

Automatisiertes und prozessüberwachtes Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

von
MEng Achim Breckweg
aus Recke

Hauptberichter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald, MBA

Tag der Einreichung:	24. Mai 2006
Tag der mündlichen Prüfung:	14. Februar 2007

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2007

IPA-IAO Forschung und Praxis

Berichte aus dem
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und
Automatisierung (IPA), Stuttgart,
Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und
Organisation (IAO), Stuttgart,
Institut für Industrielle Fertigung und
Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart
und Institut für Arbeitswissenschaft und
Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger
und

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

Achim Breckweg

Automatisiertes und prozessüberwachtes Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe

Nr. 453

Dr.-Ing. Achim Breckweg

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. Engelbert Westkämper

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Hans-Jörg Bullinger

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Präsident der Fraunhofer-Gesellschaft, München

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath

ord. Professor an der Universität Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO), Stuttgart

D 93

ISBN (10) 3-939890-06-5, ISBN (13) 978-3-939890-06-5

Jost Jetter Verlag, Heimsheim

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© Jost Jetter Verlag, Heimsheim 2007.

Printed in Germany.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden sein, so kann der Verlag keine Gewähr für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Druck: printsystem GmbH, Heimsheim

Geleitwort der Herausgeber

Über den Erfolg und das Bestehen von Unternehmen in einer marktwirtschaftlichen Ordnung entscheidet letztendlich der Absatzmarkt. Das bedeutet, möglichst frühzeitig absatzmarktorientierte Anforderungen sowie deren Veränderungen zu erkennen und darauf zu reagieren.

Neue Technologien und Werkstoffe ermöglichen neue Produkte und eröffnen neue Märkte. Die neuen Produktions- und Informationstechnologien verwandeln signifikant und nachhaltig unsere industrielle Arbeitswelt. Politische und gesellschaftliche Veränderungen signalisieren und begleiten dabei einen Wertewandel, der auch in unseren Industriebetrieben deutlichen Niederschlag findet.

Die Aufgaben des Produktionsmanagements sind vielfältiger und anspruchsvoller geworden. Die Integration des europäischen Marktes, die Globalisierung vieler Industrien, die zunehmende Innovationsgeschwindigkeit, die Entwicklung zur Freizeitgesellschaft und die übergreifenden ökologischen und sozialen Probleme, zu deren Lösung die Wirtschaft ihren Beitrag leisten muss, erfordern von den Führungskräften erweiterte Perspektiven und Antworten, die über den Fokus traditionellen Produktionsmanagements deutlich hinausgehen.

Neue Formen der Arbeitsorganisation im indirekten und direkten Bereich sind heute schon feste Bestandteile innovativer Unternehmen. Die Entkopplung der Arbeitszeit von der Betriebszeit, integrierte Planungsansätze sowie der Aufbau dezentraler Strukturen sind nur einige der Konzepte, welche die aktuellen Entwicklungsrichtungen kennzeichnen. Erfreulich ist der Trend, immer mehr den Menschen in den Mittelpunkt der Arbeitsgestaltung zu stellen - die traditionell eher technokratisch akzentuierten Ansätze weichen einer stärkeren Human- und Organisationsorientierung. Qualifizierungsprogramme, Training und andere Formen der Mitarbeiterentwicklung gewinnen als Differenzierungsmerkmal und als Zukunftsinvestition in *Human Resources* an strategischer Bedeutung.

Von wissenschaftlicher Seite muss dieses Bemühen durch die Entwicklung von Methoden und Vorgehensweisen zur systematischen Analyse und Verbesserung des Systems Produktionsbetrieb einschließlich der erforderlichen Dienstleistungsfunktionen unterstützt werden. Die Ingenieure sind hier gefordert, in enger Zusammenarbeit mit anderen Disziplinen, z. B. der Informatik, der Wirtschaftswissenschaften und der Arbeitswissenschaft, Lösungen zu erarbeiten, die den veränderten Randbedingungen Rechnung tragen.

Die von den Herausgebern langjährig geleiteten Institute, das

- Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA),
- Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO),
- Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb (IFF), Universität Stuttgart,
- Institut für Arbeitswissenschaft und Technologiemanagement (IAT), Universität Stuttgart

arbeiten in grundlegender und angewandter Forschung intensiv an den oben aufgezeigten Entwicklungen mit. Die Ausstattung der Labors und die Qualifikation der Mitarbeiter haben bereits in der Vergangenheit zu Forschungsergebnissen geführt, die für die Praxis von großem Wert waren. Zur Umsetzung gewonnener Erkenntnisse wird die Schriftenreihe „IPA-IAO - Forschung und Praxis“ herausgegeben. Der vorliegende Band setzt diese Reihe fort. Eine Übersicht über bisher erschienene Titel wird am Schluss dieses Buches gegeben.

Dem Verfasser sei für die geleistete Arbeit gedankt, dem Jost Jetter Verlag für die Aufnahme dieser Schriftenreihe in seine Angebotspalette und der Druckerei für saubere und zügige Ausführung. Möge das Buch von der Fachwelt gut aufgenommen werden.

Engelbert Westkämper Hans-Jörg Bullinger Dieter Spath

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) in Stuttgart.

Mein besonderer Dank gilt den Leitern des Institutes, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Engelbert Westkämper und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Rolf Dieter Schraft, für die Unterstützung und Förderung, die zur erfolgreichen Durchführung dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Mathias Liewald danke ich für die Übernahme des Mitberichtes und die eingehende Durchsicht der Arbeit.

Aus dem großen Kreis der ehemaligen und jetzigen Kolleginnen und Kollegen des Institutes, die mich durch ihre Mitarbeit und konstruktive Kritik unterstützt haben, möchte ich in besonderem Maße Herrn Dr.-Ing. Johannes Wößner, Herrn Dr.-Ing. Walter Schaaf, Frau Dr.-Ing. Andrea Hiller-Brod, Frau Dr.-Ing. Katharina Beumelburg, Herrn Dr.-Ing. Manfred Schweizer, Herrn Klaus Killmann und Frau Luzia Schuhmacher M. A. hervorheben.

Mein Dank gilt auch allen Studenten, Diplomanden und Praktikanten, die an dieser Arbeit mitgewirkt haben. Stellvertretend seien an dieser Stelle Herr Berthold Maucher und Frau Susanne Berner erwähnt.

Ganz besonders danke ich aber meiner Frau Barbara. Durch ihre Geduld und Unterstützung hat sie ganz wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Stuttgart, im Februar 2007

Achim Breckweg

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	13
1 Einleitung	16
1.1 Problemstellung	16
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise	17
2 Ausgangssituation	19
2.1 Begriffe und Definitionen	19
2.2 Stand der Technik beim kraftreduzierten Clinchen	22
2.2.1 Konstruktive Verringerung des Zangengewichts	22
2.2.2 Verfahren zur Reduzierung der Fügekraft	23
2.2.3 Einrichtungen zum Radialfügen	27
2.3 Prozessüberwachung beim umformtechnischen Fügen	28
2.4 Auswertung der Prozessdaten beim Radialclinchen	29
2.5 Folgerungen aus dem Stand der Technik und der Forschung	32
3 Analyse der Fügeaufgabe und Ableitung von Anforderungen an das automatisierte Radialclinchen	33
3.1 Analyse des Produktspektrums und der produktionstechnischen Randbedingungen	33
3.1.1 Analyse des Produktspektrums	34
3.1.2 Analyse der produktionstechnischen Randbedingungen	36
3.2 Analyse des Radialclinchprozesses	37
3.3 Auftretende Mängel im Fügeprozess	39
3.4 Analyse neuronaler Netze für die Prozessfehlerklassifikation beim Radialclinchen	40
3.5 Analyse der Normen für die Untersuchung der Verbindungs- festigkeit beim Clinchen	42
3.6 Automatisierungshemmnisse	43
3.7 Analyse der Einflussfaktoren bei der Gestaltung und dem Einsatz von Anlagen zum automatisierten Radialclinchen	44
3.8 Folgerungen aus der Analyse und den Automatisierungs- hemmnissen sowie Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten	45

3.9	Ableitung von Anforderungen an Gesamtsystem und Teilsysteme zum automatisierten Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe	47
3.9.1	Definition von Teilfunktionen und Zuordnung zu Teilsystemen	47
3.9.2	Anforderungen an das Gesamtsystem	48
3.9.3	Anforderungen an das Fügesystem	49
3.9.4	Anforderungen an das Niederhaltersystem	49
3.9.5	Anforderungen an das Prozessüberwachungssystem	50
3.9.6	Anforderungen an das Bereitstellungs- und Handhabungssystem	51
4	Konzeption von Teilsystemen für das automatisierte Radialclinchen	52
4.1	Lösungsalternativen für Teilsysteme	52
4.1.1	Grundaufbau der Fügeeinrichtung	53
4.1.2	Zangenaufbau	54
4.2	Niederhaltersystem	55
4.3	Erfassung der Prozesskennwerte	56
5	Optimierung der Verbindungsfestigkeit und Ableitung von Wirkzusammenhängen für das Radialclinchen	58
5.1	Versuchsaufbau und Sensorik zur Ermittlung grundlegender Einflussfaktoren auf die Verbindungsfestigkeit	58
5.2	Experimentelle Untersuchung der Verbindungsfestigkeit beim Radialclinchen - Einfluss der Stempelgeometrie auf die Verbindungsfestigkeit beim Radialclinchen	59
5.2.1	Verbindungsfestigkeiten beim Radialclinchen mit einteiliger Matrize	61
5.2.2	Verbindungsfestigkeiten beim Radialclinchen mit mehrteiliger Matrize	64
5.3	Zusammenfassung und Folgerungen aus den Untersuchungen zur Verbindungsfestigkeit	67
5.4	Berechnung der Parameterzusammenhänge zwischen Fügekraft, Fügezeit und Drehzahl	68
5.4.1	Ableitung der Wirkzusammenhänge zwischen Fügekraft, Fügezeit und Drehzahl	68

5.4.2	Experimentelle Verifikation der Zusammenhänge zwischen Fügezeit, Drehzahl und Fügekraft	71
5.5	Folgerungen	72
6	Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für die Fügekraft beim Radialclinchen sowie Verifikation der Ergebnisse	73
6.1	Ermittlung der prozessrelevanten Einflussfaktoren und Eingrenzung grundlegender umformtechnischer Zusammenhänge	73
6.2	Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Fügekraft beim Radialclinchen	75
6.3	Berechnung der Radialclinchgrößen Vorschubgeschwindigkeit, Hubzustellung, Radialkonstante und Kontaktflächenverhältnis	76
6.4	Berechnung des Fügekraftverlaufs beim Radialclinchen	77
6.4.1	Berechnung der Fügekraft in der Fügephase I	77
6.4.2	Berechnung der Fügekraft in der Fügephase II	80
6.5	Berechnung der Auffederung der Fügeeinrichtung und der Niederhalterkraft	85
6.6	Vergleich des theoretisch ermittelten Kraftverlaufs mit experimentellen Untersuchungen	86
6.7	Folgerungen	88
7	Entwicklung einer Prozessfehlerklassifikation auf der Basis von neuronalen Netzen sowie deren Verifikation	89
7.1	Grundlagen und Vorgehensweise	89
7.2	Klassifikation der Fehler beim Radialclinchen	90
7.3	Analyse der Signale für den Radialclinchprozess	92
7.4	Spezifizierung der Ein- und Ausgabevektoren	95
7.5	Verfahren zur Ermittlung der Netzparameter beim Radialclinchen	96
7.6	Parametrisierung der neuronalen Netze	97
7.7	Validierung der Prozessüberwachung und Fehlerklassifikation	98
7.8	Folgerungen	99

8	Realisierung und Erprobung einer Versuchsanlage für das flexibel automatisierte Radialclinchen	101
8.1	Gesamtaufbau der Versuchsanlage	101
8.2	Aufbau der Teilsysteme und Komponenten	102
8.2.1	Handhabungssysteme	102
8.2.2	Bereitstellungssystem	102
8.2.3	Fügewerkzeug zum Radialclinchen	103
8.2.4	Niederhalter	104
8.2.5	Prozessüberwachungssystem	105
8.3	Programmablauf in der Versuchsanlage	106
8.4	Erprobung der Versuchsanlage am Beispiel von Spannbändern für LKW-Kraftstofftanks	107
8.4.1	Arbeitsablauf der Versuchsanlage und Fügeprozess beim Radialclinchen	107
8.4.2	Fügekraftreduzierung	109
8.4.3	Versuchsergebnisse und Verbindungsfestigkeiten	110
8.4.4	Gesamtablaufzeit und Verfügbarkeit der Versuchsanlage	111
8.5	Erkenntnisse und Folgerungen aus der Erprobung	113
9	Zusammenfassung und Ausblick	115
10	Summary	117
11	Literaturverzeichnis	122

Abkürzungen und Formelzeichen

Lateinische Großbuchstaben

A	[%]	Bruchdehnung
A_{ges}	[mm ²]	Stempelgrundfläche
$A_{\text{t,ges}}$	[mm ²]	Kontaktfläche des Stempels bei überlagerter Bewegung
C	[N/mm ²]	Konstante für die Ludwik-Hollomon-Gleichung
C_{Nh}	[N/mm]	Federzahl Niederhalter
C_{Rh}	[-]	Korrekturfaktor hohe Fügegeschwindigkeit
C_{Rm}	[-]	Korrekturfaktor mittlere Fügegeschwindigkeit
C_{Rn}	[-]	Korrekturfaktor niedrige Fügegeschwindigkeit
C_Z	[N/mm]	Federzahl
Diagr.	[-]	Diagramm
F	[N]	Zugkraft
F_C	[N]	Fügekraft
F_Z	[N]	Fügekraft in z-Richtung
F_{max}	[N]	maximale Fügekraft
F_{min}	[N]	minimale Fügekraft
F_{Nh}	[N]	Niederhalterkraft
HV	[-]	Härte nach Vickers
K	[-]	Überlagerungsfaktor
M_{Rot}	[Nm]	Rotationsmoment
P_{id}	[W]	ideelle Umformleistung
P_A	[W]	äußere Leistung
P_R	[W]	Reibleistung
P_S	[W]	Scherleistung
Q_i	[-]	Faktor für die Überlagerung in Phase i
R_m	[N/mm ²]	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	[N/mm ²]	0,2 Prozent Dehngrenze
V	[-]	Verfügbarkeit
W_C	[Nmm]	Arbeit in translatorischer Richtung beim Clinchen
W_{FP}	[Nmm]	Arbeit zur Erstellung eines Fügepunktes
W_{Rot}	[Nmm]	Rotationsarbeit

Lateinische Kleinbuchstaben

a	[N]	Faktor zur Berechnung der Fügekraft
b	[-]	Faktor zur Berechnung der Fügekraft
d_0	[mm]	Außennendurchmesser
d_i	[mm]	Innendurchmesser
d_m	[mm]	Matrizeninnendurchmesser

d_{St}	[mm]	Stempeldurchmesser
d_t	[mm]	Durchsetztiefe
f	[mm]	Hinterschnitt
f_z	[mm]	Auffederung der Clinchzange in z-Richtung
h	[mm]	Punkthöhe
h_S	[mm]	Abstand vom Stempel zum Blech
h_w	[mm]	Hubweg
h_{wmax}	[mm]	maximaler Hubweg
k. A.	[-]	keine Angabe
k	[N/mm ²]	Schubspannung
k_f	[N/mm ²]	Fließspannung
k_{fm}	[N/mm ²]	mittlere Fließspannung
k_{f0}	[N/mm ²]	Fließspannung bei Umformbeginn
k_w	[N/mm ²]	Formänderungswiderstand
k_{wm}	[N/mm ²]	mittlerer Formänderungswiderstand
m_F	[-]	Matrizenform
m_t	[mm]	Matrizentiefe
n	[-]	Verfestigungsexponent
$\bar{n}_\sigma$	[-]	mittlerer Umformfaktor
n_{CP}	[Stück]	Anzahl der Clinchpunkte pro Bauteil
n_{IR}	[Stück]	Anzahl der Industrieroboter
n_{max}	[Stück]	maximale Ausbringung
n_{Nh}	[Stück]	Anzahl Niederhalter
n_r	[Stück]	Rosettenblattzahl
n_{RC}	[1/min]	Drehzahl des Radialgetriebes
n_{Sch}	[Stück]	Schichtanzahl pro Tag
n_{St}	[Stück]	Anzahl der Clinchpunkte bzw. Bauteile
$\bar{p}$	[N/mm ²]	mittlere Druckspannung
r_{St}	[mm]	Stempelradius
r_m	[mm]	Matrizeninnenradius
s	[mm]	Fügeweg
s_F	[-]	Stempelform
$s_{h,i}$	[mm/Umdrehung]	Stempelzustellung in den Phasen i
$s_{St,i}$	[mm]	Stempelweg in der Phase i
t	[mm]	Tangentialkomponente
t_1	[mm]	Einzelblechdicke, stempelseitig
t_2	[mm]	Einzelblechdicke, matrizenseitig
t_b	[mm]	Restbodendicke
t_{Bt}	[s]	Bereitstellungszeit
t_{BewIR}	[s]	Bewegungszeit des Industrieroboters

t_i	[s]	Fügezeit in den Phasen i
t_n	[mm]	Halsdicke
t_{NZ}	[s]	Nebenzeiten
$t_{rück}$	[s]	Stempelrückhubzeit
t_{Sch}	[s]	Zeit pro Schicht
t_{St}	[s]	Fügezeit
t_{vSt}	[s]	Stempeleingriffszeit
t_t	[mm]	Gesamtblechdicke
t_T	[s]	Montagetaktzeit
t_{vor}	[s]	Stempelvorhub
t_{vSt}	[s]	verfügbare Stempeleingriffszeit
$v_{St,i}$	[mm/s]	Fügeschwindigkeit, Phase i
v_{St}	[mm/s]	Fügeschwindigkeit
$v_{St,m}$	[mm/s]	mittlere Fügeschwindigkeit
$v_{St,n}$	[mm/s]	niedrige Fügeschwindigkeit
w_{id}	[N/mm]	bezogene Formänderungsarbeit
z	[-]	Koordinatenrichtung senkrecht zur Blechebene

Griechische Buchstaben

$\dot{\epsilon}_r$	[mm/s]	radiale Verformungsgeschwindigkeit
$\dot{\epsilon}_z$	[mm/s]	axiale Verformungsgeschwindigkeit
$\dot{\epsilon}_\varphi$	[mm/s]	tangentiale Verformungsgeschwindigkeit
α_i	[°]	Berührwinkel in der Phase i
λ	[-]	Kontaktflächenverhältnis
φ	[-]	Logarithmische Formänderung, Umformgrad
φ_R	[rad]	Drehwinkel beim Radialclinchen
σ_{Zmax}	[N/mm ²]	Maximale Axialspannung
η_F	[-]	Formänderungswirkungsgrad
γ	[°]	Stempelwinkel
μ	[-]	Reibkoeffizient
τ_R	[N/mm ²]	Reibschubspannung
τ_{max}	[N/mm ²]	Scherspannung

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die umsatzstärksten Industriezweige des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland sind der Maschinenbau und die Kraftfahrzeugindustrie [Stati04]. Damit zählen blechverarbeitende Industriezweige zu den wirtschaftlichen und technischen Schlüsselindustrien in Deutschland. Im internationalen Wettbewerb wird diese Position durch eine hohe Produktivität und hohe Innovationsdichte gehalten.

