Band 22], <http://www.unibas.ch/euro/inhalt/menu4/schriften/BS22.pdf>
- [2] Zimmerli, W. Ch.: Universität am Scheideweg. Die Zukunft der deutschen Hochschulen liegt (auch) in den fachübergreifenden Studieninhalten. Mitteilungen des Hochschulverbandes 41 (1993) Nr. 1, S. 29-31
- [3] Geiger, M.; Kreis, O.: Idee-Vision-Innovation. Festvortrag zur Immatrikulationsfeier der Technischen Universität Chemnitz am 10.10.2001, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, <http://www.lft.uni-erlangen.de/studium>
- [4] Hein, Ph.: Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozessauslegung und Prozessführung, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach, 1999 [Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Reihe Fertigungstechnik, Erlangen, Band 96]
- [5] Otto, A.: Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach, 1997 [Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Reihe Fertigungstechnik, Erlangen, Band 65]
- [6] Homepage des Sonderforschungsbereichs 396: <http://www.sfb396.uni-erlangen.de>
- [7] Otto, A.; Geiger, M.: Robuste, verkürzte Prozeßketten für flächige Leichtbauteile. In: Vortragstexte zum Industriekolloquium Fertigen in Feinblech, Clausthal-Zellerfeld, 10.-11.12.1998
- [8] Simon, H. (Hrsg.): Virtueller Campus. Forschung und Entwicklung für neues Lehren und Lernen. Münster, New York, München, Berlin: Waxmann, 1997 [Medien in der Wissenschaft, Band 5]
- [9] Siebert, M.: Lernen im Netz. Siemens-Welt 2002 Nr. 3, S. 21
- [10] Adresse der Homepage: <http://www.integrierte-fertigung.de>
- [11] Online-Publikationen des Shaker-Verlags (PDF-Volltext). Aachen: Shaker, 2002, <http://www.shaker.de/Online-Gesamtkatalog>
- [12] Homepage der Virtuellen Hochschule Bayern: <http://www.vhb.org>
- [13] Lange, K.: Umformtechnik, Band 3 (Blechbearbeitung). Berlin, e.a.: Springer, 2. Auflage, 1990
- [14] Hielscher, C.; Schmoeckel, D.; Prier, M.: Entwicklung und Perspektiven des Innenhochdruck-Umformens von Hohlprofilen. In: MPK 99, Magdeburger

- Produktionstechnisches Kolloquium Wissensintensive Produktion, Magdeburg, 05.-06.05.1999
- [15] NN: IHU-Fertigung für die VW-Hinterachse. Blech Rohr Profile 46 (1999) Nr. 6, S. 26-28
- [16] Dohmann, F.; Hartl, C.: Automobil-Leichtbau durch Innenhochdruckumformen. In: EFB (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. T16: Innenhochdruckumformen - eine Alternative in der Fertigungstechnik, Fellbach, 05.-06.03.1996. Hannover: EFB, 1996
- [17] Klasauseweh, U.: Hydroformen von Fahrzeugkomponenten in der Großserienproduktion. In: Innenhochdruckumformen - innovative Fertigungstechnik für den Superleichtbau, Haus der Technik, Essen, 29.-30.01.1997
- [18] Schroeder, M.: Herstellung von PKW-Rahmenstrukturen und Abgaskomponenten durch IHU. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 1. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 12.-13.10.1999. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 1999, S. 403-419
- [19] Engel, B.; Prier, M.; Hielscher, C.: Grundlagen sowie Forschungs- und Entwicklungstendenzen des Innenhochdruck-Umformens. In: UKD 2000, Tagungsband zum 7. Umformtechnischen Kolloquium Darmstadt, Anforderungen - Innovationen - Perspektiven, Darmstadt, 14.-15.03.2000
- [20] Bobbert, S.: Simulationsgestützte Prozessauslegung für das IHU von Blechpaaren, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2000. Bamberg: Meisenbach, 2001 [Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Reihe Fertigungstechnik, Erlangen, Band 103]
- [21] Dohmann, F.: Entwicklung und Anwendung des Innenhochdruckumformens. In: Innenhochdruckumformen - innovative Fertigungstechnik für den Superleichtbau, Haus der Technik, Essen, 29.-30.01.1997
- [22] Lassl, G.; Hanicke, G.; Holm, S.; Strandberg, Ö.: Karosserieaufbau Innenhochdruck-Umformen. Werkstatt und Betrieb 131 (1998) Nr. 3, S. 208-213
- [23] Leitloff, F.-U.: Hydroforming application in the automotive industry: from feasibility analysis to series production. Advanced Technologies & Processes IBEC '97, 1997
- [24] Neubert, J.: Herstellung von Hohlteilen mittels IHU. In: Innenhochdruck- und Thixoformen von Stahl und Al, Automobil-Arbeitskreise, Praxis-Forum, Band 2, 1998, S. 5-15
- [25] Dick, P.: Technologie des Hochdruckumformens ebener Bleche, Dissertation, TU Darmstadt. Aachen: Shaker, 1997 [Berichte aus Produktion und Umformtechnik, Band 37]
- [26] Engel, B.: Verfahrensstrategie zum Innenhochdruck-Umformen, Dissertation, TU Darmstadt, 1995. Aachen: Shaker, 1996 [Berichte aus Produktion und Umformtechnik, Band 30]

- [27] Homberg, W.: Untersuchungen zur Prozessführung und zum Fertigungssystem bei der Hochdruck-Blech-Umformung, Dissertation, Universität Dortmund. Aachen: Shaker, 2001 [Berichte aus der Fertigungstechnik]
- [28] Kolley, R.: Finite-Element-Simulation wirkmedienbasierter Blechumformverfahren als Teil einer virtuellen Fertigung, Dissertation, Universität Dortmund. Aachen: Shaker, 1999 [Berichte aus der Fertigungstechnik]
- [29] Szücs, E.: Einsatz der Prozeßsimulation bei der Entwicklung eines neuen Umformverfahrens - der Hochdruckblechumformung, Dissertation, Universität Dortmund. Aachen: Shaker, 1997 [Berichte aus der Fertigungstechnik]
- [30] Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 1. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 12.-13.10.1999. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 1999
- [31] Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 2. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 06.-07.11.2001. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2001
- [32] VDI 3146 Blatt 1 (Entwurf): Innenhochdruck-Umformen - Grundlagen. Berlin: Beuth, 1999
- [33] Lichtenberg, S.: Möglichkeiten und Grenzen des Umformens von Stahlwerkstoffen mit hydraulischen Wirkmedien. Studiengesellschaft Stahlanwendung (Hrsg.): Forschungsbericht P 305. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft, 1996
- [34] DIN 8582, Ausgabe: 1971-04: Fertigungsverfahren Umformen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht. Berlin: Beuth, 1971
- [35] DIN 8584-1, Ausgabe: 1971-04: Fertigungsverfahren Zugdruckumformen, Einordnung, Unterteilung, Begriff. Berlin: Beuth, 1971
- [36] DIN 8585-1, Ausgabe: 1970-10: Fertigungsverfahren Zugumformen, Einordnung, Unterteilung, Begriff. Berlin: Beuth, 1970
- [37] Schmoeckel, D.; Dick, P.; Engel, B.: Herstellung komplexer Bauteilgeometrien mit dem Innenhochdruck-Umformen. wt-Produktion und Management 85 (1995), S. 297-301
- [38] Bobbert, S.: Innenhochdruck-Umformen von Blechen. In: Qualitätsfaktor Umformtechnik, 5. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Freiberg, 26.-27.11.1998. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 1998
- [39] Sielaff, J.; Brachvogel, M.; Kettner, A.; Kriegler, L.: Integration neuer Fertigungsverfahren für Karosserieträger - Betrachtung des Produktentstehungsprozesses und Bedeutung für die passive Sicherheit, 7. Forum IHU, Darmstadt, 28.02.-01.03.2001
- [40] Bobbert, S.: IHU von Blechpaaren - Beschreibung und Strategien zur Vermeidung verfahrenstypischer Defekte, 6. Forum IHU, Darmstadt, 09.03.2000