Durch neue Werkstoffe wie Magnesiumlegierungen, höher- und höchstfeste Stähle und den verstärkten Einsatz von Klebstoffen und vorbeschichteten Blechen ändern sich auch die Anforderungen an die Verarbeitung der Halbzeuge [Brüd04]. Höher- und hochfeste Stähle werden mit dem Ziel des Karosserieleichtbaus [Schu97] eingesetzt, der zur Senkung des Kraftstoffverbrauchs beiträgt [Brüd03]. Ins Blickfeld geraten dabei die umformtechnischen Fügeverfahren Clinchen und Stanznieten mit Halbhohniet. Gefordert sind flexible Fügeverfahren, mit denen unterschiedliche Werkstoffe gefügt werden und die die Kombination von Fügeverfahren zulassen [Wenz04].

Zur Erfüllung der Qualitätsanforderungen müssen gleichbleibende Verbindungseigenschaften gewährleistet sein [West03]. Hierbei hat das Clinchen als umformtechnisches Fügeverfahren Vorteile gegenüber dem Punktschweißen [Röhr99]. So entstehen beim Fügen durch Clinchen keine giftigen Gase und Schweißspritzer, eine Versprödung des Materials, eine Beschädigung der Werkstückoberfläche aufgrund von Wärmeeintrag tritt nicht auf und eine Vielzahl von Werkstoffen und Blechdicken kann gefügt werden [Mend03, Schr05].

Da die Schweißbarkeit von Aluminium und Aluminiumlegierungen zum Teil eingeschränkt ist [Cape03], gilt das Widerstandspunktschweißen von Aluminium aufgrund der hohen erforderlichen Schweißströme und des Elektrodenverschleißes als anspruchsvoll [Dick98]. Aufgrund der geringen Prozesskosten und der guten Automatisierbarkeit des Clinchprozesses unter industriellen Bedingungen [Muts94] ist das Clinchen in der Industrie weit verbreitet. Dabei wird die Bedeutung von umformtechnischen Fügeverfahren auch in Verbindung mit dem Kleben in Zukunft noch steigen [Mess00, Schr99, Grot05].

Ein wesentliches Hemmnis bei der Anwendung von umformtechnischen Fügeverfahren sind die hohen Fügekräfte [Grot05, Hufe00, Kühn01, Lieb95]. Die Fügekräfte wirken als Reaktionskräfte auf die Fügeeinrichtungen. Um die einwandfreie Qualität der Verbindungselemente zu gewährleisten, müssen die meist als offene Rahmenkonstruktion ausgeführten Fügeeinrichtungen steif ausgelegt sein. Die steife Auslegung führt bei nicht stationären manuellen und automatischen Anwendungen zu schweren und somit schlecht handhabbaren Clincheinrichtungen. Damit die Clincheinrichtungen besser eingesetzt werden können, muss der Kraftbedarf des Fügeprozesses gesenkt werden.

Gleichzeitig ist die Qualität der Fügepunkte vor dem Hintergrund der Vermeidung von Nacharbeit, Ausschuss und haftungsrechtlichen Konsequenzen durch verschärfte Produkthaftung im Produktionsprozess zu gewährleisten [Meye05]. Zur Senkung personal- und kostenintensiver Maßnahmen, wie einer zerstörenden Prüfung oder der Einbringung von Sicherheitsfügepunkten, ist eine Prozessüberwachung notwendig. Diese Prozessüberwachung sollte die Klassifikation von Fehlern ermöglichen, wie sie aus dem Schleifen [Kuhl05] oder Schweißen [Krau00] bekannt ist, um eine fehlerspezifische Strategie verfolgen zu können und die Einbindung in MES-Systeme (Manufacturing-Execution Systems) mit einer schnellen Reaktion auf eintretende Ereignisse zu ermöglichen [Muss05].

1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise

Der Einsatz von flexiblen kraftreduzierten Clinchverfahren erfordert die ganzheitliche Betrachtung des Clinchprozesses sowie die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens. Um die Prozesskräfte für eine Anlagenauslegung ermitteln zu können, ist ein Berechnungsmodell zu entwickeln. Zur Überwachung der Qualität der Clinchung in der Fertigung muss eine Prozessüberwachung entwickelt werden. Zur schnellen Reaktion auf unzulässige Prozesszustände ist eine Fehlerklassifikation notwendig. Ziel der Arbeit ist es daher, grundlegende wissenschaftliche Erkenntnisse zum kraftreduzierten Clinchen zu erarbeiten und die technische Umsetzbarkeit des Prozesses durch die Entwicklung einer Fügeeinrichtung und einer Prozessüberwachung nachzuweisen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind folgende Teilaufgaben zu erfüllen:

- Das wissenschaftliche Erarbeiten fügeaufgabenspezifischer und technischer Einflussfaktoren auf das kraftreduzierte, umformtechnische Fügen mittels Clinchen.
- Die Entwicklung eines Berechnungsmodells für die Fügekraft auf der Basis der umformtechnischen Zusammenhänge bei einem Verfahren zur Kraftreduzierung.
- Die Entwicklung einer Prozessüberwachung mit Fehlerklassifikation.
- Konzeption, Aufbau und Erprobung einer Fügeeinrichtung zum flexibel automatisierten Clinchen mit integrierter Prozessüberwachung für den Nachweis der technischen Umsetzbarkeit.

Hierzu wird zunächst der derzeitige Stand der Technik beim umformtechnischen Fügen und bei Verfahren zur Fügekraftreduktion untersucht. Vielversprechende Ansätze zur Kraftreduzierung beim Clinchen werden ausgewählt und weiterverfolgt. Durch die Analyse von Produkten und Produktspektren, der Fügeaufgabe und der Automatisierungshemmnisse werden die Anforderungen an das Fügesystem identifiziert. Basierend auf diesen Anforderungen werden Lösungsalternativen für Teilsysteme der Fügeeinrichtung und die Prozessüberwachung erarbeitet. Durch eine Optimierung der Fügewerkzeuge mit einem Versuchsaufbau wird die Verbindungsfestigkeit der Clinchverbindungen nachgewiesen.

Weiterführende Untersuchungen ermöglichen die Entwicklung theoretischer Grundlagen für die Modellbildung zur Berechnung der Fügekraft. Auf der Basis der Berechnungen werden die ausgewählten Teilsysteme ausgelegt und zu einem Gesamtsystem integriert. Mit diesem Gesamtsystem wird die Prozessüberwachung mit Fehlerklassifikation entwickelt. Anhand von Versuchen erfolgt die Überprüfung der theoretischen Grundlagen zur Fügekraft und zur Prozessüberwachung mit Fehlerklassifikation. Untersuchungen mit Versuchsbauteilen liefern Aussagen zur Qualität der Verbindungselemente sowie zu erreichbaren Taktzeiten. Die Erprobung erbringt wichtige Hinweise zur Umsetzbarkeit und zu möglichen Weiterentwicklungen.

2 Ausgangssituation

2.1 Begriffe und Definitionen

Begriffe und sachspezifische Ausdrücke sind nur zum Teil in Normen und Richtlinien festgehalten. In dieser Arbeit verwendete Begriffe werden im Folgenden näher erläutert.

Begriffe zur Montage- und Handhabungstechnik

Begriffe aus der Handhabungs-, Montage-, und Fügetechnik sind in der VDI Richtlinie 2860 [VDI 2860] erläutert. Die Begriffe Bereitstellen, Orientieren, Positionieren können ebenfalls [VDI2880], Werkstücktypen und –varianten sowie Flexibilität Cramer [Cram95], entnommen werden. Begriffe wie Industrieroboter, Sensor oder programmierbares Handhabungsgerät werden gemäß den Definitionen in Schraft [Schr76] und Schweizer [Schw78] verwendet.

Begriffe zum Clinchen

Fertigungsverfahren, die einen Zusammenhalt zwischen Werkstoffen schaffen, werden als Fügeverfahren bezeichnet. Diese sind in der DIN 8593-0 systematisiert. Die umformtechnischen Fügeverfahren Durchsetzfügen und Stanznieten, unter das auch das in der Automobilindustrie verbreitete Halbhohlstanznieten fällt, sind seit 1985 in der DIN 8593, Gruppe fünf, in das deutsche Normenwerk aufgenommen. Im Folgenden wird das Clinchen näher betrachtet. Einen Überblick über das Halbhohlstanznieten gibt [Thom03a].

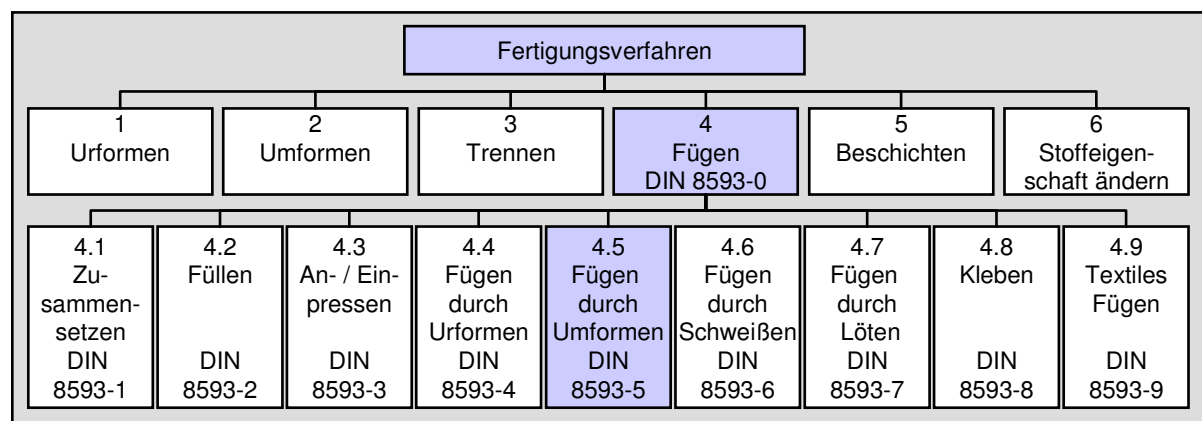


Bild 2-1 Einordnung des Fügens durch Umformen in die Fertigungsverfahren der Gruppe Fügen

Trotz der Festlegung des Begriffes Durchsetzfügen in der DIN 8593 wird in der Fachliteratur und Praxis für das Durchsetzfügen zunehmend der aus dem Englischen stammende Begriff „Clinchen“ verwendet [DIN8593, Hahn00]. Zur einheitlichen Darstellung und besseren Verständlichkeit wird in dieser Arbeit deshalb der Begriff Clinchen verwendet. Weitere Begriffe zum Clinchen und zu geometrischen Kenngrößen werden in Anlehnung an [DVS3420] verwendet. Der Begriff Verbindungsfestigkeit beschreibt die Fähigkeit einer Clinchverbindung, statische oder dynamische Lasten zu ertragen. Die charakteristischen geometrischen Kenngrößen einer Clinchverbindung sind in Bild 2-2 dargestellt.

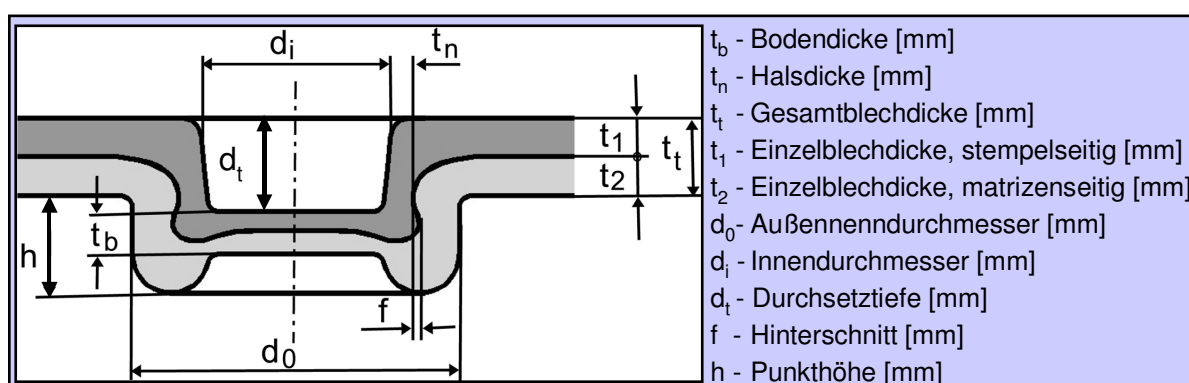


Bild 2-2 Geometrische Kenngrößen einer Clinchverbindung [DVS3420]

Beim Clinchen können einstufige und mehrstufige Verfahren sowie schneidende und nichtschneidende Verfahren unterschieden werden [Klas94]. In der industriellen Praxis konnten sich die mehrstufigen Verfahren in Europa aufgrund der höheren Werkzeugkomplexität nicht durchsetzen [Tan04]. Die schneidenden Verfahren weisen die Nachteile einer möglichen Spanbildung beim Schneidvorgang und damit einhergehender Verunreinigung der Bauteile und Werkzeuge, geringerer fluidischer Dichtigkeit und eine geringere dynamische Festigkeit auf. Weiterhin zeigen schneidend gefügte, oberflächenbehandelte Bleche eine stärkere Korrosionsneigung an den Schnittkanten auf [Beye90]. In der industriellen Praxis haben die einstufigen, runden Clinchelemente eine weite Verbreitung gefunden. Die Verbindungsfestigkeiten für statische Beanspruchungen gleicher Fügwerkstoffpaarungen liegen beim Clinchen bei 30 bis 75 Prozent gegenüber dem Punktschweißen. Clinchverbindungen weisen jedoch höhere Festigkeiten unter dynamischer Belastung auf [Hahn00].

Unter Fügwerkzeug werden Stempel und Matrize verstanden (vgl. Bild 2-3). Diese sind mit dem Niederhalter (stempelseitig) an der Fügezange befestigt. Der Niederhalter soll sicher stellen, dass kein Spalt zwischen den Blechlagen entsteht. Der

Niederhalter verhindert ein Aufbiegen der Fügepartner während des Fügeprozesses und steuert das Nachfließen des Werkstoffs beim Durchsetz- und Stauchvorgang und erleichtert die Ausformung des fertigen Fügeelementes [Schu00]. Zusammen mit dem System zur Erzeugung der Fügekraft und der Prozesssteuerung und -überwachung wird von einer Fügeeinrichtung gesprochen. Fügeeinrichtungen sind sowohl als Handzange, als Einzelplatzeinrichtungen als auch als robotergeführte Einrichtungen am Markt eingeführt. Im Fügeworkzeugbereich werden kleine Störkonturen der Fügeeinrichtungen angestrebt. Eine große Ausladung bzw. eine große Rachenhöhe der Fügezange sowie eine geringe Kopflastigkeit, d. h. ein Fügeeinrichtungsschwerpunkt nah am Roboterflansch sollen realisiert werden, um eine gute Zugänglichkeit zu den Fügstellen und eine gute Handhabbarkeit zu erreichen.

Beispielhafte Fügeabläufe für das konventionelle Clinchen mit translatorischer Stempelbewegung mit einteiliger und mehrteiliger Matrize sind in Bild 2-3 dargestellt.

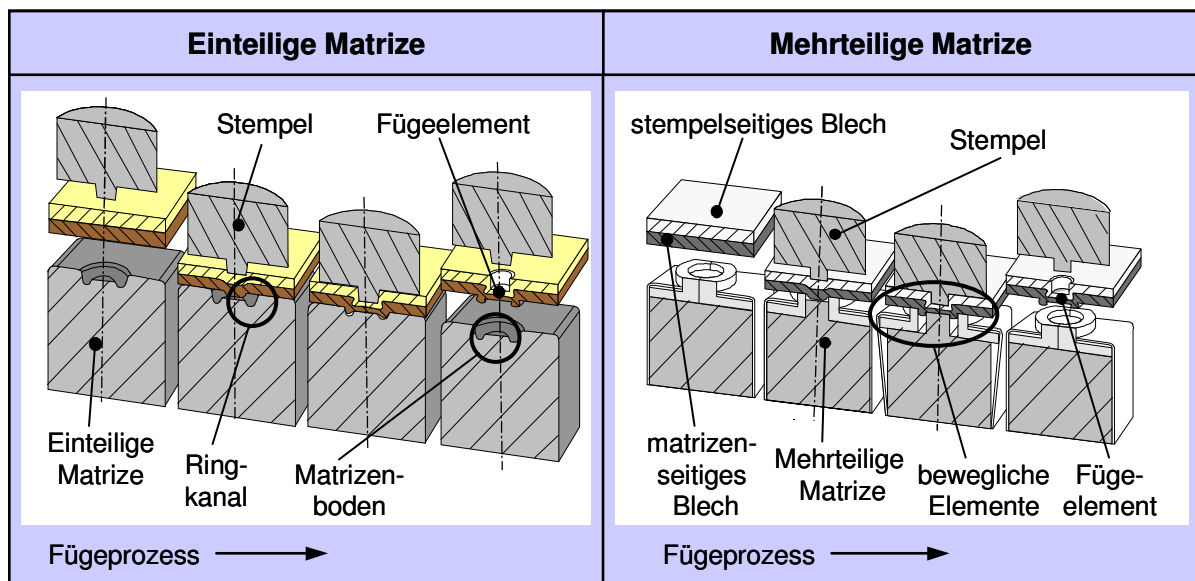


Bild 2-3 Fügeablauf beim konventionellen einstufigen Clinchen mit Rundpunkt und translatorischer konventioneller Fügebewegung des Stempels [Thom02]

Die einteiligen Matrizen werden auch als starr und ungeteilt bezeichnet, während die mehrteiligen auch als beweglich oder geteilte Matrizen bezeichnet werden [Budd89]. Beim Clinchen werden die zu fügenden Blechlagen überlappend positioniert und vor dem Fügevorgang durch einen Niederhalter auf der Matrize fixiert. Das Ausformen des Stempels aus dem Fügeelement kann durch eine Abstreifvorrichtung als Funktionserweiterung des Niederhalters oder durch eine Benetzung der

stempel- und / oder matrizenseitigen Blechlage mit einem Trennmittel (z. B. Wasser-Ethanol-Gemisch) unterstützt werden. Dies ist notwendig bei Werkstoffen, die zu Kaltverschweißungen neigen, wie z. B. Aluminium oder Aluminiumlegierungen. Es können aktive und passive Niederhalter unterschieden werden. Bei aktiven Niederhaltern wird die Niederhalterkraft unabhängig vom Stempelvorschub erzeugt. Bei passiven Niederhaltern wird ein Teil der Vorschubkraft durch Federelemente für das Andrücken verwendet. Im Fügeprozess werden die Blechlagen durch eine Stempelbewegung partiell aus der Blechebene verschoben und miteinander durchgesetzt. Mit dem Aufsetzen des matrizenseitigen Bleches auf dem Matrizenboden (Amboss) setzt ein Stauchvorgang ein. Durch das Stauchen der Fügeteile zwischen Matrizenboden und Stempel fließt der Werkstoff radial nach außen. Beim Clinchen mit ungeteilter Matrize wird der Ringkanal zumindest teilweise gefüllt. Beim Clinchen mit geteilten Matrizen werden die beweglichen Elemente der Matrize nach außen verschoben. Hierbei wird die untere Blechlage so hinter die obere Blechlage verschoben, dass durch einen Hinterschnitt eine nichtlösbare, kraft- und formschlüssige Verbindung entsteht. Die Vorgabe der Bodendicke im Fügeelement bestimmt die Stempelendlage [DVS3420]. Die Qualität einer Clinchverbindung wird durch die Haltekräfte der Verbindung im Belastungsfall beschrieben.

2.2 Stand der Technik beim kraftreduzierten Clinchen

Das konventionelle Clinchen mit translatorischer Stempelbewegung wurde in der Vergangenheit in verschiedenen Untersuchungen auf die Optimierung der Verbindungsfestigkeit unter anderem durch Budde, Hahn, Hübner und Mutschler [Budd89, Hahn00, Hübn05, Muts94] untersucht. Eine Übersicht über Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten gibt [EFB05]. Das Problem der hohen Gewichte von nicht stationären Fügeeinrichtungen wurde durch zwei Ansätze angegangen, die im Folgenden dargestellt werden.

2.2.1 Konstruktive Verringerung des Zangengewichts

Die Qualität der Fügeverbindung ist abhängig von der Ausrichtung von Stempel und Matrize zueinander. Unzureichend steife Fügezangen führen zu einem Winkerversatz, bei ungleicher Steifigkeit des oberen und unteren Armes auch zu einem Lateralversatz der Fügewerkzeuge.

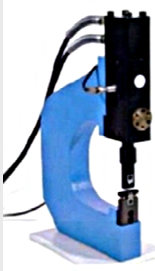
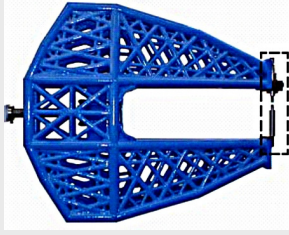
Konventionelle Clinchzange	Fachwerkrahmenzange aus Hohlprofilen	Zange mit CFK-Bandagen u. AL-Schubfeldern	Fachwerkrahmenzange aus Vollmaterial
			
Hersteller: Eckold Ausladung: 200 mm Gewicht: 80 kg Fügekraft: bis 100 kN Krafterzeugung: hydr.	Hersteller: Avdel Ausladung: 850 mm Gewicht: 140 kg Fügekraft: 40 kN Krafterzeugung: hydr.	Hersteller: TU Dresden Ausladung: 850 mm Gewicht: 180 kg Fügekraft: 60 kN Krafterzeugung: hydr.	Hersteller: FlexProp Ausladung: 450 mm Gewicht: 43 kg Fügekraft: 66 kN Krafterzeugung: hydr.
Quellen: [Ecko00, Avde02, Grot05, Hahn04, Schr05], hydr. = hydraulisch			

Bild 2-4 Beispiele einer konventionellen Fügezange und Leichtbauzangen

Konventionelle Clinchzangen werden von Fügeeinrichtungsherstellern mit einem Gewicht von bis zu 180 kg für eine Ausladung von 300 mm und eine Presskraft von 80 kN angeboten [Hall05, Thom02]. In Bild 2-4 sind drei konstruktive Alternativen dargestellt, durch die das Gewicht der Fügezange verringert werden kann. Die Vergleichbarkeit der konstruktiven Alternativen ist allerdings eingeschränkt. Ausladung, Gewicht und Fügekraft der Zangen können verglichen werden, einsatz- und qualitätsrelevante Kennzahlen zur Auffederung, Anzahl der Lastwechsel und Setzungsverhalten können nur durch Bemusterung oder Einsatzerprobung im Einzelfall erarbeitet werden. Das Problem der prozessbedingt hohen Fügekräfte ist mit diesen konstruktiven Ansätzen auf Werkzeugseite noch nicht gelöst, sondern kann nur durch eine Veränderung der Krafteinleitung oder Verringerung der Werkstofffestigkeit erreicht werden.

2.2.2 Verfahren zur Reduzierung der Fügekraft

Bei der prozessbedingten Reduzierung der Fügekräfte bzw. der betragsmäßig gleichen Fügereaktionskräfte können drei Wege beschritten werden. Die Fügereaktionskraft kann durch eine impulsartige Einleitung der Fügekräfte reduziert werden. Durch die schlag- bzw. stoßartige Ausführung mit ein- oder mehrfachem Impuls der Fügebewegung werden die Fügepartner umgeformt. Dabei entstehen stempelseitig kurzzeitig hohe Fügekräfte, die matrizenseitig durch Ausgleichsma-

sen und die Massenträgheit des Werkzeuges aufgenommen werden. Eine weitere Möglichkeit zur Reduktion der Fügekräfte besteht in der partiellen Erwärmung der Fügeworkstoffe und der Herabsetzung der Werkstofffestigkeit. Eine weitere Alternative besteht in der partiellen Einleitung der Fugekraft in die Fügezone, wie sie z. B. aus dem Pressen von Massivteilen [Möss79] oder dem Nieten und Bördeln [Bal04] bekannt ist.

Das „Ein-Impuls-Verfahren“ der Fa. ThyssenKrupp Drautz arbeitet mit sehr hohen Fügegeschwindigkeiten bei der Erzeugung von Halbhohlstanznietverbindungen. Die Stempelgeschwindigkeit wird durch Schub- oder Schussbolzen erzeugt. Anwendungen für das Clinchen sind jedoch nicht bekannt [Lagl04]. Für das von Thoms vorgestellte Verfahren mit elektromagnetischer Impulserzeugung sind ebenfalls noch keine Clinchanwendungen bekannt.

Die Verfahren mit mehrfacher Impulseinleitung gehen auf Entwicklungen der Firmen BMW [DE19701088] und Eckold [DE19747267] zurück. Die Reaktionskraft auf den stempelseitigen Fügeimpuls wird durch die Massenträgheit auf der matrizenseitigen Werkzeugaufnahme aufgebracht. Ein ähnliches Verfahren stellt das „Dyna-Connect-Verfahren“ [Schr05, Schu98] dar. Die impulsförmig eingebrachte Umformkraft wird durch eine federnd gelagerte Matrizenaufnahme schwingungs isoliert. Die dynamischen Reaktionskräfte auf die Fügeeinrichtung werden auf bis zu 5 Prozent reduziert [Schu98]. Trotz der Reduzierung der Fugekraft durch die vorgenannten Verfahren konnten sich diese aufgrund der Lärmentwicklung nicht durchsetzen. Die impulsförmige Krafteinleitung und die Wirkung der Fügepartner als Resonanzkörper erfordern besondere Vorkehrungen. Für das ultraschallunterstützte umformtechnische Fügen sind keine industriellen Anwendungen bekannt. Neben den hohen anlagentechnischen Kosten für die Sonotrode ist die Kraftreduzierung relativ gering und es ist eine Lärmentwicklung durch die eingeleiteten Schwingungen von über 90 db(A) in einigen Frequenzbereichen zu erwarten [Bräu05].

Durch eine Erwärmung der Fügepartner ist aufgrund der Herabsetzung der Zugfestigkeit und Streckgrenze eine Senkung der Prozesskräfte zu erwarten [Lang84]. Allerdings ist die Erwärmung der Bauteile einrichtungstechnisch aufwändig und verursacht zusätzliche Betriebskosten [Thom02a]. Deshalb ist die Verwendung der Erwärmung der Fügepartner besonders für umformtechnisch schwer fügbare Werkstoffe, z. B. Magnesiumknetlegierungen, vorgesehen.

Art der Kraftreduzierung	Impulsförmige Krafteinleitung						Zugfestigk. Fügepartner	Partielle Krafteinleitung		
	Einfacher Impuls		Mehrfachimpuls					Kipp-clinchen	Radial-clinchen	Taumel-clinchen
Bezeichnung Merkmal	Impuls-Nieten	Elektro-Magnetisch	Vorrichtung zum Durchsetz-fügen	"Hit-Clinch"	"Dyna-Connect"	Ultraschall erregter Füge-stempel	Induktive Erwärmung Fügepartner			
Quelle	[Lagl2004]	[Thom04]	[DE19701088]	[DE 1974 7267, Ecko99]	[Schu00, EP890397]	[Bräu05]	[Thom02]	[DE 10140 989]	[DE 19840 780]	[DE 19840 780, Hall05]
Art der Krafterzeugung	Treibsatz	elektrisch	pneum.	pneum.	pneum.	elektrisch	pneum., hydr.	pneum., hydr.	hydr.	hydr.
Bewegung Stempelwerkz.	trans-latorisch	trans-latorisch	trans-latorisch	trans-latorisch	trans-latorisch	trans-latorisch	trans-latorisch	trans-latorisch + Schwenk. in Ebene	trans-latorisch + Rosettenbahn	trans-latorisch + Kegelmantel
Art der Reaktionskraftaufnahme	Massentr. matrizens.	Massentr. matrizens.	Massentr. matrizens.	Massentr. matrizens.	oszillierend schw. matrizens.	konv. WZ	konv. WZ	konv. WZ	konv. WZ	konv. WZ
Reduktion der Fügereaktionskräfte um	k. A.	k. A.	80 %	80 %	95 %	8 - 20 %	40 - 60 %	65 %	70 - 80 %	70 - 90 %
Geräuschentwicklung	sehr hoch	k. A.	sehr hoch	<95 dB(A)	>100 dB(A)	>90 dB(A) ger. - hoch (Abh. Fb.)	gering	gering	gering	gering
Kombination mit Halbhohlstanznieten	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein
Reproduzierbarkeit der Stempelendlage	schwer	schwer	mittel	mittel	mittel	leicht	leicht	leicht	leicht	leicht
Anlagentechnischer Aufwand	hoch	hoch	mittel	mittel	mittel	hoch	hoch	mittel	gering	gering
Prozesszeiten	kurz	kurz	mittel	mittel	mittel	mittel	lang	mittel	mittel	mittel
Kosten pro Fügepunkt	hoch	mittel	geirng	gering	gering	mittel	mittel	gering	gering	gering
Störkonturen	hoch	hoch	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel	mittel
Prozessüberwachung	schwer	schwer	mittel	mittel	mittel	leicht	leicht	leicht	leicht	leicht
Legende:	pneum. = pneumatisch hydr. = hydraulisch konv. WZ = konventionelle Werkzeugaufnahme schw. = schwingend					Abh. Fb. = Abhängig vom Frequenzbereich k. A. = keine Angaben Massentr. = Massenträgheit matrizens. = matrizenseitig				

Bild 2-5 Verfahren zur Kraftreduktion beim umformtechnischen Fügen

Die Kraftreduzierung bei partieller Krafteinleitung beruht auf der Verringerung der wirksamen Kontaktfläche des Stempels mit dem Werkstoff durch spezielle Stempelkinematiken. Hierdurch wird die zur Umformung notwendige Fließspannung nicht über den gesamten Stempelquerschnitt, sondern nur in Teilbereichen aufgebracht (Bild 2-6). Der Werkstofffluss in radialer und tangentialer Richtung wird erleichtert. Die Fügeverfahren mit partieller Krafteinleitung sind als Taumel- oder Radialfügen durch Niet- und Bördelanwendungen bekannt [Bal04, Dunk05]. Für die Reduzierung der Fügekraft beim Clinchen durch die Reduzierung der Kontaktfläche des Stempels stehen mit den Verfahren Radial-, Taumel- und Kippclinchen mit der Bewegung des Stempels auf der Rosettenbahn, auf dem Kegelmantel und dem Kippen des Stempels in einer Ebene insgesamt drei Kinematiken zur Verfügung. Die Spiralbahn spielt aufgrund der höheren Werkzeugkomplexität kaum eine Rolle. Durch

die horizontalen Bewegungsanteile werden bei Presseneinrichtungen (Presskraft >3000 kN) für die Massivumformung hohe Reaktionskräfte eingeleitet, die konstruktiv berücksichtigt werden müssen [Dech82]. Dies ist für Fügeeinrichtungen aufgrund der kleineren Abmessungen und Kräfte nicht bekannt. Das Problem einer Lärmentwicklung ist beim Clinchen mit partieller Krafteinleitung nicht dokumentiert.

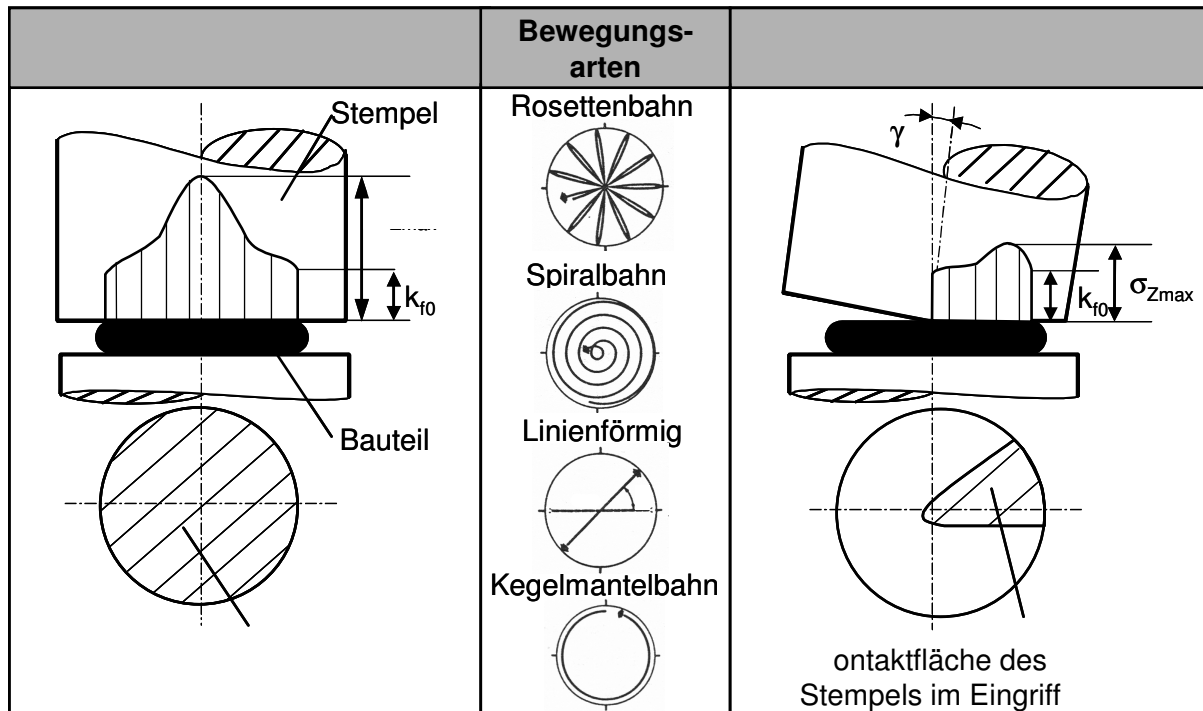


Bild 2-6 Kontaktflächen- und Spannungsvergleich beim konventionellen Pressen und beim Fügen mit überlagelter Bewegung [Scho92]

Das Kippclinchen mit einer linienförmigen Stempelbahn ist aufgrund richtungsabhängiger Fügepunktqualitäten nur eingeschränkt verwendbar. Die Stempelkinematik auf dem Kegelmantel hat den Vorteil einer tendenziell höheren Umformgeschwindigkeit [Scho92] und eines geringeren Bauraums der Stempelaufnahme. Die senkrechte Stempelstellung ist mit der Bewegung auf der Kegelmantelbahn verfahrensbedingt nicht möglich. Beim Nieten mit HalbhohlNieten wird der Niet unsymmetrisch in den Werkstoff eingebracht und eine ausreichende Verbindungsfestigkeit kann nicht gewährleistet werden [Thom03]. Deshalb ist die Bewegung des Stempels auf dem Kegelmantel nicht für das Stanznieten mit HalbhohlNieten einsetzbar und bietet keine Möglichkeit, das kraftreduzierte Clinchen und das HalbhohlStanznieten in der selben Fügeeinrichtung zu kombinieren, um die Fügeeinrichtung flexibel zu gestalten. In der Simulation können konventionelle Clinchprozesse mit guter Genauigkeit abgebildet werden [Hüb05, Klas94, Schm04]. Die Simulation stellt aber auch beim

konventionellen Clinchen keinen vollständigen Ersatz für Versuche dar [Ruth05]. Die Simulation inkrementeller Verfahren ist trotz Kenntnissen der grundsätzlichen Umformvorgänge und der Verfügbarkeit hoher Rechenleistung bisher noch sehr zeitaufwändig [Bamb05, Wohl03].