- [41] Dick, P.: Hydro-Umformen von Aluminiumblech. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 1. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 12.-13.10.1999. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 1999, S. 305-326
- [42] Novotny, S.; Hein, Ph.: Hydroforming of Sheet Metal Pairs from Aluminium Alloys. In: Geiger, M.; Kals, H.J.J.; Shirvani, B.; Singh, U.P. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Sheet Metal (She'Met) '99, Erlangen, 27.-28.09.1999. Bamberg: Meisenbach, 1999, S. 591-598
- [43] Novotny, S.; Geiger, M.: Process Design for Hydroforming of Lightweight Metal Sheets at Elevated Temperatures. In: Lee, W.B.; e.a. (Hrsg.): Proceedings of the Ninth International Manufacturing Conference in China, 2000. Hong Kong, China: The Hong Kong Polytechnic University, 2000, S. 289-290
- [44] Patentschrift DE 195 31 035 C2: Verfahren zur Herstellung von Hohlkörpern aus Aluminium oder Aluminiumlegierungen, 1998 (Rösch, F.)
- [45] Patentschrift DE 195 35 870 C2: Verfahren zum Herstellen von schalenförmigen Hohlstrukturen aus gedoppelten Blechzuschnitten mittels Innenhochdruckumformen, 2002 (Geiger, M.; Vollertsen, F.)
- [46] Rauh, W.; Schießl, G.; Herberg, U. v.d.; Lenze, F.-J.: Umformtechnologie und Simulation. In: EFB (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. T16: Innenhochdruckumformen - eine Alternative in der Fertigungstechnik, Fellbach, 05.-06.03.1996. Hannover: EFB, 1996
- [47] Kirmße, H.; Wesselmann, L.: Fertigungsverfahren Innenhochdruck-Umformen. Abschlußbericht zum Projekt TEC-04 Prozeßoptimierung Innenhochdruck-Umformen verschweißter Platinen. Berlin: INPRO, 1998
- [48] Yuan, S.; Wang, Z.R.: Effect of the Hydrobulging Process on Mechanical Properties of Spherical Pressure Vessels. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing* 36 (1996) Nr. 7, S. 829-834
- [49] Yuan, S.; Wang, Z.R.: Research on Residual Stresses after Hydrobulging of Spherical Vessels. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* 68 (1996) Nr. 3, S. 231-235
- [50] Zhang, S.; Wang, Z.R.; Wang, J.: Numerical Simulation of the Hydroforming Process for 32-Petal Spherical Vessels. *Journal of Materials Processing Technology* 39 (1993), S. 109-117
- [51] Zhang, S.H.; Zeng, Y.S.; Wang, Z.R.: Theoretical Analysis and Experimental Research into the Integral Hydro-Bulge Forming of Oblate Shells. *Journal of Materials Processing Technology* 62 (1996), S. 199-205
- [52] Pohl, T.: Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg, 2001.

- Bamberg: Meisenbach, 2002 [Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Reihe Fertigungstechnik, Erlangen, Band 130]
- [53] Geiger, M.; Vollertsen, F.; Hein, Ph.: Het hydrovormen van plaatpakketten. MB-Produktietechniek Teil 1: 64 (1998) Nr. 11/12, S. 361-365. Teil 2: 65 (1999) Nr. 1, S. 6-9
- [54] Geiger, M.; Vollertsen, F.; Hein, Ph.: Hydroforming of Sheet Metal Pairs. In: Kals, H.J.J.; Geiger, M.; Shirvani, B.; Singh, U.P. (Hrsg.): Proceedings of the 6th International Conference On Sheet Metal 1998 (She'Met), Enschede, 06.-08.04.1998, Vol. 1, S. 37-51. Enschede, Niederlande: University of Twente, 1998
- [55] Geiger, M.; Bobbert, S.; Roll, K.; Hein, Ph.: Prozeßauslegung beim Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren mit Hilfe der FEM-Simulation. In: EFB (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. T19: Wirtschaftliche Blechverarbeitung durch Simulation. Hannover: EFB, 1999
- [56] Geiger, M.; Hein, Ph.: Prediction and Control of the Draw-in of Hydroformed Sheet Metal Pairs. Production Engineering. Annals of the WGP 6 (1999) Nr. 1, S. 33-38
- [57] Geiger, M.; Hein, Ph.: Prozeßführungen beim Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Prozeßsicherheit in der Blechbearbeitung. Tagungsband zum 2. Kolloquium Innovative Karosserieteilfertigung, Chemnitz, 13.-14.04.1999. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 1999 [Berichte aus dem IWU, Band 4]
- [58] Geiger, M.; Hein, Ph.; Bobbert, S.: FE-Analysis and Process Design for the Hydroforming of Sheet Metal Pairs. Proceedings of the 4th International Conference on Numerical Simulation of 3D-Sheet Forming Processes Numisheet '99, Besançon, Frankreich, 13.-17.09.1999, S. 9-14
- [59] Geiger, M.; Celeghini, M.: Double sheet hydroforming of complex hollow bodies. Production engineering. Annals of the WGP (in Druck)
- [60] Geiger, M.; Vahl, M.; Novotny, S.; Bobbert, S.: Process Strategies for Sheet Metal Hydroforming of Lightweight Components. Journal of Engineering Manufacture, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B. Suffolk: Professional Engineering Publishing, 2001, S. 967-976
- [61] Hein, Ph.: Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren, 4. Forum IHU, Darmstadt, 26.02.1998
- [62] Hein, Ph.; Geiger, M.: Advanced Process Control Strategies for the Hydroforming of Sheet Metal Pairs. In: Geiger, M. (Hrsg.): Advanced Technology of Plasticity, Proceedings of the 6th International Conference on Technology of Plasticity ICTP 1999, Nürnberg, 19.-24.09.1999, Vol. 2. Berlin, e.a.: Springer, 1999, S. 1267-1272
- [63] Hein, Ph.; Geiger, M.: Process and System Design for the Hydroforming of Sheet Metal Pairs. In: Hillery, M.T.; Lewis, H.J. (Hrsg.): ICPR-15, Manufacturing for a Global Market. Proceedings of the 15th International Conference on Production Research, Limerick, Irland, 09.-12.08.1999, S. 33-36

- [64] Hein, Ph.; Hofmann, A.; Braune, R.; Otto, A.; Geiger, M.: Innovative Blechumformverfahren für den Leichtbau. In: Dresdner Leichtbausymposium Vorsprung durch fertigungsgerechte Leichtbauweisen, Dresden, 10.-12.06.1999
- [65] Hein, Ph.; Vollertsen, F.: Hydroforming of Sheet Metal Pairs. *Journal of Materials Processing Technology* 87 (1999) Nr. 1-3, S. 154-164
- [66] Celeghini, M.; Geiger, M.: Use of design of experiments in the modelling of a hydroforming tool. In: Duflou, J.R.; e.a. (Hrsg.): *Proceedings of the 9th International Conference on Sheet Metal 2001 (She'Met)*, Leuven, Belgien, 02.-03.04.2001. Leuven: ACCO C.V., S. 541-546
- [67] Vahl, M.; Hein, Ph.; Bobbert, S.: Hydroforming of sheet metal pairs for the production of hollow bodies. *Revue de Métallurgie* 97 (2000) Nr. 10, S. 1255-1263
- [68] Schulungsunterlage Multidraw Tiefziehen, Zeller+Gmelin GmbH & Co, Eislingen/Fils, o. J.
- [69] Zimmermann, R.: Nichtwassermischbare Schmierstoffe für die Blechumformung und -bearbeitung, Zeller+Gmelin GmbH & Co, Eislingen/Fils, 1997
- [70] Dohmann, F.; Vollertsen, F.: Bedeutung des Innenhochdruckumformens für den Leichtbau. In: Vollertsen, F.; Hahn, O.; Herrmann, K.; Maier, H. J. (Hrsg.): *Endeigenschaftsnahe Formgebung - Fertigung und Bauteilprüfung*, Tagungsband zur Veranstaltung EndForm2000, Paderborn, 03.-04.05.2000. Aachen: Shaker, 2000, S. 67-94 [Berichte aus der Fertigungstechnik]
- [71] Siegert, K.; Leuschen, B.; Huber, S.: Verkürzung der Prozeßkette bei der Herstellung von Blechbauteilen durch integrierte Verfahrenskombinationen. In: Gesellschaft für Fertigungstechnik (Hrsg.): *Stuttgarter Impulse: Innovation durch Technik und Organisation FTK '97*. Berlin, e.a.: Springer, 1997, S. 146-156
- [72] Tönshoff, H. K.: Strategien für die Produktion im 21. Jahrhundert. Endbericht des WGP-Arbeitskreises Produkte und Prozesse der Wissenschaftlichen Gesellschaft für Produktionstechnik WGP, 1994
- [73] Neubauer, A.; Lichtenberg, H.: Verkürzte Fertigungsketten erschließen Leistungspotenzial. *Maschinenmarkt* 106 (2000) Nr. 22, S. 66-72
- [74] Finckenstein, E. v.; Kleiner, M.; Homberg, W.; Szücs, E.: In-process punching with pressure fluids in sheet metal forming. *Annals of the CIRP* 47 (1998), Vol. 2. Bern: Hallwag, 1998, S. 207-212
- [75] Homberg, W.; Kollek, R.; Szücs, E.; Weidner, T.: Zum Projektstand der konstruktiven und technologischen Untersuchungen zur HBU. In: *Entwicklung von Verfahren und Werkzeugsystemen zur Hydroumformung höherfester Stahlbleche*, Plüderhausen, 02.06.1997
- [76] Kleiner, M.; Homberg, W.; Brosius, A.: Process and control of sheet metal hydroforming. In: Geiger, M. (Hrsg.): *Advanced Technology of Plasticity*,