Im Forschungsbereich sind Arbeiten mit Radialclinchen für einen Flachpunkt bekannt. Bei einem Flachpunkt ist die Matrize nicht profiliert sondern eben. Die Verbindungsfestigkeiten sind jedoch geringer als bei konventionellen Clinchverbindungen [Matt05]. Weiterhin wird durch die Stempelkinematik auf der Rosettenbahn ein homogenerer Werkstofffluss als bei der Stempelkinematik auf dem Kegelmantel bei einem hohen Kraftreduzierungspotential erreicht [Scho92]. Die Rosettenbahn bietet die Möglichkeit zur Verfahrenskombination von Clinchen und Stanznieten im gleichen Werkzeug und damit die Erhöhung der Flexibilität bei gleichzeitiger Reduzierung von Investitionen [Thom02, Brec03]. Das Radialclinchen bietet deshalb das größte Potenzial für eine flexible Verfahrenskombination und wird im Folgenden weiter untersucht.

2.2.3 Einrichtungen zum Radialfügen

Anlagen und Einrichtungen zum Radialfügen werden als Einzelplatzmaschinen vorzugsweise zum Nieten, Bördeln und Verstemmen eingesetzt.

Hersteller Stand: 30.01.06 System-eigenschaften		Fa. Agme, Spanien [www.agme.net]	Fa. Baltec, Schweiz [www.baltec.ch]	Fa. Bodmer Küstnacht, Schweiz [www.bodmer.com]	Fa. D. Friedrich, Schorndorf [www.fmw-friedrich.de]	Fa. Schmid AG, Schweiz [www.schmidpress.com]
Bewegung und Typenbezeichnung		Radial RR - 4 bis RR 20	Radial RNE 081- RNE 481	Radial/ Taumel 3D-Taumel	Radial N510	Radial M125- M1500 Pressen
Radial-fügeprozess	Nieten	ja	ja	ja	ja	nein
	Bördeln	ja	ja	ja	ja	nein
	Verstemmen	ja	ja	ja	ja	nein
	Clinchen	nein	nein	ja	nein	nein
Merkmale	Art der Anlage	stationär	stationär	stationär	stationär	stationär
	Werkstücktransfer	Manuell bzw. automatisiert	Manuell bzw. automatisiert	Manuell bzw. automatisiert	Manuell bzw. automatisiert	Manuell bzw. automatisiert
	Fügekraft bzw. Nietdurchmesser	bis 20 mm Stahl	bis 100 kN	k. A.	bis 40 kN	bis 3000 kN (Massivteile)
	Prozessüberwachung	Kraft-Weg Analyse	Kraft-Weg-Zeit-Analyse	Weg-Druck-Zeit-Analyse	Kraft-Weg-Zeit-Analyse	k. A.

Bild 2-7 Radialfügeeinrichtungen

Ein Pressenhersteller nutzt die Radialbewegung für die Herstellung von Massivformteilen. Eine Nutzung zum Clinchen ist nicht vorgesehen. Mit dem zunehmenden Einsatz von automatisierten Montagesystemen werden Radialfügeeinrichtungen auch in verketteten Montagesystemen eingesetzt. Bild 2-7 gibt einen Überblick über Hersteller, Art und Einsatzgebiete von Einrichtungen zum Fügen mit radial überlagerter Bewegung. Wie aus Bild 2-7 hervorgeht, sind die Radialfügeeinrichtungen ortsfest als Einzelplatzmaschinen aufgebaut oder in verkettete Montagesysteme integriert. Clinchanwendungen werden, bis auf die Darstellung durch die Fa. Bodmer, Küstnacht, nicht beschrieben. Eine flexible Handhabung der Fügewerkzeuge kommt in der betrieblichen Praxis nicht vor.

2.3 Prozessüberwachung beim umformtechnischen Fügen

Bei umformtechnischen Fügeverbindungen ist die Kenntnis über die Einhaltung der Fügeparameter ein wichtiges Qualitätskriterium. Bild 2-8 gibt einen Überblick über Systeme zur Überwachung des Fügeprozesses. Die Systeme werden sowohl für das Clinchen als auch für das Stanznieten eingesetzt. Grundsätzlich kann nach pre-, in- oder postprocess Überwachung unterschieden werden. Die preprocess Überwachung erfordert die Erfassung und Messung sämtlicher relevanten Parameter vor dem Fügeprozess. Sie ist aufwändig und relativ ungenau, da der eigentliche Prozess nicht überwacht wird. Die postprocess Überwachung wie z. B. stichprobenweise Sichtkontrolle der optischen Ausprägung des Fügeelementes und der Messung der Restbodendicke oder der Einsatz von Ultraschall-Burst-Phasen-Thermografie bei Hybridverbindungen [Böhm04] oder Wirbelstrom-Mehrfrequenztechnik [Allw00] deckt fehlerhafte Fügeverbindungen zeitversetzt zur Entstehung auf und benötigt zusätzliche Prüfplätze. Fehler können bis zur Entdeckung und Beseitigung hohe Ausschusskosten verursachen. Die Übersicht zeigt, dass zur Inprocess-Überwachung nur Systeme mit Überwachung des Fügeweges und der Fügekraft im Einsatz sind. Informationen zum Drehmoment des Antriebes für die radiale Bewegung und zur Fügedrehzahl werden nicht überwacht. Prozessschwankungen, die auf Drehmoment und Drehzahl beim Radialclinchen zurückgeführt werden können, sind mit der derzeit eingesetzten Kraft-Weg-Überwachung nicht oder nur schlecht erkennbar. Eine Klassifikation der Fehler wird nicht bzw. nur bedingt durch die Prozessüberwachung geleistet.

Hersteller, Stand: 31.01.2006		Fa. Schmidt Technology, [Cron05]	Fa. Brankamp, Erkrath [www.brankamp.de]	Fa. Promess, Berlin [www.promess.net]	Fa. Tox, Weingarten [www.tox-de.com]	Fa. Wilhelm, Aalen [www.wilhelm- messtechnik.de]	Fa. Burster, Gernsbach [www.burster.de]	GFal, Berlin [www.gfai.de]
System- eigenschaften								
Prozess		Ein- pressen	Clinchen Stanzn.	Taumel- clinchen	Taumel- clinchen	Ein- pressen	Nieten, Clinchen	Clinchen
Messgröße	Fügekraft	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Fügeweg	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja
	Prozessdauer	ja	ja	nein	ja	ja	ja	ja
	Drehmoment	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
	Drehzahl	N.V.	N.V.	nein	ja	N.V.	ja	nein
Art der Auswertung	Auswerte- verfahren	Kraft-Weg Diagr., SPC	Kraft-Zeit Diagr.	Kraft-Weg Diagr.	Kraft-Weg Diagr.	Kraft-Weg Diagr.	Kraft-Weg Diagr.	Kraft- Weg, NN, SF
	Toleranzfenster	ja	ja	ja	ja	ja	ja	k.A.
	Hüllkurven	ja	ja, dHK	ja	ja	ja	ja, G	k.A.
	Prozessfehler Klassifikation	nein	nein	nein	nein	bedingt	nein	nein
Legende: N.V. = Prozessgröße nicht vorhanden G = Gradientenverfahren k.A. = keine Angaben NN = neuronale Netze dHK = doppelte Hüllkurven SF = Statistische Funktionen Stanzn. = Stanznieten SPC = Statistische Prozesskontrolle								

Bild 2-8 Inprocess Prozessüberwachungssysteme

2.4 Auswertung der Prozessdaten beim Radialclinchen

Der Stand der Technik bei den Prozessüberwachungssystemen zeigt, dass die Möglichkeiten der Überwachungssysteme stark von den genutzten Auswerteverfahren abhängen. In Bild 2-9 sind Verfahren zur Auswertung der Prozessdaten dargestellt. Grenzwert-, Hüllkurven-, Toleranzfensterverfahren, Variationen wie Doppelhüllkurvenverfahren oder Kombinationen werden aufgrund ihrer einfachen Integration in den Prozess als Standardverfahren in der Industrie eingesetzt. Beim Grenzwertverfahren wird der Fügeprozess auf die Erreichung eines Maximalwertes überwacht. Beim konventionellen Clinchen wird hierzu die Fügekraft entweder über dem Fügeweg oder über der Fügezeit herangezogen. Bei diesem Vergleich von vorgegebenen Maximalwerten werden in der Praxis oft nicht alle Fehler, die zu mangelbehafteten Verbindungselementen führen, erkannt, da der Verlauf der Fügekraft nicht beachtet wird.

Auswerteverfahren	Grenzwert- verfahren [Muts94, Rich97]	Hüllkurven- verfahren [Bal04, Rich97]	Toleranzfenster- verfahren [Ecko04]	Auswertung mit Neuronalen Netzen [Dick98, Frie99]	Fuzzy- Datenanalyse [Zell94]
Prinzipbild					
Merkmale					
Integration in den Prozess	einfach	einfach	einfach	mittel	mittel
Möglichkeit zur Klassifikation von Prozessfehlern	gering	mittel	mittel	hoch	hoch
Umrüstaufwand	gering	gering	gering	hoch	hoch
Zuverlässigkeit	gering	mittel	mittel	hoch	hoch
Anwendung von präzisen Fehlerfallstrategien	schwierig	schwierig	mittel	einfach	einfach
Empfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse	gering	gering	gering	mittel	mittel

Bild 2-9 Verfahren zur inprocess-Überwachung beim Radialclinchen

Eine Erweiterung der Grenzwertverfahren stellen die Hüllkurvenverfahren dar. Beim Hüllkurvenverfahren wird ein Toleranzband über den Verlauf einer analytisch oder stochastisch ermittelten Kraft-Weg-Kurve gelegt. Der Fügeprozess wird abgebrochen, sobald der tatsächliche Verlauf außerhalb des Toleranzbandes liegt. Beim Toleranzfensterverfahren muss die Fügekraft-Weg-Kurve vorher definierte Bereiche mit charakteristischer Aussagekraft durchlaufen. Auch hier ist die Genauigkeit der Auswertung durch die weite Tolerierung innerhalb der Prozessfenster nicht immer gegeben. Eine enge Toleranzband führt zu einer hohen Fehlermeldungsquote und häufigen Prozessunterbrechungen. Bei einer zu weiten Tolerierung läuft der Prozess ohne Fehlermeldung, selbst bei fehlerhaften Bauteilen. Sowohl häufige Prozessunterbrechungen als auch Ausschuss sind in der betrieblichen Praxis nicht erwünscht.

In Verfahren, die auf Entwicklungen der Künstlichen Intelligenz (KI) zurückgeführt werden können und in der jüngsten Zeit für das Punktschweißen und das Clinchen vermehrt erarbeitet wurden, wird die Auswertung der Prozessdaten durch neuronale Netze und durch Fuzzy-Methoden genutzt [Ahre05, Brec04, Dick98, Krau00, Tan04]. Weitere Verfahren sind Modellbäume, die zwar gut interpretierbar sind, deren Aussagegenauigkeit durch die Zerlegung der Epipede herabgesetzt wird und die Support Vektor Regression, die zwar eine gute Generalisierungsfähigkeit aber einen hohen Lernaufwand erfordern sowie die k-nächste-Nachbarn Regression die

keinen aufwändigen Lernprozess erfordert, allerdings einen hohen Speicher- und Rechenzeitbedarf hat [Voig05].

Künstliche neuronale Netze basieren auf der vereinfachten Nachbildung von Neuronen als einer Art Addierer mit Schwellwertbildung. Die Verbindungen (Synapsen) nehmen eine Aktivierung mit einer bestimmten Gewichtung von anderen Neuronen auf, summieren diese und lassen am Ausgang (Axon) des Neurons eine Aktivität entstehen, sofern die Summe vorher einen Schwellwert überschritten hat. Neuronale Netze sind in der Lage, mehrdimensionale Funktionen zu approximieren. Die Qualität der Schätzung von abgeleiteten Größen durch ein neuronales Netz ist von der Qualität der Approximierung der Schätzfunktion an die wahre Funktion abhängig [Ande97, Bonf95, Brau91]. Für das Radialclinchen kann eine gute Approximation erwartet werden.

Der Vorteil neuronaler Netze liegt darin, dass sie im Aufwand unabhängig von der Komplexität des zu beschreibenden Prozesses sind. Die Klassifikation von Prozesszuständen ist, im Gegensatz zu expliziter Modellierung physikalischer Zusammenhänge, auch dann möglich, wenn die Zusammenhänge zwischen Prozesszuständen und deren Auswirkungen auf die gemessenen Prozessgrößen nicht bekannt und die Wechselwirkungen komplex sind. Der Black-Box-Charakter neuronaler Netze ist ein Nachteil, der keine weitergehende Analyse der Zusammenhänge erlaubt und eine Anpassung auf veränderte Prozessbedingungen erschwert. Daher ist die Übertragbarkeit der Netze auf andere Fügeaufgaben und –einrichtungen eingeschränkt und eine zumindest teilweise Netzneuerstellung notwendig, wie für das Punktschweißen gezeigt wurde [Ahre05]. Die Genauigkeit der Prozessaussagen steigt mit der Anzahl der Musterdatensätze.

Bei der Auswertung mit Fuzzy-Logik werden unscharfe Prozesszustände wie „fast gut“ zugelassen. Ein unscharfer Kennfeldregler basiert auf der linguistischen Formulierung von menschlich abstraktem Wissen über die Funktionsweise eines Prozesses. Der Kennfeldregler bildet die Eingangsgrößen auf der Basis einer unscharfen Prozessbeschreibung anhand von linguistischen Variablen und IF...THEN-Regeln direkt auf die Ausgangsgrößen ab. Das resultierende Kennfeld stellt eine gekrümmte Fläche in einem Raum dar, der durch die Eingangs- und Ausgangsgrößen aufgespannt wird. Die Regeln definieren einzelne Stützpunkte dieser Fläche, die es durch Interpolation so zu vervollständigen gilt, dass auch nicht vorgegebene Eingangswertkombinationen zu eindeutigen Ausgangswerten führen [Zade65,

Mich02]. Die Auswertung mit Fuzzy-Logik beinhaltet daher ebenfalls die Möglichkeit zur Fehlerklassifikation, erfordert aber eine aufwändigere Wissensakquisition [Hafn96]. Eine Prozessfehlerklassifikation für das Clinchen durch diese Verfahren ist nicht bekannt.

2.5 Folgerungen aus dem Stand der Technik und der Forschung

Der Stand der Technik zum Clinchen ist gekennzeichnet durch folgende Merkmale:

- Nichtschneidende, einstufige Verfahrensausprägungen des Clinchens mit runden Verbindungselementen haben die weiteste Verbreitung in der Industrie erfahren.
- Durch eine optimierte Zangengestaltung kann das Problem der hohen Zangengewichte durch die hohen Fügekräfte beim Clinchen nur reduziert, aber nicht gelöst werden.
- Das Radialclinchen bietet ein hohes Kraftreduzierungspotenzial mit der Option zur flexiblen anlagentechnischen Kombination mit dem Halbhohlstanznieten.
- Das flexibel automatisierte Radialclinchen, z. B. mit Handhabungssystemen, kommt in der betrieblichen Praxis nicht vor.
- Für das Radialclinchen sind optimierte Parameter für Stempel- bzw. Matrizen-geometrien nicht bekannt und durch Simulation nicht oder nur eingeschränkt ermittelbar.
- Inprocess-Verfahren zur Prozessüberwachung und Prozessfehlerklassifikation beim Radialclinchen stehen nicht zur Verfügung. Für die Prozessüberwachung und die Fehlerklassifikation ist die Auswertung von Prozesssignalen basierend auf neuronalen Netzen geeignet, da der Radialclinchprozess noch nicht vollständig modelliert ist.

Aufgrund der beschriebenen Erkenntnisse wird in dieser Arbeit im Weiteren das Radialclinchen betrachtet. Dem Werkzeugaufbau, der Werkzeugauslegung, der Sensorik und der Prozessüberwachung kommen dabei die größte Bedeutung zu. Darüber hinaus sind Verfahren zur Fügekraftberechnung und zur Prozessüberwachung zu entwickeln. Zur Definition der Randbedingungen müssen die produktionstechnischen Anforderungen der Fügeaufgaben, zu erreichende Verbindungsfestigkeiten und der Fügeprozess analysiert werden und daraus Anforderungen an ein Radialclinchsystem abgeleitet werden.

3 Analyse der Fügeaufgabe und Ableitung von Anforderungen an das automatisierte Radialclinchen

Die Grundlage für die analytische Ermittlung der Anforderungen bildet eine Anwenderbefragung in Branchen, in denen das Radialclinchen zukünftig eingesetzt werden kann. Aufgrund der dort vorliegenden produkt- und produktionstechnischen Randbedingungen sowie der Automatisierungshemmnisse und -bestrebungen der befragten Firmen ergeben sich die Anforderungen an die Teilsysteme für das Fügen, die Handhabung von Werkstücken und Werkzeugen und die Gestaltung der Prozessüberwachung.

3.1 Analyse des Produktspektrums und der produktionstechnischen Randbedingungen

Zur Ermittlung der wichtigsten Daten beim Radialclinchen und der zukünftigen Entwicklungstendenzen wurde eine Erhebung unter 47 Firmen mit aus Schumann [Schu00a] abgeleiteten Umfrageinstrumentarien durchgeführt.

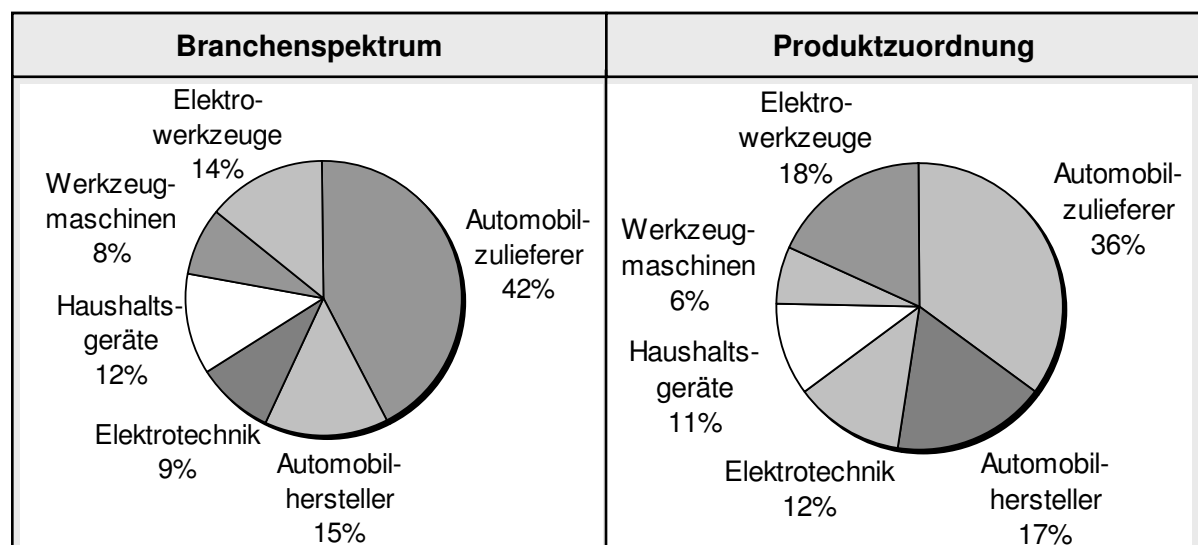


Bild 3-1 Branchenspektrum der befragten Firmen und Produktzuordnung

Im Einzelnen wurden bei der Analyse die folgenden Hauptgebiete betrachtet:

- Produktspektrum,
- Produktionskenngößen,
- Automatisierungshemmnisse und mögliche Fehlerursachen beim Fügeprozess.

3.1.1 Analyse des Produktspektrums

Die Basis für die Ermittlung der produktspezifischen Kenngrößen bildet eine Analyse von 53 repräsentativen unterschiedlichen Produkten aus den untersuchten Branchen. Beispiele von geclinchten Bauteilen zeigt Bild 3-2.



Bild 3-2 Beispiele von geclinchten Bauteilen

Die wichtigsten produktbezogenen Analyseergebnisse sind in den Bildern 3-3 und 3-4 zusammengefasst. Die Analyse der verarbeiteten Blechwerkstoffe zeigt, dass vorzugsweise höherfeste Stahlwerkstoffe (52 Prozent) und normalfeste Stahlwerkstoffe verarbeitet werden.

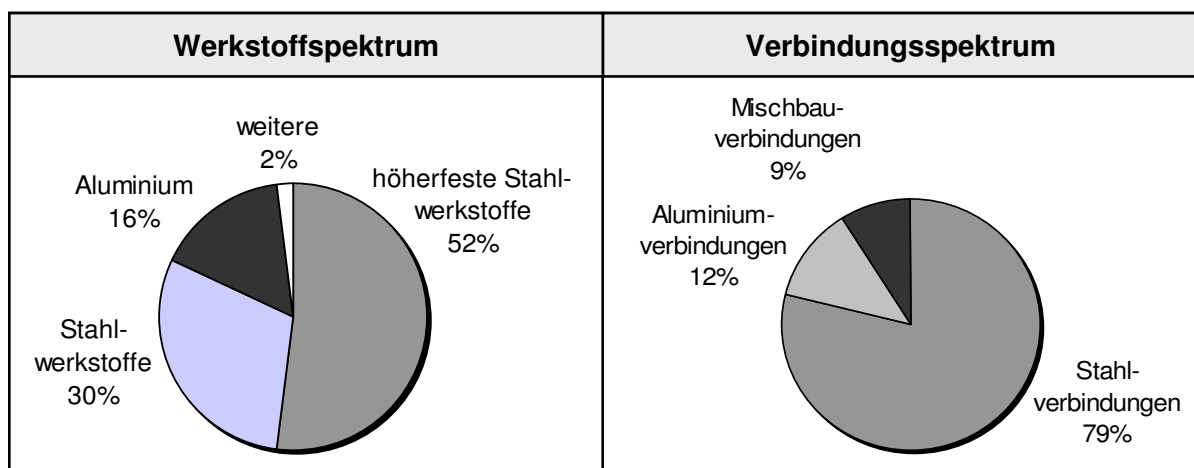


Bild 3-3 Werkstoff- und Verbindungsspektrum der untersuchten Bauteile bei den befragten Firmen

Der Begriff höherfest ist ein nicht genormtes Kurzwort. Blechwerkstoffe mit einer Zugfestigkeit $>300 \text{ N/mm}^2$ werden in der Fachliteratur als höherfest bezeichnet [Hahn00]. Da die Bezeichnung nicht genormt ist und die Verfügbarkeit und der Ein-

satz höherer Festigkeiten von Blechwerkstoffen zunimmt, können sich die Werkstofffestigkeiten, die unter dem Begriff höherfest eingeordnet werden, erhöhen. Aluminium-, Aluminiumlegierungen (16 Prozent) und weitere Werkstoffe wie Kupfer oder Messing spielen eine geringere Rolle (2 Prozent). Der Anteil der reinen Stahlverbindungen liegt bei 79 Prozent und in Mischbauweise mit Stahl bzw. Aluminiumwerkstoffen wird bei 9 Prozent der analysierten Verbindungen gefügt.

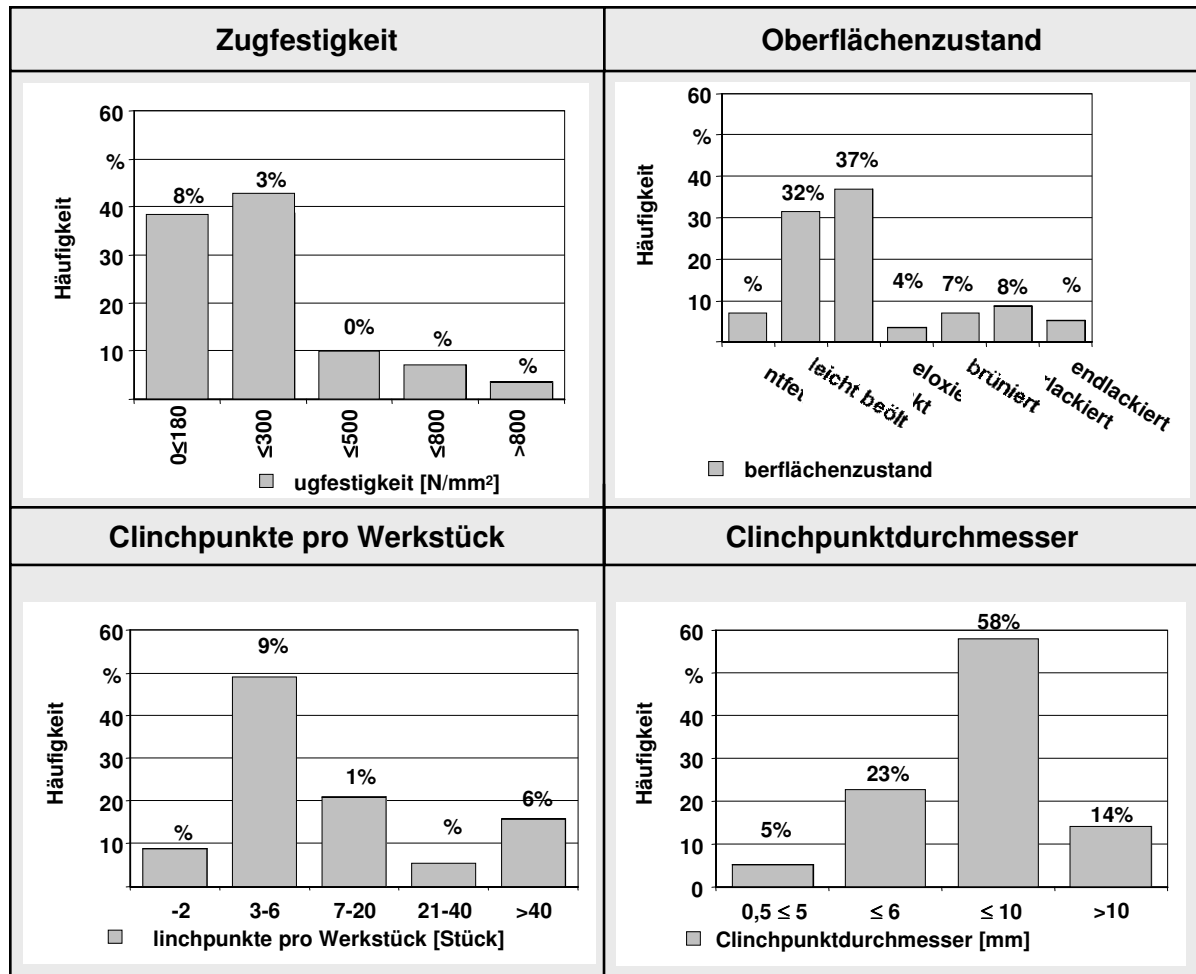


Bild 3-4 Eingesetzte Blechwerkstoffe bei den befragten Firmen

12 Prozent der Verbindungen bestehen aus reinen Aluminiumverbindungen. Die Zugfestigkeit der gefügten Werkstoffe liegt bei 81 Prozent im Bereich bis 500 N/mm². Die Gesamtblechdicken t_t liegen von $t_t = 1$ mm bis $t_t = 6$ mm. Die Dicke der Blechwerkstoffe liegt bei 78 Prozent der untersuchten Produkte im Bereich von 1 bis 2 mm. Für diesen Bereich der Blechdicken und Blechwerkstoffe werden beim konventionellen Clinchen Fügekräfte von 50 kN bis 80 kN benötigt [Hahn00]. Dabei werden oft elektrolytisch verzinkte Werkstoffe eingesetzt. Die Mehrzahl der Bauteile werden mit 3 bis 6 Clinchpunkten gefügt. Die Randabstände der Clinchpunkte lie-

gen im Bereich <300 mm. Die Clinchpunkte werden vorwiegend in horizontaler Lage der Bauteile eingebracht. Die Matrize befindet sich meist unterhalb der Blechlagen.

3.1.2 Analyse der produktionstechnischen Randbedingungen

Im untersuchten Typen- und Stückzahlenspektrum der befragten Firmen wurden 79 Prozent der untersuchten Produkte in Stückzahlen zwischen 100 000 und 1,2 Mio. Stück/Jahr produziert. Dies entspricht Stückzahlen von 300 bis 3.500 pro Tag, einem für den Einsatz von Handhabungssystemen in der Montage geeigneten Stückzahlbereich. Schwankende Variantenzahlen zwischen 5 und 5000 Stück pro Los erfordern den Einsatz flexibler Betriebsmittel.

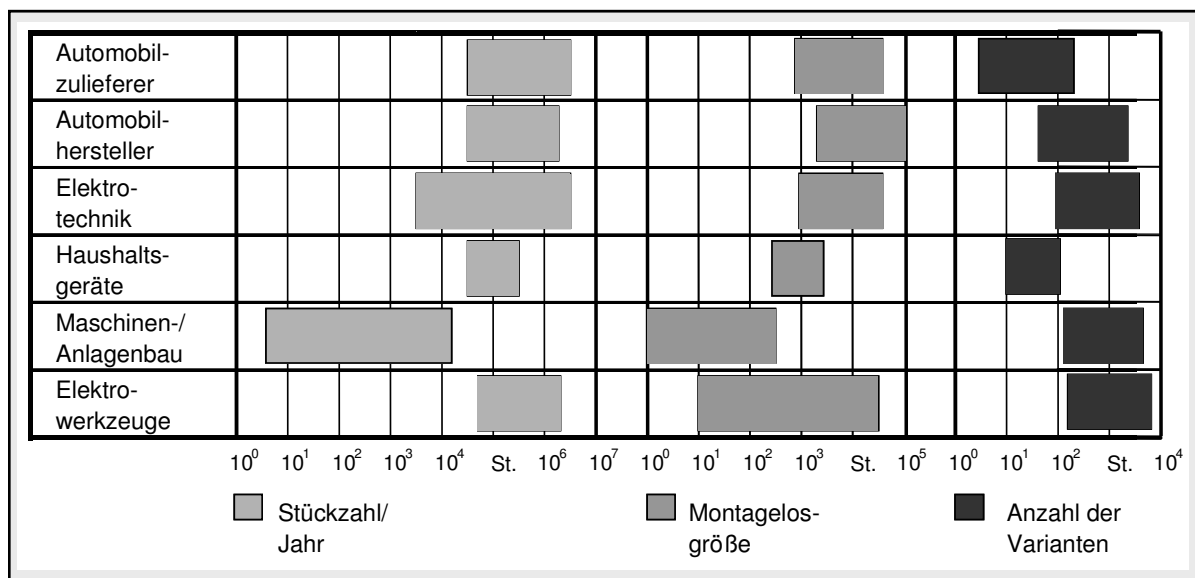


Bild 3-5 Stückzahlen, Losgrößen und Varianten bei den befragten Firmen

Experten in den ausgewählten Unternehmen wurden ebenfalls befragt, welche Zeit zur Anfertigung eines Clinchpunktes im Rahmen der Montage zur Verfügung steht.

Hierbei wird ausgehend von der Taktzeit t_T die Zeit für Stempelvor- t_{vor} und -rückhub $t_{rück}$ sowie die Nebenzeiten t_{NZ} für die Erstellung von n Clinchpunkten pro Bauteil die verfügbare Stempelleingriffszeit t_{vst} ermittelt. Mit der Stempelleingriffszeit wird der Zeitraum bezeichnet, in dem der Stempel Kontakt zum Blech hat. In diesem Zeitraum vom Aufsetzen bis zum Abheben findet die Umformung statt:

$$t_{vst} = t_T - n_{St}(t_{NZ} + t_{vor} + t_{rück}) \quad (3.1)$$

Aus der verfügbaren Zeit wird die Zeit, die für den Clinchprozess zur Verfügung steht, abgeleitet. Wie Bild 3-6 verdeutlicht, werden 71 Prozent der Fügeaufgaben innerhalb verfügbaren Stempel Eingriffszeit von ≤ 2 s durchgeführt.

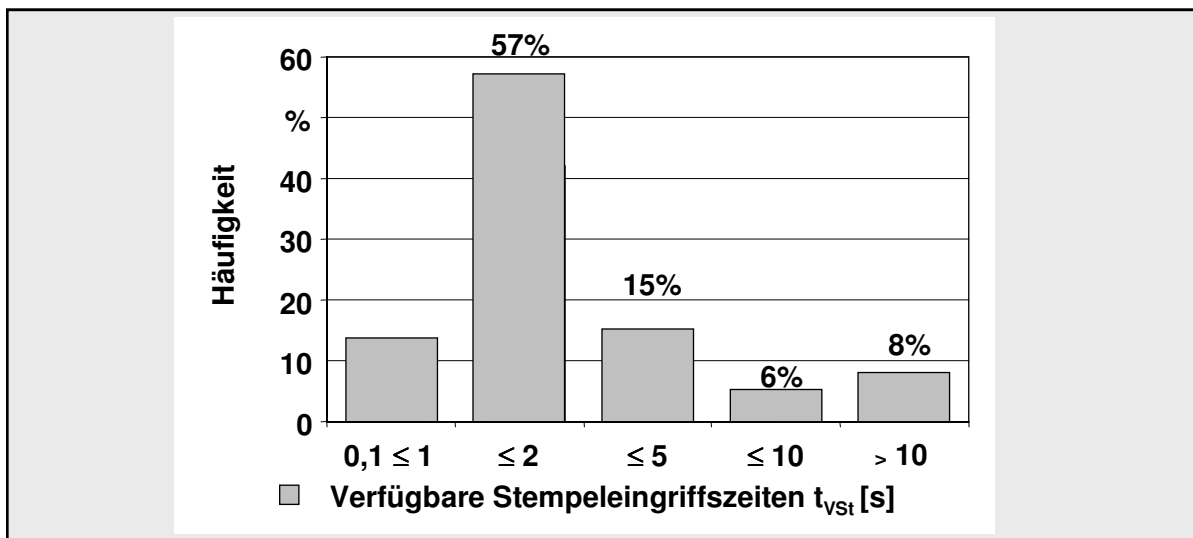


Bild 3-6 Verfügbare Stempel Eingriffszeiten pro Clinchpunkt

3.2 Analyse des Radialclinchprozesses

Die Beschreibung wesentlicher Phasen beim Radialclinchen kann durch die Darstellung im Kraft-Weg- oder Kraft-Zeit-Diagramm erfolgen. Wie in Kapitel 2.3 gezeigt, werden beide Diagrammartentypen im Rahmen der Prozessüberwachung genutzt. In Bild 3.7 wird in Anlehnung an die Untersuchungen in Thoms [Thom02] der gesamte Fügeprozess über der Zeit dargestellt, um die zeitlichen Anteile der Prozessphasen zu verdeutlichen. Der Fügeprozess lässt sich in folgende Hauptphasen unterteilen:

1. Aufsetzen des Niederhalters, 2. Durchsetzen, 3. Stauchen und Durchsetzen, 4. Rückhub des Stempels und 5. Rückhub des Niederhalters. Vor dem Fügeprozess bewegen sich Stempel und Niederhalter aus der Ruhelage in einer gleichförmigen, gemeinsamen Bewegung (Vorhub) in die Fügeposition. Diese ist in Punkt A erreicht.