- Proceedings of the 6th International Conference on Technology of Plasticity ICTP 1999, Nürnberg, 19.-24.09.1999, Vol. 2. Berlin, e.a.: Springer, 1999, S. 1243-1252
- [77] Eichhorn, A.; Petzold, W.: Formleichtbaukomponenten durch Innenhochdruckumformen und Kragenziehen von Rohren. In: EFB (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. T17: Leichtbau durch intelligente Blechbearbeitung, Fellbach, 04.-05.03.1997. Hannover: EFB, 1997
- [78] Johannisson, T. G.: Flexforming von Prototyp- und Kleinserienbauteilen. In: Siegert, K. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen in der Blechumformung. Vortragstexte des gleichnamigen Seminars, Fellbach, 23.-24.05.2000. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2000, S. 569-592
- [79] Johannisson, T. G.: Fertigung von Blechformteilen kleiner Gesamtstückzahlen. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 2. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 06.-07.11.2001. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2001, S. 169-191
- [80] DIN 8587, Ausgabe: 1969-07: Fertigungsverfahren Schubumformen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth, 1969
- [81] DIN 8588, Ausgabe: 1985-06: Fertigungsverfahren Zerteilen, Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth, 1985
- [82] Bausch, W.; Nowack, H.: Charakterisierung der Werkstoffeigenschaften von Stahl nach hydrostatischer Streckumformung. Studiengesellschaft Stahlanwendung (Hrsg.): Forschungsbericht P 328. Düsseldorf: Verlag und Vertriebsgesellschaft, 1996
- [83] Schweitzer, K.-H.; Neubauer, A.: Fertigung innovativer Produkte aus Rohr und Blech mittels hydrostatischer Streckumformung. VDI Bericht Nr. 1277. Düsseldorf: VDI, 1996, S. 53-70
- [84] Hachmann, B.: Aspekte der Anwendung des hydrostatischen Streckumformens in der Blechumformung. In: EFB (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. T16: Innenhochdruckumformen - eine Alternative in der Fertigungstechnik, Fellbach, 05.-06.03.1996. Hannover: EFB, 1996
- [85] Nowack, H.; Jung, M.; Hachmann, B.; Schweitzer, K.-H.: Ein Innenhochdruck-Umformverfahren mit besonderen Vorteilen. Die hydrostatische Streckumformung. Bänder Bleche Rohre 37 (1996) Nr. 3, S. 52-56
- [86] Schweitzer, K.-H.: Möglichkeiten der hydrostatischen Streckumformung von Blechen. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 1. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 12.-13.10.1999. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 1999, S. 551-568
- [87] Siegert, K.; Beyer, J.; Breckner, M.; Johannisson, T.: Neue 20.000 kN Hydroblechumformpresse am IFU. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 2. Vortragstexte der Internationalen

- Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 06.-07.11.2001. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2001, S. 115-144
- [88] Jänchen, P.: Herstellung von Bauteilen mit hydromechanischer Blechumformung. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 1. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 12.-13.10.1999. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 1999, S. 343-353
- [89] Boecking, R.; Hachmann, B.; Schweitzer, K.-H.: Untersuchung der Herstellmöglichkeiten eines Kraftstofftanks aus Stahl mit Hilfe hydromechanischer und hydrostatischer Umformverfahren. Forschungsbericht P 242. Düsseldorf: Studiengesellschaft Stahlanwendung e.V., 1998
- [90] Siegert, K.; Wagner, S.: Stand der Technik und Trends in der Blechbearbeitung. VDI-Berichte Nr. 1431. Tagungsband zur internationalen Konferenz Blechbearbeitung '98, Düsseldorf, 20.-21.10.1998. Düsseldorf: VDI, 1998, S. 1-36
- [91] Wagner, S.; Jäger, S.; Frank, H.: Kombination des konventionellen Tiefziehens mit nachfolgendem hydraulischen Tiefen. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 2. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 06.-07.11.2001. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2001, S. 215-464
- [92] Schulze, B.; Bräunlich, H.; Kragtwijk, S.: Doppelplatinenumformung mittels Druckmedien. In: Neugebauer, R. (Hrsg.): Leichtbau durch Umformtechnik, 7. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Chemnitz, 24.-25.10.2000. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2000, S. 199-216
- [93] Cherek, H.; Kollek, R.; Palm, D.: Neue Konzepte für das wirkmedienbasierte Umformen. In: Neue Pressenkonzepte für die Blechumformung, Tagungsband 740, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, München, 19.-20.03.2001
- [94] Kleiner, M.; Gartzke, A.; Kollek, R.: Experimental and Finite Element Analysis of Capabilities and Limits of a Combined Pneumatic and Mechanical Deep Drawing Process. Annals of the CIRP 46 (1997), Vol. 1. Bern, Schweiz: Hallwag, 1997, S. 201-204
- [95] Schmoeckel, D.; Dick, P.: Anwendung des Innenhochdruck-Umformens auf ebene Blechplatinen. In: EFB (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. T16: Innenhochdruckumformen - eine Alternative in der Fertigungstechnik, Fellbach, 05.-06.03.1996. Hannover: EFB, 1996
- [96] Schmoeckel, D.; Huber, R.; Hielscher, C.: Innenhochdruck-Umformen von unverschweißten Blechen. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 1. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 12.-13.10.1999. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 1999, S. 383-401
- [97] Eichhorn, A.; Ohm, K.: Innenhochdruckfügen. In: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (Hrsg.):

- Tagungsband zum EFB-Fortbildungspraktikum Innenhochdruckumformen von Rohren, Magdeburg, 20.-21.09.2000, S. 95-104
- [98] Mertes, P.; Schroeder, M.: Anwendung des Innenhochdruckumformens in der Automobilindustrie. In: Vollertsen, F.; Hahn, O.; Herrmann, K.; Maier, H. J. (Hrsg.): Endeigenschaftsnahe Formgebung - Fertigung und Bauteilprüfung, Tagungsband zur Veranstaltung EndForm2000, Paderborn, 03.-04.05.2000. Aachen: Shaker, 2000, S. 47-66 [Berichte aus der Fertigungstechnik]
- [99] Bobbert, D.: Bauteiloptimierung durch hydraulisches Umformen. Stahl und Eisen 118 (1998) Nr. 6, S. 81-85
- [100] Benzinger, M.; Thumm, C.: Der Laser - ein wichtiges Werkzeug in der IHU-Prozesskette. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 2. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 06.-07.11.2001. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2001, S. 23-37
- [101] Albrecht, V.: Auf dem Weg zum Thyssen Tailored Tube. Blech Rohre Profile 47 (2000) Nr. 10, S. 20-23
- [102] Leitermann, W.; Hoffmann, A.; Dick, P.; Hielscher, C.: Wegweisende Perspektiven des Innenhochdruck-Umformens. In: Schmoeckel, D. (Hrsg.): UKD 1997, Tagungsband zum 6. Umformtechnischen Kolloquium Darmstadt, 1997, S. 85-95
- [103] Hielscher, C.: Verfahrenskombination von Innenhochdruck-Umformen und Rohrbiegen. In: 20 Jahre Umformtechnik in Darmstadt. Bamberg: Meisenbach, 1996, S. 167-174
- [104] Ahlften, A. v.; Altheide, H.-J.: Laser - das andere Licht. Reinbeck: Rowohlt, 1995
- [105] Bimberg, D.; e.a. (Hrsg.): Materialbearbeitung mit Lasern. Grundlagen und Anwendungen. Ehningen: Expert, 1991
- [106] Brunner, W.; Junge, K.: Lasertechnik. Heidelberg: Hüthig, 1987
- [107] Dilthey, U.: Schweißtechnische Fertigungsverfahren, Band 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen. Düsseldorf: VDI, 1995
- [108] Eichler, J.; Eichler, H.J.: Laser - Grundlagen, Systeme, Anwendungen. Berlin, e.a.: Springer, 2. Auflage, 1997
- [109] Erhardt, K.-M.; Heine, A.; Prommersberger, H.: Laser in der Materialbearbeitung. Würzburg: Vogel, 1993
- [110] Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser. Stuttgart: Teubner, 1992
- [111] Kneubühl, F.K.; Siegrist, M.W.: Laser. Stuttgart: Teubner, 5. Auflage, 1999
- [112] Tradowsky, K.: Laser. Würzburg: Vogel, 4. Auflage, 1988
- [113] Treiber, H.: Der Laser in der industriellen Fertigung. Darmstadt: Hoppenstedt, 1990