Phase I Der Radialclinchprozess beginnt mit dem Aufsetzen des Niederhalters in Punkt A auf der stempel seitigen Blechlage und dem Aufsetzen der matrizenseitigen Blechlage auf der Matriz. Die Niederhalterkraft wird bis zum Erreichen der unteren Stempelendlage aufgebaut.

- Phase II Mit einem Umformvorgang, der mit Durchsetzen, Verschieben bzw. z.T. auch als Tiefziehen bezeichnet wird, werden unter mittelbarer und unmittelbarer Krafteinwirkung die Blechlagen bis zum Erreichen des Matrizenbodens in Punkt C durchgesetzt [Budd89, Klas94, Sack96, Spur84].
- Phase III Mit dem Aufsetzen der Blechlagen auf dem Matrizenboden setzt ein Stauchen der Bleche mit unmittelbarer Krafteinwirkung ein. Durch die radiale Verdrängung des Fügeworkstoffs wird die Hinterschneidung der oberen Blechlage hinter der unteren erzeugt [Budd89, Sack96]. Hierbei wird der Werkstoff bis zum Erreichen der Endlage im Halsbereich in einem Abstreckvorgang umgeformt [Klas94, Lang84, Spur84].

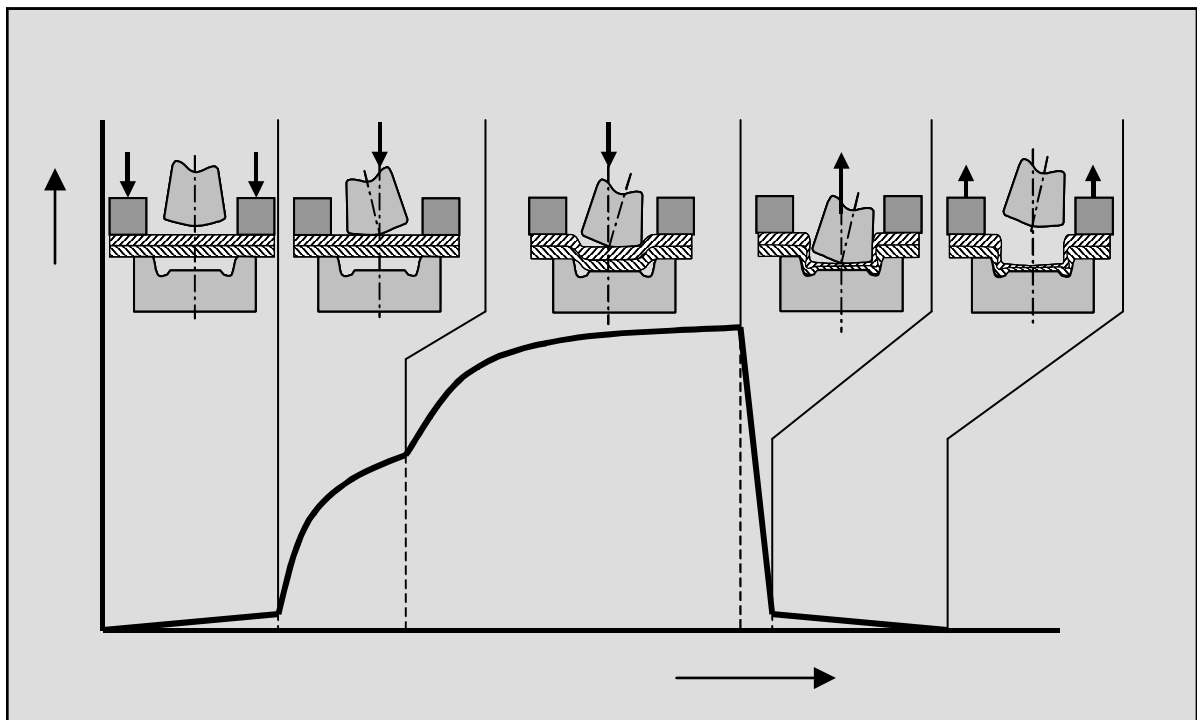


Bild 3-7 Prozessphasen beim Radialclinchen

- Phase IV Nach dem Erreichen der Restbodendicke in Punkt D ist der umformtechnische Fügevorgang abgeschlossen und der Rückhub des Stempels setzt ein. Durch die Auffederung der Fügeeinrichtung sinkt die Kraft nicht sofort auf Null, sondern wird entsprechend der Federkennlinie der Fügeeinrichtung abgebaut.

Phase V Nachdem der Stempel in Punkt E keinen Kontakt mehr zum Blech hat, federt der Niederhalter aus.

Ab dem Punkt F bewegt sich das Fügewerkzeug in die Ausgangslage. Die Phasen II und III sind entscheidend für den Fügeprozess, da hier die Verbindungsfestigkeit des Fügeelements durch Aufbringung der Fügekraft hergestellt wird. Aus diesem Grund konzentrieren sich die Untersuchungen zur Fügekraft und Prozessüberwachung auf diese beiden Prozessphasen, die im Weiteren mit Fügephase I und Fügephase II bezeichnet werden.

3.3 Auftretende Mängel im Fügeprozess

Beim umformtechnischen Fügen können unterschiedliche Fehler in Abhängigkeit der Fügewerkstoffe, der eingesetzten Fügewerkzeuge, Hilfsmittel, Vorrichtungen und Bedienung auftreten. Die Prozessunregelmäßigkeiten lassen sich auf die Fügewerkzeuge, die Fügeanlage und Bediener zurückführen. Eine Zusammenstellung möglicher Prozessunregelmäßigkeiten ist Bild 3-8 zu entnehmen.

Ursache	Fügewerkzeug	Fügeeinrichtung	Bediener
Ausprägung	• Totaler Stempelbruch • Totaler Matrizenbruch • Partieller Stempelbruch (> 5 % der Stempelgrundfläche) • Partieller Matrizenbruch (> 5 % der Matrizenumfangs bzw. -bodens) • Werkstoffauftrag an Stempel und Matrice (insb. bei Al-Werkstoffen) • max. 4° Orientierungsabweichung zwischen Werkzeug- und Z-Achse	• Falsche Positionierung der Bauteile in der Vorrichtung (RA, FA < 6-8 mm, KC) • Falsche Positionierung der Fügezange (RA, FA < 6-8 mm, KC) • Restbodendicke wird nicht erreicht (Abw. > 0,1mm) • Drehzahl wird nicht erreicht (Abw. > 5 %)	• Bauteiloberflächen verunreinigt • Bereitstellung von falschem Material (Anzahl Blechlagen / Festigkeit R_m) • Montage falscher Fügewerkzeuge • Einrichtungsfehler (LV > 0,2 mm) • Aufruf falscher Fügeparameter
Legende: Abw.: Abweichung, RA: Randabstand, FA: Flanschabstand, LV: Lateralversatz, KC: Kantenclinchung Quellen: [DVS3420, Hahn00, Muts94, Rich97], 11 Expertengespräche			

Bild 3-8 Prozessunregelmäßigkeiten beim Radialclinchen

Die Prozessunregelmäßigkeiten haben dabei unterschiedliche Auswirkungen auf die Qualität des Fügeergebnisses. Eine Fehlpositionierung der Fügeworkstoffe oder der Fügeeinrichtung kleiner 2 mm hat kaum Einfluss auf die Festigkeit der Verbindung [Muts94], führt allerdings zu optischen Beanstandungen des Bauteils wegen der Unregelmäßigkeit des Clinchpunktbildes. Diese Unregelmäßigkeiten sind durch eine Prozessüberwachung nur schlecht nachweisbar und müssen durch die Gestaltung der Fügeeinrichtung vermieden werden. Andere Fehler führen zu geringerer Zugfestigkeit des Fügeelementes, z. B. in Abhängigkeit der Überdeckung von Stempel und Matrize bei einer Kantenclinchung bis hin zur Fehlclinchung. Da die Festigkeitsabnahme bei partiellem Versagen von Fügeworkzeugen oder bei Oberflächenverschmutzung stark von der Ausprägung und der beschädigten Fläche abhängt, werden hier die Anhaltswerte festgelegt. Der Einfluss von Oberflächenverschmutzung, z. B. durch Fette, Öle oder sonstige Stoffe und die Auswirkung auf die Fügepunktqualität hängt vom Einzelfall ab und muss anhand der Umstände betrachtet werden.

Durch das große Typen- und Variantenspektrum sind häufige Umrüstvorgänge der Maschinen erforderlich. Dies kann zu Fehleinstellungen in den Fügeparametern, in der Ausrichtung der Vorrichtungen und Werkzeuge führen. Über die Erkennungswahrscheinlichkeit von Fehlern in industriellen inprocess-Überwachungssystemen beim Clinchen liegen kaum Aussagen in der Fachliteratur vor. Bisher sind keine vergleichende Untersuchungen von Prüfsystemen bekannt. Insbesondere die Fehlerbeschreibungen und -definitionen sind nicht genormt. Beim Laserschweißen von Tailored Blanks beispielsweise liegt die Klassifikationsrate zwischen 72 Prozent und 92 Prozent [Krau00]. Zur Prozessüberwachung müssen Fehlerzustände und die Fehlerklassen definiert werden.

3.4 Analyse neuronaler Netze für die Prozessfehlerklassifikation beim Radialclinchen

Die künstlichen neuronalen Netze sind in der Fachliteratur gut eingeführt [Ande97, Gras04, Zell94]. Im Folgenden werden spezifische Aspekte der Prozessfehlerklassifikation beim Radialclinchen für die neuronalen Netze analysiert.

Die grundlegende Eigenschaft neuronaler Netze, selbstständig Zusammenhänge aus vorliegenden Informationen zu ziehen, wird Lernen oder Training genannt. Ob

und welche Informationen über seinen Lernfortschritt das neuronale Netz erhält, hängt vom verwendeten Lernverfahren ab, wobei die drei Kategorien überwachtes, bestärkendes oder unüberwachtes Lernen unterschieden werden [Zell94]. Bei der zu entwickelnden Prozessfehlerklassifikation konzentriert sich die Betrachtung auf das überwachte Lernen, da mit diesem, im Gegensatz zum unüberwachten Lernen, die zu klassifizierenden Prozesszustände definierbar sind und ein schnelleres Training als mit dem bestärkenden Lernverfahren zu erwarten ist.

Es existiert eine Vielzahl von Netzwerktypen für verschiedene Aufgabenbereiche. Sie unterscheiden sich in der Aktivierungsfunktion, Propagierungs- bzw. Eingabefunktion, in der Netzwerkstruktur und im Lernverfahren bzw. in der Lernregel. Bild 3-9 zeigt die wichtigsten Modelle.

Aufgabe	Netzwerkmodell	Aufgabe	Netzwerkmodell
Allg. Abb.	• Cascade Correlation Network • Generalized Regression NN	Assoziativspeicher	• Adaptive Resonance Theory • Assoziativspeicher • Bidirektionaler Assoziativspeicher • Brain-State-in-a-Box • Hopfield • Multilagen Perzeptron - Backprop.
Vorhersage	• Adaptive Linear Neural Element • Cascade Correlation Network • Generalized Regression NN • Madaline • Multilagen Perzeptron - Backpropagation • Radiale-Basisfunktionen-Netz • Rekurrente Neuronale Netze • Self-Organized Feature Map	Optimierung	• Adaptive Linear Neural Element • Boltzmann-Netze, Hopfield-Netze • Multilagen Perzeptron - Backprop. • Rekurrente Neuronale Netze • Self-Organized Feature Map
Klassifikation	• Adaptive Linear Neural Element • Adaptive Resonance Theory • Cascade Correlation Network • Counter Propagation Network • Generalized Regression NN • Learning Vector Quantization • Multilagenperzeptron-Backprop. • Radiale-Basisfunktionen-Netz • Reduced Coulomb Energy	Mustererkennung	• Adaptive Resonance Theory • Cascade Correlation Network • Counter Propagation Network • Generalized Regression NN • Learning Vector Quantization • Multilagen Perzeptron - Backprop. • Neocognitron • Reduced Coulomb Energy
Legende: Allg. Abb.: Allgemeine Abbildung, NN: Neuronal Network, Quellen: [Ahre05, Dick98, Frie99, Patt96, Zell94]			

Bild 3-9 Einordnung neuronaler Netze nach ihrer Anwendung

Prinzipiell bieten sich zur Erkennung verschiedener Prozesszustandsklassen die Netzwerktypen unter der Aufgabe „Klassifikation“ an, wobei „Learning Vector Quantization“ als Typ mit unüberwachtem Lernverfahren ausgeschlossen werden.

Im Folgenden wird das Multilagen-Perzeptron mit der Lernregel Backpropagation und deren vorwärtsgerichtete Weiterentwicklungen behandelt, da dies für Klassifikationsaufgaben gut geeignet ist [Patt96]. Möglichen Konvergenzproblemen bei Backpropagation kann durch adaptive Lernraten und der Berücksichtigung der Gewichtsänderung durch einen gewichteten Summanden (Momentum-Term) begegnet werden [Frie99].

Zum Training der Netze können verschiedene Lernregeln eingesetzt werden. Aufgrund ihrer Bedeutung in der Literatur und im Einsatz im industriellen Umfeld spielen die folgenden Lernregeln für die Prozessfehler beim Radialclinchen eine übergeordnete Rolle: Standard-Backpropagation, die modifizierten Backpropagationsregeln mit adaptiver Lernrate und Momentum-Term, die Resilient Propagation und das Quasi-Newton Verfahren nach Levenberg-Marquardt [Ande97, Zell94].

Für die Festlegung der Topologie, d. h. die Anzahl von verdeckten Schichten und Neuronen gibt es keine allgemeingültige Lösung. Es gilt, dass das Netzwerk, das die kleinste Netztopologie aufweist, die in der Lage ist, die Funktion weitgehend zu approximieren, die besten Generalisierungseigenschaften hat. Die Netztopologie ist unbekannt. Da sich Daumenregeln als nicht brauchbar erweisen, ist die allgemein anerkannte Methode zur Ermittlung der konkreten Anzahl versteckter Schichten und deren Neuronenanzahl das Training mehrerer Netztopologien und der Vergleich der Qualität der Klassifikation mit unbekannten Daten. Der Startwert für die Suche nach der optimalen Anzahl der versteckten Neuronen liegt meist in der Größenordnung der Anzahl der Eingabeneuronen. Häufig werden zweistufige, gelegentlich dreistufige und nur selten höherstufige Multilagen-Perzeptrons zum Einsatz angewandt [Ande97, Gras04]. Die analysierten Netze bilden die Grundlage für die spätere Umsetzung in der Prozessüberwachung und Fehlerklassifikation.

3.5 Analyse der Normen für die Untersuchung der Verbindungsfestigkeit beim Clinchen

In Anlehnung an die DIN 14273 [DIN 14273] und DIN 14272 [DIN 14272] bzw. [Schm93] können Scher-, Kopf- und Schälzugproben unter quasistatischer Belastung durchgeführt werden. Die Bleche haben die Abmaße 105 x 45 mm für Schäl- und Scherzug bzw. 150 x 50 mm für Kopfzug Untersuchungen. In Bild 3-9 sind die Probenformen dargestellt. Beim Versagensverhalten der Zuguntersuchungen kön-

nen die drei Versagensarten Halsabriss, Ausknöpfen und eine Kombination aus Halsabriss und Ausknöpfen beobachtet werden. Die Art des angestrebten Versagensverhaltens und die Verbindungsfestigkeit hängt von der Art der Beanspruchung ab. Es kann eine große Halsdicke t_n (vgl. Bild 2-2) für eine hohe Scherzugfestigkeit oder ein großer Hinterschnitt f für eine hohe Kopfzugfestigkeit der Verbindung optimiert werden.