- [114] Weber, H.: Laser. Eine revolutionäre Erfindung und ihre Anwendungen. München: Beck, 1998
- [115] Iffländer, R.: Festkörperlaser zur Materialbearbeitung. Berlin, e.a.: Springer, 1990
- [116] Bauder, M.: Konfigurierbare Robotersteuerungen mit allgemeiner Transformation, Dissertation, Universität Stuttgart. Berlin, e.a.: Springer, 1992
- [117] Heiß, H.: Die explizite Lösung der kinematischen Gleichung für eine Klasse von Industrierobotern, Dissertation, TU Berlin, o. O. u. V., 1985
- [118] Haferkamp, H.; Benecke, R.: Laserschweißen um die Ecke. Blech Rohre Profile 38 (1991) Nr. 4, S. 304-307
- [119] Backes, F.: Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach, 1997 [Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Reihe Fertigungstechnik, Erlangen, Band 68]
- [120] Schultz, M.: Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach, 1997 [Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Reihe Fertigungstechnik, Erlangen, Band 58]
- [121] Jank, W.; Meyer, H.: Didaktische Modelle: Grundlegung & Kritik. Oldenburg: Carl-von-Ossietszky-Universität, 1990
- [122] Euler, D.: Didaktik einer sozio-informationstechnischen Bildung, Habilitation, Universität Köln. Köln: Botermann & Botermann, 1994 [Twardy, M. (Hrsg.): Wirtschafts-, berufs- und sozialpädagogische Texte, Band 22]
- [123] Kerres, M.: Multimediale und telemediale Lernumgebungen. München: Oldenbourg, 2. Auflage, 2001
- [124] Mandl, H.; Friedrich, H.; Aemilian, H.: Psychologie des Wissenserwerbs. In: Weidenmann, B.; Krapp, A.; Hofer, M.; Huber, G.; Mandl, H. (Hrsg.): Pädagogische Psychologie. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 3. Auflage, 1993, S. 143-218
- [125] Baumgartner, P.; Payr, S.: Lernen mit Software. Innsbruck, Wien, München: Studien-Verlag, 2. Auflage, 1999 [Baumgartner, P.; Payr, S. (Hrsg.): Lernen mit interaktiven Medien, Band 1]
- [126] Ryle, G.: Der Begriff des Geistes. Stuttgart: Reclam, 1969
- [127] Anderson, J.R.; Corbett, A.T.; Koedinger, K.R.; Pelletier, R.: Cognitive tutors. Lessons learned. Journal of learning sciences 1995 Nr. 4, S. 167-207
- [128] Schön, D.: Educating the reflective practitioner. Toward a new design for teaching and learning. San Francisco, USA: Jossey-Bass, 1987
- [129] Schröder, H.: Didaktisches Wörterbuch. München, Wien: Oldenbourg, 3. Auflage, 2001 [Hand- und Lehrbücher der Pädagogik]

- [130] Glöckel, H.: Vom Unterricht: Lehrbuch der allgemeinen Didaktik. Heilbrunn/Obb.: Klinkhardt, 3. Auflage, 1996
- [131] Strittmatter, P.; Mauel, D.: Einzelmedium, Medienverbund und Multimedia. In: Issing, L.; Klimsa, P. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 2. Auflage, 1997, S. 47-61
- [132] Weidenmann, B.: Psychologie des Lernens mit Medien. In: Weidenmann, B.; Krapp, A.; Hofer, M.; Huber, G.; Mandl, H. (Hrsg.): Pädagogische Psychologie. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 3. Auflage, 1993, S. 493-554
- [133] Dubs, R.: Lehrerverhalten. Ein Beitrag zur Interaktion von Lehrenden und Lernenden im Unterricht. Zürich: Verlag des schweizerischen kaufmännischen Verbandes, 1995 [Schriftenreihe für Wirtschaftspädagogik, Band 23]
- [134] Watzlawick, P.: Wie wirklich ist die Wirklichkeit? München: Piper, 26. Auflage, 2000
- [135] Popper, K.: Logik der Forschung. Tübingen: Mohr, 10. Auflage, 1994 [Die Einheit der Gesellschaftswissenschaften, Band 4]
- [136] Steiner, V.: Exploratives Lernen. Zürich: Pendo, 5. Auflage, 2001
- [137] Arzberger, H.; Brehm, K.-H. (Hrsg.): Lerntexte in der Weiterbildung. Gestaltung und Bewertung. Erlangen: Publicis MCD, 1995
- [138] Schröder, H.: Lernen - Lehren - Unterrichten. München, Wien: Oldenbourg, 2000 [Hand- und Lehrbücher der Pädagogik]
- [139] Wildt, J.: Ein hochschuldidaktischer Blick auf Lehren und Lernen. In: Berendt, B.; Voss, H.-P.; Wildt, J. (Hrsg.): Neues Handbuch Hochschullehre. Lehren und Lernen effizient gestalten. Grundwerk. Stuttgart, Berlin, Budapest, Prag, Sofia, Warschau: Raabe Fachverlag für Wissenschaftsinformation, 2002
- [140] Burmester, M.; Hassenzahl, M.; Machate, J.: User im Mittelpunkt. Empfehlungen für einen benutzerzentrierten Entwicklungsprozess. Java Magazin 2000 Nr. 11, S. 53-57
- [141] DIN EN ISO 9241-11, Ausgabe: 1999-01: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten, Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit, Leitsätze. Berlin: Beuth, 1999
- [142] Gagné, R.M.: The conditions of learning and theory of instruction. New York, USA: CBS College Publishing, 1985
- [143] Issing, L.; Klimsa, P.: Multimedia - Eine Chance für Information und Lernen. In: Issing, L.; Klimsa, P. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 2. Auflage, 1997, S. 1-3
- [144] Haack, J.: Interaktivität als Kennzeichen von Multimedia und Hypermedia. In: Issing, L.; Klimsa, P. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 2. Auflage, 1997, S. 151-165