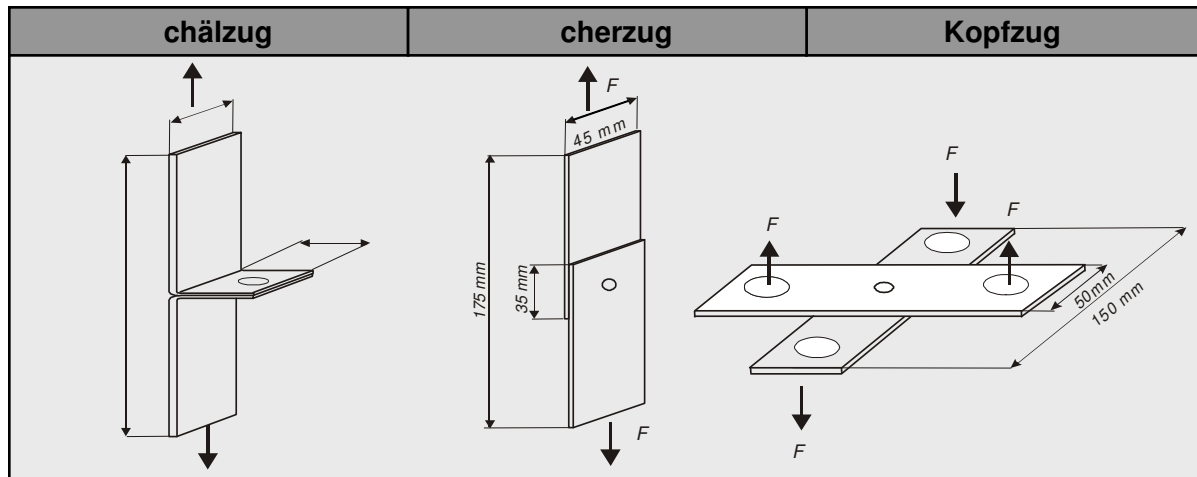


Bild 3-10 Probenformen für die Untersuchung der Verbindungsfestigkeit [Thom03a]

3.6 Automatisierungshemmnisse

Um das in Form von Produktionszahlen und Montageumfängen erfasste Rationalisierungspotenzial beurteilen zu können, wurden die Experten in den Firmen über die derzeit bestehenden Automatisierungshemmnisse befragt und deren Rangfolge nach organisatorischen und technischen Hemmnissen getrennt gebildet (Bild 3-11).

Wichtigste Automatisierungshemmnisse sind im organisatorischen Bereich die kleinen Losgrößen und hohe Typen- und Variantenvielfalt. Im technischen Bereich sind die eingeschränkte Zugänglichkeit zur Fügestelle, die hohen Zangengewichte, die begrenzte Zangenausladung, die begrenzte Flexibilität des Prozesses hinsichtlich der Fügeaufgabe und eine nicht ausreichende Fehlererkennung der Prozessüberwachung die Automatisierungshemmnisse. Hierbei sind die hohen Zangengewichte und die begrenzte Zangenausladung eine direkte Auswirkung der hohen Fügekräfte.

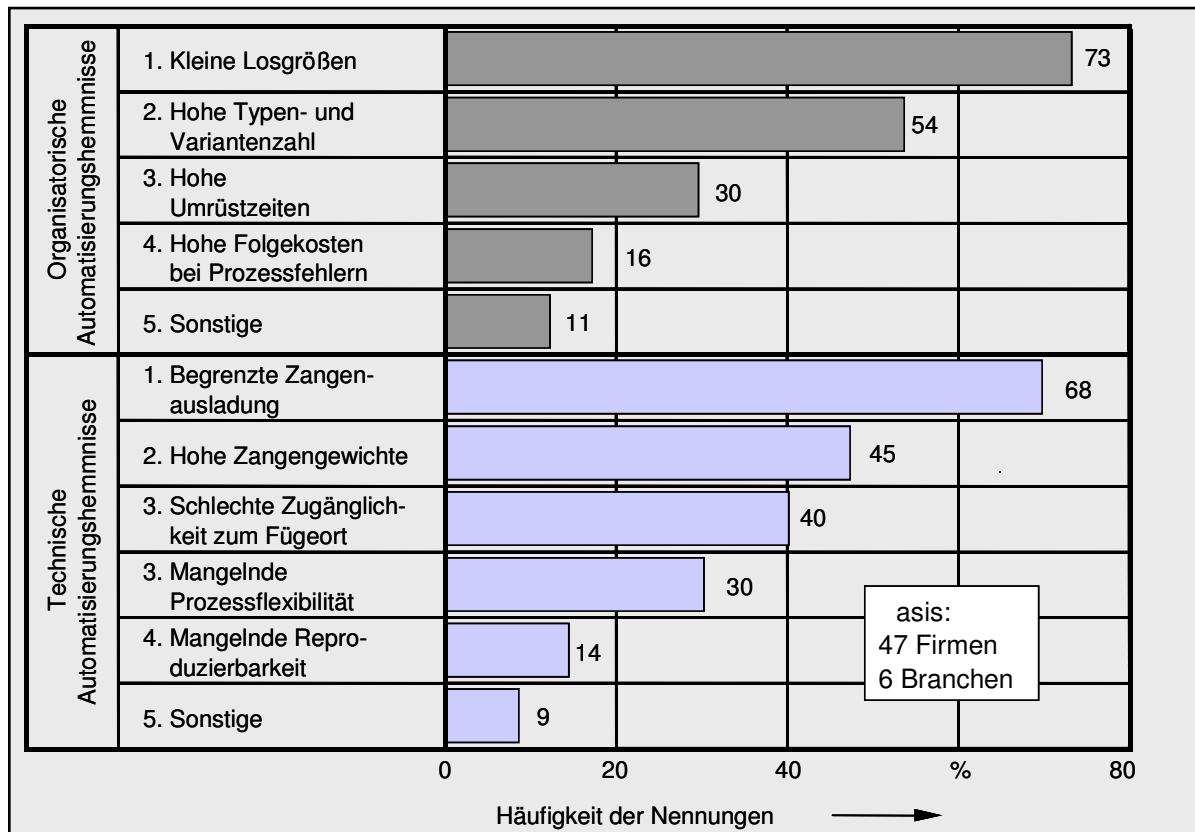


Bild 3-11 Rangfolge bestehender Automatisierungshemmnisse

3.7 Analyse der Einflussfaktoren bei der Gestaltung und dem Einsatz von Anlagen zum automatisierten Radialclinchen

Die Gestaltung von Anlagen zum Radialclinchen sind abhängig von einer Vielzahl von betrieblichen und technischen Einflussfaktoren (Bild 3-12). Die betrieblichen Möglichkeiten zur Integration in den Füge- und Montageprozess werden bestimmt von den Randbedingungen zur Zuführung, Bereitstellung, Transport, Prozess- und Produktdatenverwaltung. Die Taktzeiten in der Fertigung und der Anteil manueller Tätigkeiten bestimmen den wirtschaftlichen Automatisierungsgrad. Die tolerierte Geräuscentwicklung hat einen Einfluss auf die bauliche Gestaltung der Anlagen und die Auswahl von Komponenten. Ein Lärmpegel über 85 dB(A) soll nicht überschritten werden [Arbe75].

Die technischen Einflussfaktoren beziehen sich auf die verwendeten Fügeworkstoffe, die geforderte Verbindungsfestigkeit, auftretende Prozesskräfte und die Zugänglichkeit zum Bauteil. Diese haben Einfluss auf die Zangengestaltung, die Art der Reaktionskraftaufnahme und die bauliche Gestaltung einer Fügeeinrichtung. Insbe-

sondere die spätere Möglichkeit zur flexiblen Kombination mit weiteren Fügeverfahren wie z. B. Stanznieten, Kleben oder Schrauben muss bei der Umsetzung beachtet werden.

Bereich	Betrieb	Fügeprozess	Bauteil
Einflussfaktoren	• Betriebliche Umgebung (Einrichtungen, Informationsfluss, Platz) • Taktzeiten • Tolerierte Geräuschentwicklung • Automatisierungsgrad • Integration weiterer Fügeverfahren • Bereitstellung der Halbzeuge	• Auftretende Fügereaktionskräfte • Geforderte Prozesssicherheit • Zu erreichende Prozesszeiten • Prozessüberwachung	• Reihenfolge der Füge- und Montageprozesse • Geometrie • Zugänglichkeit zur Fügestelle • Geforderte Genauigkeit • Soll- / Istzustand der Werkstoffkennwerte • Soll- / Istzustand der Oberfläche

Bild 3-12 Betriebliche und technische Einflussfaktoren bei der Gestaltung automatisierter Radialclincheinrichtungen

3.8 Folgerungen aus der Analyse und den Automatisierungshemmnissen sowie Ableitung von Entwicklungsschwerpunkten

Wie der Stand der Technik beim Radialclinchen zeigt, stehen keine durchgängig automatisierten Systeme zum Radialclinchen sowie keine Verfahren zur Prozessfehlerklassifikation zur Verfügung. Aus den Analysen zum Clinchen von Blechwerkstoffen wird deutlich, dass die Prozesseigenschaften beim Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe, insbesondere im Hinblick auf eine Fügekraftabschätzung und Prozessüberwachung, noch ungenügend untersucht sind.

Aufgrund der durchgeführten Analyse können montage-technische Automatisierungshemmnisse bestimmt und fügetechnische Querschnittsprobleme abgeleitet werden. Die hohe Typen- und Variantenvielfalt beim umformtechnischen Fügen verbunden mit kleinen Losgrößen erfordert den Einsatz flexibel automatisierter Füge-systeme. Technische Automatisierungshemmnisse wie die geringe Zangenausladung und hohe Zangengewichte resultieren aus den hohen Fügekräften. Die Reduzierung der Fügekraft stellt erhöhte Anforderungen an den Fügeprozess, die mit

dem heutigen Stand der Technik nicht erfüllt werden. Mögliche hohe Folgekosten durch fehlerhafte Fügeprozesse und die Behinderungen der Fertigung durch unentdeckte Prozessstörungen erfordern die Entwicklung einer Prozessüberwachung. Um das automatisierte Radialclinchen von Halbzeugen aus Blechwerkstoffen zu ermöglichen, müssen Konzepte entwickelt werden, die den Montageaufgaben und den Anforderungen an den Fügeprozess gerecht werden. Für einen branchenübergreifenden, universellen Einsatz müssen konzipierte Teilsysteme baukastenartig in aufgabenspezifisch konfigurierte Gesamtsysteme integriert werden. Hieraus ergeben sich folgende Entwicklungsschwerpunkte für das kraftreduzierte Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe:

- Optimierung geometrischer Werkzeugparameter im Hinblick auf die Verbindungsfestigkeit,
- Entwicklung eines Radialclinchwerkzeugs unter Berücksichtigung der analysierten produktionstechnischen Randbedingungen,
- Theoretische Modellierung des Radialclinchprozesses und Abschätzung der Fügekräfte beim Radialclinchprozess, unter Berücksichtigung der Materialeigenschaften,
- Entwicklung einer Prozessüberwachung mit einer Fehlerklassifikation für das Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe.

Diese Entwicklungsdefizite sollen im Rahmen dieser Arbeit mit dem Ziel einer Automatisierung und einer Prozessüberwachung beim Radialclinchen ausgeglichen werden.

Ausgehend von den analysierten Fügeworkstofffestigkeiten werden für die Untersuchungen zur Verbindungsfestigkeit, zur Modellerstellung und zur Verifikation sowie die Erprobung mit dem prototypischen Radialclinchwerkzeug, die in Bild 3-13 dargestellten Werkstoffe ausgewählt. Hiermit wird gemäß Bild 3-3 ein Großteil des Werkstoffspektrums abgedeckt. Für die Optimierung der Verbindungsfestigkeit und die Prüfung der statischen Verbindungsfestigkeit wird neben dem Stahlwerkstoff H400LA zusätzlich die Aluminiumlegierung AlMg3 genutzt, um die breite Einsetzbarkeit des Radialclinchens zu zeigen. Die Modellerstellung zur Berechnung der Fügekraft wird mit Blechdicken von 1,5 mm durchgeführt, um das Kraftreduzierungspotenzial besser herausarbeiten zu können.

Werkstoff- bezeichnung	Werkstoff- bezeichnung	Norm	Blechdicke [mm]	R _{P0,2} [N/mm ²]	R _m [N/mm ²]	A ₈₀ [%]	d _m [mm]	F _{max} [kN]
AlMg3		EN AW 5754	1,0	80	220		6,0	
AlMg3		EN AW 5754	1,5	140	224	12 (A ₅)	6,0	42
DC04	St 14	EN 10130	1,5	161	301	43	8,0	60
H320LA	ZStE 340	SEW 093	1,5	372	442	29,1	8,0	48 - 65
H400LA	ZStE 420	SEW 093	1,0	466	538	24,8	8,0	51 - 55
S 355 J0	St 52-3	EN 10 025	2,17	380	540	24 (A ₅)	10,0	83

Werkstoff- bezeichnung	Blechdicke [mm]	d _m [mm]	d _{St} [mm]	t _b [mm]	Scherzug [kN]	Schälzug [kN]	Kopfzug [kN]
AlMg3	1,0	6,0			1,0 - 2,26		1,2
AlMg3	1,5	6,0					
DC04	1,5	8,0					
H320LA	1,5	8,0	4,8 - 5,0	0,8 - 0,9	3,2 - 3,8	1,8	2,0
H400LA	1,0	8,0	4,8 - 5,0	0,75	3,5 - 3,9	1,0 - 1,1	2,2
S 355 J0	2,17	10,0			5,3	2,8	4,8

Quellen: [Ecko00, Hahn00, Muts94, Schr05, Tox04, Wegs04, Werkstoffzeugnisse]

Bild 3-13 Versuchswerkstoffe für die folgenden Untersuchungen

3.9 Ableitung von Anforderungen an Gesamtsystem und Teilsysteme zum automatisierten Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe

3.9.1 Definition von Teilfunktionen und Zuordnung zu Teilsystemen

Ein System zum automatisierten Radialclinchen besteht gemäß der Analyse aus den Teilsystemen zur Prozessüberwachung, zum Fügen, zur Bereitstellung der Halbzeuge, zum Niederhalten der Bauteile und zur Handhabung der Bauteile (Bild 3-14). Die Zusammenstellung von Teilsystemen eines Montagesystems bildet die Basis für eine morphologische Vorgehensweise bei der Konzeption und Entwicklung von Einrichtungen für das Radialclinchen [VDI 2221, VDI 2222].

Das Prozessüberwachungssystem besteht aus den Teilfunktionen der Erfassung, Verarbeitung und Auswertung der Messdaten. Das Prozessüberwachungssystem soll bei einem Fehler auch eine entsprechende Fehlermeldung ausgeben. Das Fügesystem, bestehend aus Fügezange und Fügewerkzeugen, erzeugt die Fügekräfte und nimmt diese auf. Baulich ist die Sensorik mit in das Fügesystem integriert. Dem Bereitstellungssystem kommen die Funktionen der Vereinzelung, dem Halten und

Spannen der Halbzeuge zu. Das Niederhaltersystem gewährleistet die Spaltfreiheit der Fügeelemente. Handhabungssysteme führen die Bauteile und das Fügesystem.

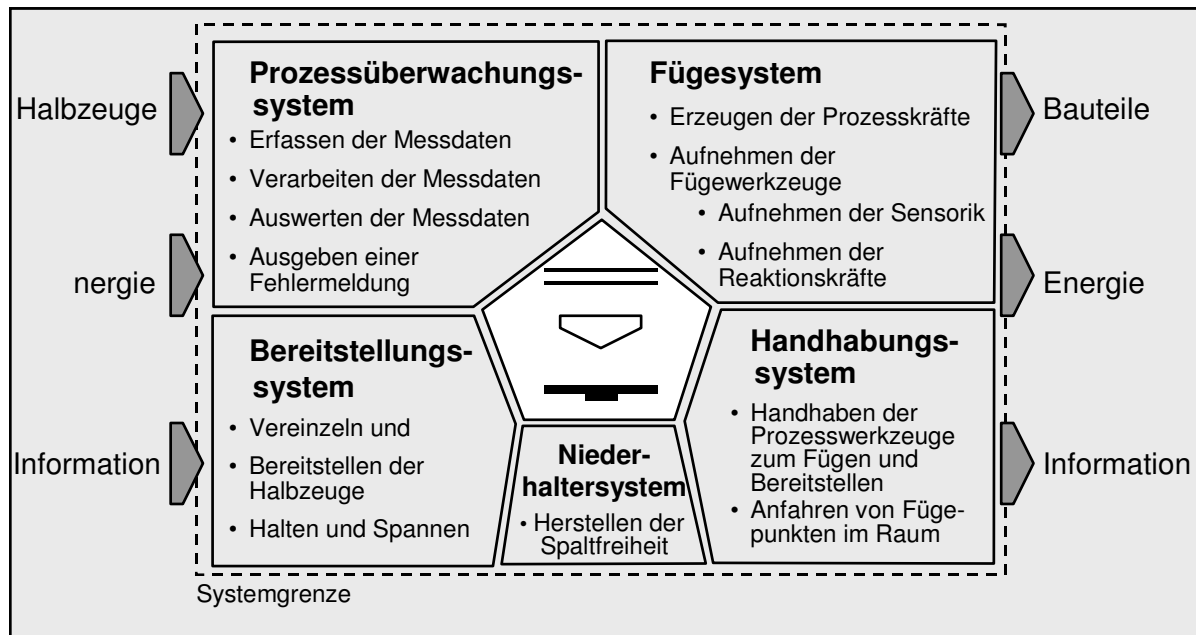


Bild 3-14 Definition von Teilsystemen und -funktionen für das automatisierte Radialclinchen

3.9.2 Anforderungen an das Gesamtsystem

An das Gesamtsystem zum Radialclinchen werden die aus Kapitel 3.1 und 3.2 ab-

Prozessanforderungen	Systemanforderungen
• Herstellung von Radialclinchelementen mit mindestens gleicher Verbindungsfestigkeit wie beim konventionellen Clinchen • Möglichkeit zur Verfahrenskombination mit Halbhohlstanzen • Fügen von mindestens 4 mm Gesamtblechdicke • Fügen von höherfesten Werkstoffen mit $R_m < 500 \text{ N/mm}^2$ und Aluminiumwerkstoffen • Verwendung von marktgängigen Standardmatrizen • Positioniergenauigkeit von $\pm 0,5 \text{ mm}$	• Automatisierung aller Teilfunktionen ab Teilebereitstellung • Hohe Funktionssicherheit und Verfügbarkeit durch einfache Lösungen bei geringem Platzbedarf • Geringe Investitionskosten und hohe Wirtschaftlichkeit • Möglichkeit zur Integration von Zusatzgeräten (z.B. Besprühungssystem) • Leichte Austauschbarkeit der Werkzeuge und der Handhabungseinrichtung im Fehlerfall • Gute Zugänglichkeit zum Werkzeug für die Instandhaltung • Flexible Integrationsmöglichkeit in die industrielle Fertigungsumgebung • Ansteuerung der Radialbewegung über die Steuerung

Bild 3-15 Anforderungen an Gesamtprozess und -system zum Radialclinchen

geleiteten Anforderungen gestellt. Im Bild 3-15 sind die wichtigsten Anforderungen an Gesamtprozess- und System dargestellt.