- [145] Tergan, O.-S.: Hypertext und Hypermedia: Konzeptionen, Lernmöglichkeiten, Lernprobleme. In: Issing, L.; Klimsa, P. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 2. Auflage, 1997, S. 123-137
- [146] Euler, D.: Didaktik des computerunterstützten Lernens: praktische Gestaltung und theoretische Grundlagen. Nürnberg: BW Bildung und Wissen, 1992 [Holz, H.; Zimmer, G. (Hrsg.): Reihe Multimediales Lernen in der Berufsbildung, Band 3]
- [147] Westheide, U.: Systematisierung des Laserstrahlschweißens zur Ausbildung mit Multimedia, Dissertation, TH Aachen, 1999. Aachen: Shaker, 2000
- [148] Westheide, U.; Dahmen, M.: LASIM Schweißen - Lasersimulator für die Ausbildung. Handbuch, Fraunhofer-Institut für Lasertechnik ILT, Aachen, 1998, <http://www.ilt.fhg.de/ger/lehrmittel.html>
- [149] Bodendorf, F.: Typologie von Systemen für die computergestützte Weiterbildung. In: Bodendorf, F.; Hofmann, J. (Hrsg.): Computer in der betrieblichen Weiterbildung. München, o.V., 1993, S. 63-82
- [150] Salomon, G.: Television is "easy" and print is "tough": The differential investment of mental effort in learning as a function of perceptions and attribution. Journal of Educational Psychology 76 (1984), S. 647-658
- [151] Paivio, A.: Mental representations. A dual coding approach. New York, USA: Oxford University Press, 1986
- [152] Weidenmann, B.: Multicodierung und Multimodalität im Lernprozess. In: Issing, L.; Klimsa, P. (Hrsg.): Information und Lernen mit Multimedia. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 2. Auflage, 1997, S. 64-84
- [153] Nelson, D.L.: Remembering pictures and words: Appearance, significance and name. In: Cermak, L.; Craik, I.M. (Hrsg.): Level of processing in human memory. Hillsdale, USA: Erlbaum, 1976
- [154] Engelkamp, J.: Das menschliche Gedächtnis. Das Erinnern von Sprache, Bildern und Handlungen. Göttingen: Hogrefe, 1990
- [155] Engelkamp, J.: Episodisches Gedächtnis: Vom Speichern zu Prozessen und Informationen. Psychologische Rundschau 45 (1994), S. 195-210
- [156] Ballstaedt, S.-P.: Lerntexte und Teilnehmerunterlagen. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 2. Auflage, 1994 [Will, H. (Hrsg.): Mit den Augen lernen, Band 2]
- [157] Ott, E.: Optimales Lesen. Reinbek: Rowohlt, 1996
- [158] Robinson, F.P.: Effective study. New York, USA: Harper & Row, 1961
- [159] Langer, I.; Schulz v. Thun, F.; Tausch, R.: Verständlichkeit in Schule, Verwaltung, Politik, Wissenschaft. München: Reinhardt, 1974

- [160] Weidenmann, B.: Lernen mit Bildmedien: psychologische und didaktische Grundlagen. Weinheim: Beltz Psychologie Verlags Union, 2. Auflage, 1994 [Will, H. (Hrsg.): Mit den Augen lernen, Band 1]
- [161] VDI 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI, 1993
- [162] VDI 2222, Blatt 1: Konstruktionsmethodik. Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Düsseldorf: VDI, 1997
- [163] Pahl, G.; Beitz, W.: Konstruktionslehre. Berlin, e.a.: Springer, 4. Auflage, 1997
- [164] Spur, G.: Perspektiven der zukünftigen Produktentwicklung. In: EFB (Hrsg.): EFB-Tagungsband Nr. T22: Vom CAD-Modell zum hochgenauen Blechteil, Fellbach, 19.-20.03.2002. Hannover: EFB, 2002
- [165] Vahl, M.; Novotny, S.; Celeghini, M.; Kreis, O.: Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren - Technologie für den modernen Leichtbau. In: Vollertsen, F.; Kleiner, M. (Hrsg.): Idee - Vision - Innovation. Bamberg: Meisenbach, 2001, S. 449-462
- [166] Celeghini, M.; Kreis, O.: Integrierte Fertigung durch Umformen, Trennen und Fügen in einem IHU-Werkzeug. In: Geschlossene Prozessketten vom Halbzeug zum Bauteil, 8. Sächsische Fachtagung Umformtechnik, Freiberg, 04.-05.11.2001. Freiberg: TU Bergakademie Freiberg, 2001, S. 296-313
- [167] DIN EN ISO 9000, Ausgabe: 2000-12: Qualitätsmanagementsysteme, Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth, 2000
- [168] REFA - Methodenlehre der Betriebsorganisation, Planung und Steuerung. Teil 1-3. München, Wien: Carl Hanser, 1991
- [169] Geiger, M.; Otto, A.; Hofmann, A.; Kreis, O.; Celeghini, M.: Verkürzte Prozessketten in der Blechumformung. In: Geiger, M.; Ehrenstein, G.W. (Hrsg.): Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile. Tagungsband zum 1. Berichtskolloquium des SFB 396, Nürnberg, 24-25.05.2000. Bamberg: Meisenbach, 2000, S.147-165
- [170] Vermeulen, M.; Hertschap, K.; Siegert, K.; Schwager, A.: Prüfung der Umformbarkeit von Blechen für die Hydroumformung. In: Siegert, K. (Hrsg.): Hydroumformung von Rohren, Strangpreßprofilen und Blechen, Band 2. Vortragstexte der Internationalen Konferenz Hydroumformung, Fellbach, 06.-07.11.2001. Frankfurt/M.: MAT-INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2001, S. 465-488
- [171] Nagel, M.: Innovativer Lasereinsatz bei der Werkstoffbearbeitung. In: 14. Aachener Stahlkolloquium, 1999, S. 21-28
- [172] Hornig, J.: Laser - strahlende Zukunftsaussichten beim Schweißen im Karosseriebau. VDI Berichte Nr. 1264. Düsseldorf: VDI, 1996, S. 149-178
- [173] Haferkamp, H.; Bach, F.-W.; Marquering, M.; Kreutzburg, K.; Höfemann, M.: Fügen verzinkter Stahlfeinbleche mit Nd:YAG-Laserstrahlung. Stahl 1995 Nr. 6, S. 26-28

- [174] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement: Strategien, Methoden, Techniken. München, Wien: Carl Hanser, 2. Auflage, 1996
- [175] Bronstein, I.; Semendjajew, K.; Musiol, G.: Taschenbuch der Mathematik. Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 5. Auflage, 2000
- [176] Spur, G.: Stand der Programmieretechnik für Industrieroboter. Werkstatttechnik Sonderheft FTK '88, 1988, S. 474-478
- [177] Kreis, O.; Hein, Ph.: Manufacturing system for the integrated hydroforming, trimming and welding of sheet metal pairs. In: Geiger, M.; Kals, H.J.J.; Shirvani, B.; Singh, U.P. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Sheet Metal (She'Met) '99, Erlangen, 27.-28.09.1999. Bamberg: Meisenbach, 1999, S. 599-606
- [178] Kreis, O.; Hein, Ph.: Manufacturing system for the integrated hydroforming, trimming and welding of sheet metal pairs. Journal of Materials Processing Technology 115 (2001), S. 49-54
- [179] Geiger, M.; Kreis, O.; Vahl, M.: Laser assisted tooling in metal forming. In: Kuzman, K.; Balic, J. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Conference on Industrial Tools (ICIT), Ljubljana/Maribor, Slowenien, 18.-22.04.1999, Vol. 1. Celje, Slowenien: TECOS - Slovenian tool and die development centre, 1999, S. 3-14
- [180] DIN 66025-1, Ausgabe: 1983-01: Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, Allgemeines. Berlin: Beuth, 1983
- [181] Technische Information Laserbearbeitung TLF-Laser: Grundlagen, Aufbau und Einsatz, Trumpf Haas Laser GmbH + Co. KG, Schramberg, 2000
- [182] DIN EN ISO 11146, Ausgabe: 1999-09: Laser und Laseranlagen, Prüfverfahren für Laserstrahlparameter-Strahlabmessungen, Divergenzwinkel und Strahlpropagationsfaktor. Berlin: Beuth, 1999
- [183] Betriebsanleitung Prometec Laserscope UFF 100, Prometec GmbH, Aachen, 1990
- [184] Betriebsanleitung Coherent Labmaster LM5K, Coherent Deutschland GmbH, Dieburg, o.J.
- [185] DIN 53018-1, Ausgabe: 1976-03: Viskosimetrie, Messung der dynamischen Viskosität newtonscher Flüssigkeiten mit Rotationsviskosimetern, Grundlagen. Berlin: Beuth, 1976
- [186] Daten- und Sicherheitsdatenblatt Oemeta IHV-36 / VP 411, Oemeta Chemische Werke GmbH, Uetersen, 2000
- [187] DIN 51562-1, Ausgabe: 1999-01: Viskosimetrie, Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimeter, Teil 1: Bauform und Durchführung der Messung. Berlin: Beuth, 1999
- [188] Daten- und Sicherheitsdatenblatt Zeller+Gmelin Multidraw KTL N 16, Zeller+Gmelin GmbH & Co, Eisligen/Fils, 2001

- [189] Daten- und Sicherheitsdatenblatt Oemeta HF-AS, Oemeta Chemische Werke GmbH, Uetersen, 1996
- [190] DIN EN 10130, Ausgabe: 1999-02: Kaltgewalzte Flacherzeugnisse aus weichen Stählen zum Kaltumformen, Technische Lieferbedingungen. Berlin: Beuth, 1999
- [191] Fischer, U.; e.a.: Tabellenbuch Metall. Wuppertal: Europa-Lehrmittel, 41. Auflage, 1999
- [192] Anders, M.; Bethke, U.; Päthe, D.; Wahl, R.: Der Nd:YAG in Höchstform. Welche Problemstellungen beim Schweißen und Härten im Automobilbau auftauchen und wie sie sich mit Multi-kW-Nd:YAG-Lasern lösen lassen. Laser-Praxis 1995 Nr. 10, S. 80-82
- [193] DIN EN 10002-1, Ausgabe: 2001-12: Metallische Werkstoffe, Zugversuch, Teil 1: Prüfverfahren (bei Raumtemperatur). Berlin: Beuth, 2001
- [194] Betriebsanleitung für Hochfrequenzpulsatoren HFP 5100, Roell Amsler Prüfmaschinen GmbH & Co KG, Gottmadingen, 1994
- [195] Domke, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. Düsseldorf: Cornelsen, 10. Auflage, 1994
- [196] Pöhlandt, K.: Vergleichende Betrachtung der Verfahren zur Prüfung der plastischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe, Dissertation, Universität Stuttgart. Berlin, e.a.: Springer, 1984 [Berichte aus dem Institut für Umformtechnik, Nr. 80]
- [197] Imhoff, R.; Behler, K.; Gatzweiler, W.; Beyer, E.: Laser beam welding in car body making. In: Proceedings of the 5th international conference Lasers in Manufacturing, München, 1988, S. 247-258
- [198] Benecke, R.: Beitrag zum Laserstrahlschweißen von Stahlwerkstoffen im Feinblechbereich mit CO₂-Hochleistungslasern. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, Nr. 301. Düsseldorf: VDI, 1993
- [199] Pfeifer, T.; Leutner, D. (Hrsg.): Qualitätsmanagement multimedial vermitteln. Entwicklung, Gestaltung und Einsatz computerbasierter Lernmedien. Berlin, e.a.: Springer, 1997
- [200] Glowalla, U.: Evaluation computerunterstützten Lernens. In: Glowalla, U.: Hypertext und Multimedia: Neue Wege in der computerunterstützten Aus- und Weiterbildung. Berlin, e.a.: Springer, 1992
- [201] Hallmann, M.: Prototyping komplexer Softwaresysteme: Ansätze zum Prototyping. Stuttgart: Teubner, 1990
- [202] Görner, C.; Machate, J.: Do's and Don'ts. Vom Umgang mit Java look and feel design guidelines. Java Magazin 2000 Nr. 11, S. 43-52
- [203] Hesse, F.; Garsoffky, B.; Hron, A.: Interface-Design für computerunterstütztes kooperatives Lernen. Deutsches Institut für Fernstudienforschung an der Universität Tübingen, 1995

- [204] Hofmann, A.: Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen, Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach, 2002 [Geiger, M.; Feldmann, K. (Hrsg.): Reihe Fertigungstechnik, Erlangen, Band 128]
- [205] Weckenmann, A.; Bettin, V.; Stöber, R.; Niemann, H.; Deventer, R.: Modellierungsverfahren zur Regelung und Qualitätsoptimierung verkürzter Prozessketten. In: Geiger, M.; Ehrenstein, G.W. (Hrsg.): Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile. Tagungsband zum 1. Berichtskolloquium des SFB 396, Nürnberg, 24-25.05.2000. Bamberg: Meisenbach, 2000, S. 51-68
- [206] Weckenmann, A.; Bettin, V.; Stöber, R.; Niemann, H.; Deventer, R.: Modellierungsverfahren zur Optimierung und Regelung verkürzter Prozessketten. In: Redecker, G. (Hrsg.): Qualitätsmanagement für die Zukunft - Business Excellence als Ziel. Bericht zur GQW-Jahrestagung 2001. Aachen: Shaker, 2001, S. 109-124 [Berichte zum Qualitätsmanagement, Band 3]
- [207] Deventer, R.; Denzler, J.; Niemann, H.: Non-linear modeling of a production process by hybrid Bayesian Networks. In: Horn, W. (Hrsg.): Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence, Berlin, 20.-25.08.2000. Amsterdam, Niederlande: IOS Press, 2000, S. 576-580
- [208] Deventer, R.; Denzler, J.; Niemann, H.: Control of Dynamic Systems Using Bayesian Networks. In: de Barros, L.N.; e.a. (Hrsg.): Proceedings of the IBERAMIA/SBIA Workshops, Atibaia, São Paulo, 19.-22.11.2000. São Paulo, Brasilien: Tec Art, 2000, S. 33-39

Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

| Name | Einheit | Bedeutung |
|---------------------|--------------------|---|
| A | mm ² | Bestrahlte Fläche |
| A ₀ | mm ² | Bestrahlte Fläche im Fokus bei senkrechter Bestrahlung |
| a | m/s ² | Beschleunigung |
| a _{max} | m/s ² | Maximale Beschleunigung |
| b | mm | Probenbreite |
| AH | | Hauptausgangsgröße |
| AN | | Nebenausgangsgröße |
| d | mm | Blechdicke |
| d ₀ | mm | Durchmesser des Laserstrahls im Fokus bei senkrechter Bestrahlung |
| d _{0N} | mm | Soll-Durchmesser des Laserstrahls im Fokus bei senkrechter Bestrahlung |
| d _L | mm | Linsendurchmesser |
| E | | Eingangsgröße |
| E _B | mm | Blecheinzug |
| F | mm | Defokussierung des Laserstrahls |
| f | mm | Brennweite einer Bearbeitungsoptik |
| F _{max} | kN oder N | Maximale Zugkraft beim Zugversuch |
| F _{ax} | kN | Axialkraft beim IHU von Hohlprofilen |
| F _N | kN | Niederhalterkraft einer Presse |
| F _P (t) | kN | Zugkraft im Dauerschwingversuch (Pulsator) |
| h _{min} | mm | Tragende Nahttiefe bei der Stirnflachnaht bzw. Nahtbreite bei der I-Naht |
| I | kW/mm ² | Leistungsdichte der Laserbestrahlung im Fokus bei senkrechter Bestrahlung |
| I ₀ | kW/mm ² | Leistungsdichte im Fokus |
| I _{0,A} | kW/mm ² | Leistungsdichte im Fokus bei einem Anstellwinkel $\alpha_A=30^\circ$ |
| I _R | kW/mm ² | Leistungsdichte bei einer Defokussierung in Größe der Rayleighlänge |
| I _{R,0} | kW/mm ² | Leistungsdichte bei Fokusabstand z _R und senkrechter Bestrahlung |
| I _{R,A} | kW/mm ² | Leistungsdichte bei Fokusabstand z _R und Anstellwinkel $\alpha_A=30^\circ$ |
| i | | Zähler |
| K0 / K1 | | Proben ohne / mit Kontamination |
| l | mm | Koordinate der L-Achse |
| l _{erf} | mm | Erforderlicher Anstellweg |
| N | mm | Nahtversatz |
| n | | Anzahl der Versuchsproben für eine Einstellung bzw. Anzahl der Roboterachsen |
| P | % | Porenvolumen |
| P _L | kW | Laserleistung |
| P _{L, max} | kW | Maximale Laserleistung |

| | | |
|-----------------------------|--------------------------|--|
| P_{LN} | kW | Lasernennleistung |
| p | bar | Innendruck beim IHU |
| R | mm | Abstand der Mittelpunkte von Drehtisch und Drehkranz |
| R_a | μm | Mittenrauhwert der Blechoberfläche |
| R_m | N/mm^2 | Zugfestigkeit |
| r_0 | mm | Radius des Laserstrahls im Fokus bei senkrechter Bestrahlung |
| r_A | mm | Max. Ellipsenradius des Laserstrahls im Fokus bei Bestrahlung mit Anstellwinkel $\alpha_A=30^\circ$ |
| S | kJ/m oder KWmin/m | Streckenenergie |
| s | μm oder mm | Einschweißtiefe |
| t | s | Zeit |
| t_{erf} | s | Erforderliche Zeit für eine Drehung der A-Achse |
| v | m/min | Vorschubgeschwindigkeit des TCP |
| v_{max} | m/min | Maximal mögliche Vorschubgeschwindigkeit des TCP |
| v_s | m/min | Soll-Vorschubgeschwindigkeit des TCP |
| x | mm | Koordinate der X-Achse |
| y | mm | Koordinate der Y-Achse |
| z | mm | Koordinate der Z-Achse |
| z_R | mm | Rayleighlänge |
| Θ | Grad | Divergenzwinkel |
| α | Grad | Koordinate der A-Achse |
| α_A | Grad | Anstellwinkel zur Senkrechten beim Laserstrahlschweißen |
| $\alpha_{A, \text{max}}$ | Grad | Maximal zulässiger Anstellwinkel |
| $\dot{\alpha}$ | Grad/s | Geschwindigkeit der A-Achse |
| $\dot{\alpha}_{\text{max}}$ | Grad/s | Maximale Geschwindigkeit der A-Achse |
| $\ddot{\alpha}$ | Grad/s ² | Beschleunigung der A-Achse |
| β | Grad | Koordinate der B-Achse |
| λ | μm | Wellenlänge eines Lasers |
| CAD | | Computer Aided Design |
| CNC | | Computer Numerical Control |
| CO ₂ -Laser | | Laser mit gasförmigem Kohlendioxid als laseraktives Medium |
| HTML | | Hypertext Markup Language |
| IHU | | Innenhochdruck-Umformen |
| NC | | Numerical Control |
| Nd:YAG-Laser | | Festkörperlaser mit in Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall dotierten Neodymionen als laseraktives Medium |
| SPS | | Speicherprogrammierbare Steuerung |
| TCP | | Tool Center Point |

Anhang

Bild A-1 zeigt die Außengeometrie des Bauteilflansches nach dem Scherschneiden, die der zu schweißenden Bahn entspricht (vergleiche Bild 5-1). Die Außenmaße der Kavität betragen 240,0 mm x 360,0 mm. Infolge eines notwendigen Schnittspaltes von 0,1 mm vergrößern sich die Außenmaße für den Bauteilflansch auf die angegebenen Werte.

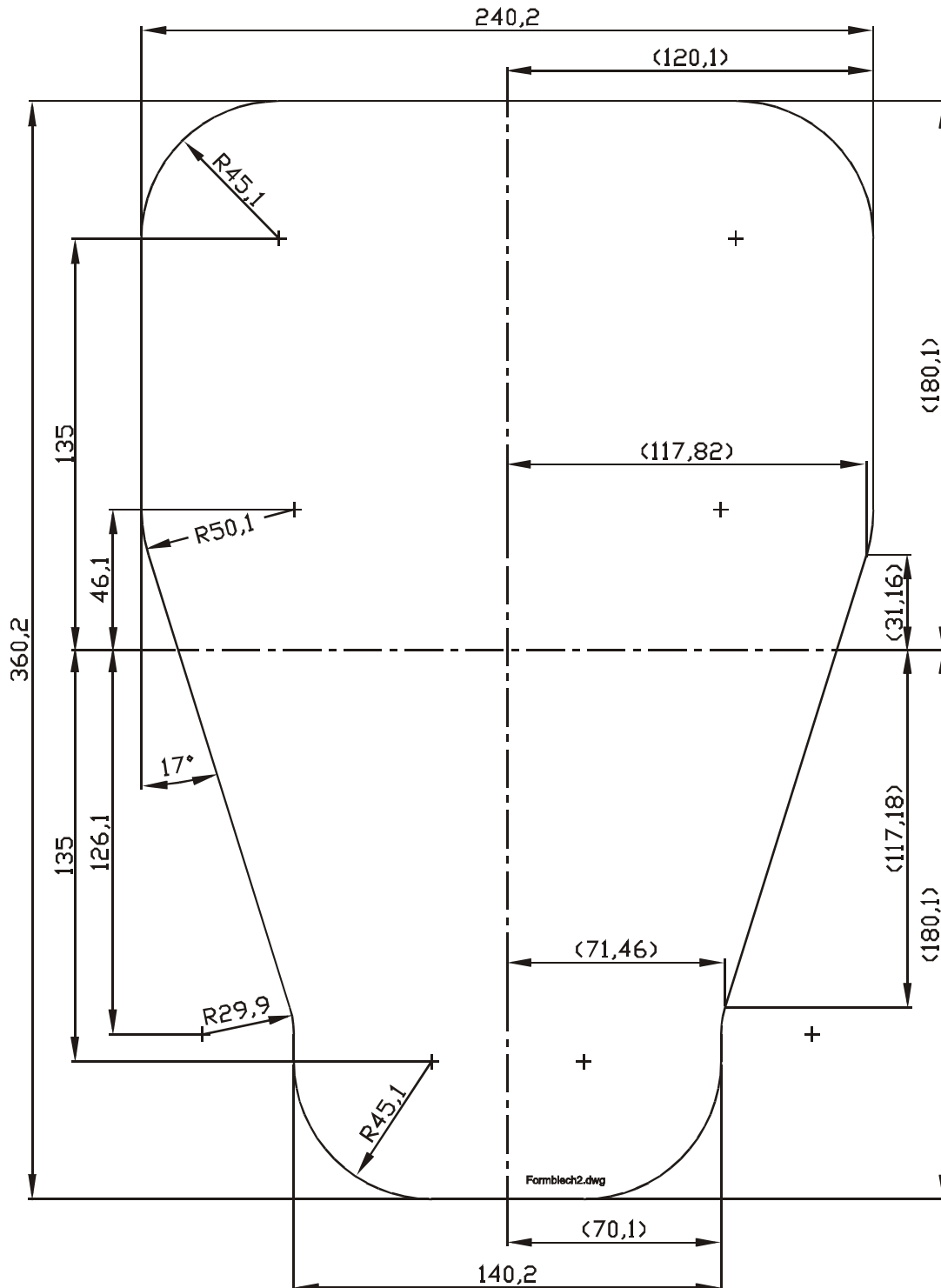


Bild A-1: Flanschkontur des Bauteils nach dem mechanischen Scherschneiden (CAD)

Reihe Fertigungstechnik - Erlangen

www.mb.uni-erlangen.de/diss

Band 1 - 52
Carl Hanser Verlag, München

ab Band 53
Meisenbach Verlag, Bamberg
45,-- Euro

Band 1: Andreas Hemberger
**Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion
durch wissensbasierte Systeme**
208 Seiten, 107 Bilder. 1988.

Band 2: Detlef Classe
**Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte**
194 Seiten, 70 Bilder. 1988.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tabelle. 1989.

Band 4: Karsten Schlüter
**Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen
durch den Einsatz der Simulationstechnik**
177 Seiten, 97 Bilder. 1989.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
168 Seiten, 46 Bilder. 1989.

Band 6: Rudolf Nuss
**Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität
im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden**
206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tabellen. 1989.

Band 7: Wolfgang Scholz
**Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen**
194 Seiten, 89 Bilder. 1989.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
**Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens
von Hartmetall-Fließpreßmatrizen**
179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tabellen. 1989.

Band 9: Rainer Eisele
**Konzeption und Wirtschaftlichkeit
von Planungssystemen in der Produktion**
183 Seiten, 86 Bilder. 1990.

Band 10: Rolf Pfeiffer
**Technologisch orientierte Montageplanung
am Beispiel der Schraubtechnik**
216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tabellen. 1990.

Band 11: Herbert Fischer
**Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätssteigerung
der rechnerintegrierten Teilefertigung**
201 Seiten, 82 Bilder. 1990.

- Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
- Band 13: Frank Vollertsen
**Pulvermetallurgische Verarbeitung
eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls**
XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tabellen. 1990.
- Band 14: Stephan Biermann
**Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik
für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern**
VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tabellen. 1991.
- Band 15: Uwe Geißler
**Material- und Datenfluß
in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle**
124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tabellen. 1991.
- Band 16: Frank Oswald Hake
**Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems
für automatisierte Montagezellen**
XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
- Band 17: Herbert Reichel
**Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung**
198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tabellen. 1991.
- Band 18: Josef Scheller
**Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen
für rechnergeführte Montagezellen**
198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
- Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumformen mit elastischer Matrize
166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tabellen. 1991.
- Band 20: Joachim Schmid
**Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern**
XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tabellen. 1991.
- Band 21: Egon Sommer
**Multiprozessorsteuerung für kooperierende
Industrieroboter in Montagezellen**
188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
- Band 22: Georg Geyer
**Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten
in der Montage**
192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
- Band 23: Rainer Flohr
**Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik
in der Oberflächenmontage (SMT)**
186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
- Band 24: Alfons Rief
**Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung**
VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 1991.
- Band 25: Christoph Thim
**Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen
in der Elektronikmontage durch Simulation**
188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
- Band 26: Roland Müller
**CO₂-Laserstrahlschneiden
von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen**
141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tabellen. 1992.
- Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
195 Seiten, 76 Bilder. 1992.

- Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
- Band 29: Peter Hoffmann
**Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und –schweißen :
Prozessführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung
von Blechformteilen**
186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tabellen. 1992.
- Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
- Band 31: Hubert Reinisch
**Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen**
XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
- Band 32: Brigitte Bärnreuther
**Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens
von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen**
XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
- Band 33: Joachim Hutfless
**Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage**
175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tabellen. 1993.
- Band 34: Uwe Günzel
**Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative
und strategische Probleme der Produktionsplanung und –steuerung**
XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tabellen. 1993.
- Band 35: Bertram Ehmann
**Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung
auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung**
XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
- Band 36: Harald Kolléra
**Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems
für das Laserstrahlschneiden**
129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tabelle. 1993.
- Band 37: Stephanie Abels
**Modellierung und Optimierung von Montageanlagen
in einem integrierten Simulationssystem**
188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
- Band 38: Robert Schmidt–Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tabellen. 1993.
- Band 39: Norbert Lutz
**Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe
mit XeCl-Excimerlaserstrahlung**
187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tabellen. 1994.
- Band 40: Konrad Grampp
**Rechnerunterstützung bei Test und Schulung
an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien**
178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
- Band 41: Martin Koch
**Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung
in der Investitionsgüterindustrie**
169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
- Band 42: Armin Gropp
**Anlagen- und Prozeßdiagnostik
beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser**
160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tabellen. 1995.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tabellen. 1995.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
180 Seiten, 101 Bilder. 1995.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tabellen. 1995.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
144 Seiten, 75 Bilder. 1995.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
156 Seiten, 62 Bilder. 1995.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
144 Seiten, 96 Bilder. 1995.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tabellen. 1995.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tabellen. 1995.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tabellen. 1996.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tabelle. 1996.
ISBN 3-87525-070-2

Band 54: Thomas Rebhan
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern – Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-075-3

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-074-5

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mit kooperierenden Robotern
188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-076-1

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tabellen. 1996.
ISBN 3-87525-079-6

- Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-080-X
- Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-081-8
- Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-082-6
- Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7
- Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-083-4
- Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2
- Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-086-9
- Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tabelle. 1997.
ISBN 3-87525-089-3
- Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programoptimierung
168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5
- Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenwickeln
186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3
- Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-093-1
- Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-094-X
- Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-095-8

Band 71: Michael Steber

**Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen
in der automatisierten Montage**

168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-096-6

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tabellen. 1997.
ISBN 3-87525-097-4

Band 73: Volker Franke

**Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung**

143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2

Band 74: Herbert Scheller

**Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte
Produktgestaltung elektronischer Baugruppen**

184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-099-0

Band 75: Arthur Meßner

**Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile
– Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung**

164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-100-8

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-101-6

Band 77: Michael Schwind

**Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften
von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren**

124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-102-4

Band 78: Manfred Gerhard

**Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung
der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen**

179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-103-2

Band 79: Elke Rauh

**Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe**

192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-104-0

Band 80: Sorin Niederkorn

**Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung
bei umformtechnischen Prozessen**

99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-105-9

Band 81: Stefan Schubert

**Regelung der Fokusslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern
unter Einsatz von adaptiven Optiken**

140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-106-7

Band 82: Armando Walter Colombo

**Development and Implementation of Hierarchical Control Structures
of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets**

216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1

Band 83: Otto Meedt

**Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling
durch flexible Demontagetchnologien und optimierte Produktgestaltung**

186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3

- Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-112-1
- Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tabellen. 1998.
ISBN 3-87525-113-7
- Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8
- Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-115-6
- Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tabelle. 1999.
ISBN 3-87525-116-4
- Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-117-2
- Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-119-9
- Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-120-2
- Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-122-9
- Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver – Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-124-5
- Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1
- Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-127-X
- Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-128-8

Band 97: Gunter Beitinger
**Herstellungs- und Prüfverfahren
für thermoplastische Schaltungsträger**
169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-129-6

Band 98: Jürgen Knoblach
**Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von
Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden**
155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tabellen. 1999.
ISBN 3-87525-130-X

Band 99: Frank Breitenbach
**Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie
elektronischer SMT-Bauelemente**
147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-131-8

Band 100: Bernd Falk
**Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage
für Werkzeuge der Kaltmassivumformung**
134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-136-9

Band 101: Wolfgang Schlögl
**Integriertes Simulationsdaten-Management
für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung**
169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-137-7

Band 102: Christian Hinsel
**Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter
Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung**
130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tabellen. 2000.
ISBN 3-87525-138-5

Band 103: Stefan Bobbert
**Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren**
123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8

Band 104: Harald Rottbauer
**Modulares Planungswerkzeug
zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion**
166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7

Band 106: Thomas Menzel
**Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse**
152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3

Band 107: Thomas Stöckel
**Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene
in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks**
147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-143-1

Band 108: Frank Pitter
**Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen
durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen**
158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-144-X

Band 109: Markus Korneli
**Integration lokaler CAP-Systeme
in einen globalen Fertigungsdatenverbund**
121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-146-6

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern – Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tabellen. 2001
ISBN 3-87525-159-8

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-147-4

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-151-2

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-152-0

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-153-9

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-157-1

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tabellen. 2001.
ISBN 3-87525-156-3

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-164-4

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-165-2

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-166-0

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-175-X

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-183-0

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-181-4

Band 123: Mark Geisel

**Prozeßkontrolle und –steuerung beim Laserstrahlschweißen
mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik**

135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-180-6

Band 124: Gerd Eßer

**Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die MID-Technik**

148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-171-7

Band 125: Marc Fleckenstein

**Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen
elektronischer Kontakte**

159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-170-9

Band 126: Stefan Kaufmann

**Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen
von Silizium für Komponenten der Optoelektronik**

159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-172-5

Band 127: Thomas Fröhlich

**Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente
mit Diodenlaserstrahlung**

143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-186-5

Band 128: Achim Hofmann

**Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen**

113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tabellen
ISBN 3-87525-182-2

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik

129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tabellen. 2002.
ISBN 3-87525-169-5

Band 130: Thomas Pohl

**Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter
Formplatinen aus Aluminiumlegierungen**

133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tabellen. 2002
ISBN 3-87525-173-3

Band 131: Matthias Wenk

**Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die
flexible Sensorführung von Industrierobotern**

167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tabelle. 2002.
ISBN 3-87525-174-1

Band 132: Matthias Negendanck

**Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe
zum Laserstrahlschweißen**

116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tabellen
ISBN 3-87525-184-9

Band 133: Oliver Kreis

**Integrierte Fertigung –
Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und
Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation**

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen
ISBN 3-87525-176-8

Impressum

Kreis, Oliver:

Integrierte Fertigung -

Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation.

Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2002.

Bamberg: Meisenbach, 2002.

Reihentitel ISSN 1431-6226

[Geiger, Manfred; Feldmann, Klaus (Hrsg.): Reihe Fertigungstechnik, Band 133]

167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tabellen. 2002. Kartoniert. ISBN 3-87525-176-8

Erstellt am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (Ordinarius: Prof. Manfred Geiger) des
Instituts für Maschinenbau und Fertigungstechnik

Dissertationsnummer der Technischen Fakultät: 1814

Eingereicht am: 24.06.2002

Tag der mündlichen Prüfung: 19.12.2002

Berichterstatter:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. Manfred Geiger

Prof. Dr.-Ing. Albert Weckenmann

Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Albrecht Winnacker

Homepage:

<http://www.integrierte-fertigung.de>

<http://www.lft.uni-erlangen.de/integrierte-fertigung>

Copyright und Lizenz

Es gelten die auf www.integrierte-fertigung.de zu findenden Lizenzbestimmungen.

ISSN 1431-6226
ISBN 3-87525-176-8