3.9.3 Anforderungen an das Fügenystem

Neben den Anforderungen an das Gesamtsystem, die von allen Teilsystemen erfüllt sein müssen, haben die einzelnen Teilsysteme funktionsbezogenen Anforderungen zu genügen. Die Anforderungen an das Fügenystem sind in Bild 3-16 dargestellt. Im Wesentlichen muss eine ausreichende Fügekraft durch das Fügenystem zur Verfügung gestellt werden und durch einen einfachen Aufbau mit wenigen Schnittstellen und kleinen geometrischen Störkanten aufgenommen werden.

Prozessanforderungen	Systemanforderungen
• Einhaltung der Stempelergriffszeiten von < 2 s • Einhaltung des Fügeweges mit einer Genauigkeit von 0,1 mm • Gewährleistung einer maximalen Orientierungsabweichung von 4° zwischen Werkzeug und Z-Achse • Gewährleistung eines max. Lateralversatzes von 0,2 mm zwischen Stempel und Matrize	• Fügen in allen Werkzeugpositionen • Aufnahme der Reaktionskräfte (Fügekraft und Radialbewegung) • Ausladung ≥ 300 mm (horizontal und vertikal) • Geringe Störkanten im Fügebereich • Geringe Kopflastigkeit • Gute Integration der Rotationsbewegung • Möglichst geringe Geräuschentwicklung: < 85 dB(A) • Variable Roboterschnittstellenanbindung • Geringes Gewicht • Geringe Anzahl von Schnittstellen im Kraftfluss

Bild 3-16 Anforderungen an das Fügenystem für das Radialclinchen

3.9.4 Anforderungen an das Niederhaltersystem

Das Niederhaltersystem soll die spaltfreie Auflage der stempelseitigen Blechlage auf der matrizen seitigen Blechlage zu Beginn des Fügeprozesses gewährleisten. Während der Tiefzieh- und Stauchphase wird das Nachfließen des Werkstoffs beeinflusst, um die Spaltfreiheit im Halsbereich des Fügepunktes positiv zu beeinflussen. Der Niederhalter kann die Ausformung des Stempels aus dem Blech unterstüt-

zen. Die Anforderungen an die konstruktive Gestaltung des Niederhalters sind in Bild 3-17 dargestellt.

Prozessanforderungen	Systemanforderungen
• Aufbringung der Niederhalterkraft von >1,0 kN • Gewährleistung der Spaltfreiheit zwischen den Blechen beim Aufsetzen des Stempels und während der Fügephase • Keine Beeinträchtigung der Oberflächen der Fügepartner durch die Auflage • Keine Schwingungserzeugung	• Einfache Bauart • Geringes Gewicht und kleine Störkonturen • Dauerfestigkeit der Kraft- und Auflageelemente • Anpassbarkeit an verschiedene Blechstärken und Werkstofffestigkeiten

Bild 3-17 Anforderungen an das Niederhaltersystem für das Radialclinchen

3.9.5 Anforderungen an das Prozessüberwachungssystem

Die Prozessüberwachung beim Radialclinchen muss die Überwachung des Clinchprozesses und eine Erkennung fehlerhafter Clinchelemente ermöglichen.

Prozessanforderungen	Systemanforderungen
• Unempfindlichkeit gegenüber Umgebungseinflüssen, z. B. Bauteilgeometrien • Erkennung wenn nur eine Blechlage gefügt wird und wenn zu viele Blechlagen eingelegt sind • Erkennung von Kantenclinchungen bei falscher Bauteillage oder Werkzeugpositionierung • Erkennung der Abweichung der Restbodendicke von mehr als 0,1 mm • Erkennung von partiellem Stempel- und Matrizenbruch • Detektion von plötzlichem Werkzeugversagen (Stempel- und Matrizenbruch) • Klassifikation von Prozessfehlern	• Erkennung der Montage falscher Fügwerkzeuge • Geringer Umrüstaufwand bei der Umstellung der Prozesse bzw. Variantenwechsel • Einfache Integration der Sensoren in das Fügesystem ohne Beeinträchtigung der Messdaten • Aufnahme und Auswertung der Prozessdaten • Inprocess-Aussage über die Qualität der Fügepunkte • Anwendung von definierten Strategien und Abläufen im Fehlerfall • Dokumentation der relevanten Prozessdaten mit einer übersichtlichen Archivierung

Bild 3-18 Anforderungen an das Prozessüberwachungssystem für das Radialclinchen

Einerseits muss die Qualität der Fügwerkzeuge (Stempel und Matrize) dauernd gewährleistet sein, um qualitativ hochwertige Verbindungselemente zu erzeugen, andererseits müssen Blech- und Fügeeinrichtungsparameter überwacht werden. Die sichere Erkennung unzulässiger Prozesszustände wie z. B. durch Stempel- und Matrizenbruch, falsche Werkstoffe und zu wenig bzw. zu viele Bleche sind die wesentlichen Anforderungen an das Prozessüberwachungssystem. Dabei sollen unzulässige Prozesszustände durch das Prozessüberwachungssystem neben der Erkennung auch richtig klassifiziert werden, um eine definierte Fehlerstrategie verfolgen zu können. Die Anforderungen sind in Bild 3-18 zusammengefasst.

3.9.6 Anforderungen an das Bereitstellungs- und Handhabungssystem

Die Handhabungssysteme für die Bereitstellung der Bauteile und für die Handhabung der Fügeeinrichtung müssen die Gewichte der Bauteile und der Werkzeuge, die wirkenden Reaktionskräfte sicher aufnehmen und das Fügesystem genau positionieren. Dabei sind hohe Verfahrgeschwindigkeiten des Handhabungssystems vorteilhaft für geringe Nebenzeiten. Diese Anforderungen werden durch marktgängige Handhabungsgeräte, insbesondere von Industrierobotern erfüllt. Die Anforderungen an das Teilsystem der Bereitstellung mit der sicheren Vereinzelung der Bauteile, Realisierung von kurzen Nebenzeiten während der Bereitstellung und einem produktionsrobusten Aufbau können vom Stand der Technik abgeleitet werden. Die Bereitstellungs- und Handhabungssysteme werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

4 Konzeption von Teilsystemen für das automatisierte Radialclinchen

4.1 Lösungsalternativen für Teilsysteme

Die Analyseergebnisse aus Kapitel 3 zeigen, dass unterschiedliche Randbedingungen bezüglich Taktzeit, Anzahl der Clinchpunkte pro Bauteil und Art des Werkstoffs zu beachten sind. Trotzdem bestehen einheitliche Voraussetzungen bezüglich der Fügeaufgaben, so dass eine Entwicklung von allgemeingültigen Gesamtkonzepten zur flexiblen Automatisierung des Radialclinchens möglich ist.

Der Aufbau des Gesamtsystems wird wesentlich durch die geforderte Taktzeit bei der Montage bestimmt. Die maximale Ausbringung $n_{\max}$ von Bauteilen einer Montagezelle pro Tag durch n_{IR} Industrieroboter bei n_{CP} zu clinchenden Verbindungen pro Bauteil ist abhängig von der Dauer einer Schicht t_{Sch} , der Anzahl der Schichten pro Tag n_{Sch} , den Zeiten zum Bereitstellen des Bauteils t_{Bt} , der Zeit des Stempelingriffs t_{St} , dem Vor- und Rückhub t_{vor} , $t_{rück}$ und t_{BewIR} sowie der erreichbaren Verfügbarkeit V . Unter der Annahme, dass die vorhandenen Industrieroboter die Bauteile parallel fügen und die Bereitstellung der Bauteile ebenfalls parallel erfolgen können, beträgt die maximale Ausbringung:

$$n_{\max} = \frac{t_{Sch} \times n_{Sch} \times n_{IR} \times V}{n_{CP}(t_{Bt} + t_{St} + t_{vor} + t_{rück} + t_{BewIR})} \quad (4-1)$$

Die notwendige Anzahl von Gesamtsystemen kann hierbei im Nebenschluss oder im Hauptschluss angeordnet werden. Ausgehend von Haupt- oder Nebenschlusskonzepten zum Clinchen mit Industrierobotern wird die Konzeption des Gesamtsystems zum kraftreduzierten Fügen wesentlich durch den Werkzeuggrundaufbau, die Integration des Radialkopfes und des Radialantriebes, die Abstimmung der Werkzeuggeometrien und eine geeignete Prozessüberwachung geprägt. Entwicklungsschwerpunkte sind das Zangenkonzept und die Integration der Prozessüberwachung. Für die Funktion der Prozessüberwachung ist die Auswahl auswertbarer Signale und die Auswahl des Systems zur Datenauswertung durchzuführen. Hierbei stellen die Alternativen einen Lösungsraum dar, aus dem aufgrund der jeweiligen Randbedingungen vorteilhafte Lösungen abgeleitet werden können.

4.1.1 Grundaufbau der Fügeeinrichtung

Der Grundaufbau der robotergeführten Fügeeinrichtung dient dazu, alle zur Durchführung und Überwachung des Fügeprozesses notwendigen Teilsysteme aufzunehmen. Insbesondere die Fügekraft muss reaktionsfrei für das Handhabungsgerät und das Werkstück aufgenommen werden. Bild 4-1 zeigt Lösungsalternativen für den Grundaufbau der Fügeeinrichtung und die Bewertung mit in Kap. 2 und 3 beschriebenen Bewertungskriterien.

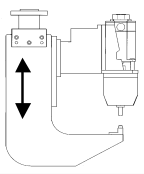
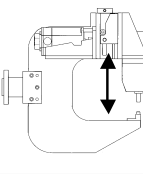
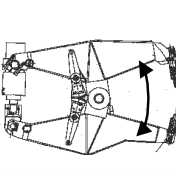
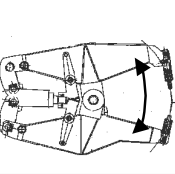
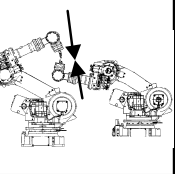
Lösungsalternative	A	B	C	D	E
	L-Bügel	C-Bügel	Gelenkbügel		Bügellos mit Roboter
			Scherenzange	Kniehebelzange	
Prinzipbild					
Bewertungskriterien					
Ausladung	gering	mittel	mittel	mittel	hoch
Rachenhöhe	mittel	mittel	mittel	mittel	hoch
Kopplastigkeit	mittel	mittel	gering	gering	gering
Verfügbarkeit und Funktionssicherheit	gering	hoch	mittel	mittel	mittel
Austauschbarkeit der Verschleißteile	möglich	einfach	möglich	möglich	möglich
Störkonturen des Gesamtwerkzeugs	mittel	gering	hoch	hoch	gering
Variable Roboterflanschbindung	eingeschränkt	einfach	eingeschränkt	eingeschränkt	entfällt
Gefahr von Winkel- und Lateralversatz	hoch	gering	gering	gering	sehr hoch
Anzahl von Schnittstellen im Kraftfluss	mittel	gering	mittel	mittel	hoch
Technischer Aufwand	mittel	gering	mittel	mittel	mittel

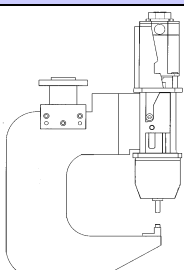
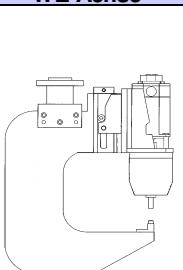
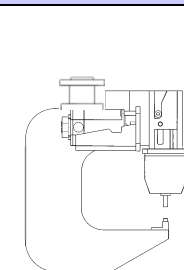
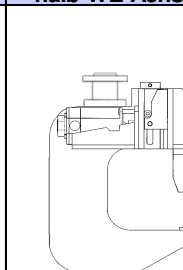
Bild 4-1 Lösungsalternativen für den Werkzeuggrundaufbau

Die Konzepte A bis D basieren auf Werkzeugkonzepten, die in der industriellen Praxis beim umformtechnischen Blechfügen im Einsatz sind. Das bügellose Konzept E bietet die Möglichkeit zur Minimierung der Störkonturen und des Handhabungsgewichtes, wenn auf einen Bügel zur Aufnahme der Reaktionskräfte verzichtet werden kann. Der zu erwartende Winkel- und Lateralversatz wäre trotz der Kraftreduzierung für eine durchgängige Nutzung hoch, so dass ein hoher Anlagenaufwand zu erwarten ist. Die Alternativen A, C und D sind von der Anbindung für den Roboterflansch nicht so flexibel wie die Alternative B.

Die Alternativen C und D bieten die Möglichkeit, die zum Fügen notwendige Kraft von der Hubkraft durch Nutzung des Hebelprinzips zu entkoppeln. Allerdings sind zusätzliche Bauteile und Gelenkstellen notwendig. Die Anbringung der Schnittstellen kann nur an wenigen Positionen aufgrund der beweglichen Zangenteile erfolgen. Dies verschlechtert die Zugänglichkeit zur Fügestelle. Durch die Hubbewegung eines Armes beim L-Bügel-Konzept besteht die Gefahr von Winkel- und Lateralversatz. Die Führungen müssen dementsprechend groß gestaltet werden. Die Eignung der verschiedenen Konzepte ist im Einzelfall von den Gegebenheiten abhängig. Für die zu konzipierende Radialclincheinrichtung wird die Alternative B ausgewählt.

4.1.2 Zangenaufbau

Die Position der Module zur Erzeugung des Fügehubes und des Radialantriebes haben einen großen Anteil an der Funktionalität der Fügeeinrichtung. Aufgrund des in Kapitel 4.1.1 festgelegten Werkzeuggrundkonzeptes werden die Möglichkeiten zur Anordnung der Module systematisch variiert und bewertet.

Lösungsalternative	A	B	C	D
	Radialantrieb in WZ-Achse		Radialantrieb außerhalb WZ-Achse	
	Hub in WZ-Achse	Hub außerhalb WZ-Achse	Hub in WZ-Achse	Hub außerhalb WZ-Achse
Prinzipbild Bewertungskriterien				
Anzahl von Schnittstellen im Kraftfluss	gering	mittel	mittel	mittel
Aufwand zur Anbindung des Radialantriebs	mittel	sehr gering	hoch	hoch
Kopflastigkeit	hoch	mittel	mittel	mittel
Gefahr von Winkel- und Lateralversatz	gering	mittel	gering	mittel
Störkonturen	groß	mittel	gering	gering
Übertragung der Fügekraft	direkt	indirekt	direkt	indirekt
Übertragung der Rotationsbewegung	indirekt	direkt	indirekt	indirekt

Legende

 Fügehub
  Radialantrieb
  Radialkopf
  Matrize

Bild 4-2 Lösungsalternativen zur Positionierung der Antriebsmodule

Die Erzeugung der radialen Stempelbewegung erfordert einen rotatorischen Antrieb. Dieser Rotationsantrieb kann direkt über dem Radialkopf in der Werkzeugachse oder außerhalb der Werkzeugachse angeordnet werden. Bei der Anordnung in der Werkzeugachse ist der unmittelbare Antrieb des Radialkopfes möglich. Bei der Anordnung außerhalb der Werkzeugachse ist die Kopflastigkeit des Systems reduziert und die Störkonturen im Fügebereich sinken. Eine geringe Kopflastigkeit des Gesamtaufbaus kann auch durch die Anbringung des Fügehubes außerhalb der Werkzeugachse erreicht werden. Hierbei steigt die Zahl der Schnittstellen bei einer Verringerung der Störkonturen. Für das zu konzipierende System wird die Alternative B mit einem Fügehubmodul außerhalb der Werkzeugachse und einem direkten Radialantrieb ausgewählt.

4.2 Niederhaltersystem

Der Niederhalter kann beim Radialclinchen direkt am Stempel angebracht werden. Dieser Aufbau hat neben dem kleinen Bauraum des Niederhalters den Vorteil, dass die Niederhalterkraft nur dort aufgebracht wird, wo sie benötigt wird, da der Niederhalter mit dem Stempel kippt.

Lösungsalternative	A	B	C	D	E	C
	Aktiv		Passiv			
	Hülse/ Käfig	Erzeugung unabhängig vom Fügewerkzeug	Im Stützbereich seitlich unten	Im Stützbereich seitlich oben	Unter dem Werkzeug	Am Stempel
Prinzipbild						
Bewertungskriterien						
Gewicht auf Füge-system	hoch	nicht vorh.	mittel	mittel	gering	gering
Störkonturen	mittel	hoch	mittel	mittel	gering	sehr gering
Anpassbarkeit der Niederhalterkraft	einfach	einfach	mittel	mittel	mittel	mittel
Technischer Aufwand	mittel	hoch	gering	gering	sehr gering	sehr gering
Möglichkeit der Schwingungsübertragung	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Regelung der Niederhalterkraft	dynamisch	dynamisch	statisch	statisch	statisch	statisch
Aufbringung hoher Niederhalterkräfte	möglich	komplex	einfach	einfach	einfach	einfach

Bild 4-3 Lösungsalternativen für Niederhalter

Die Niederhalterkraft wird analog zur Reduktion der Fügekräfte verringert. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Entlastung von Blechbereichen im noch nicht abgeschlossenen Fügeprozess nachteilige Auswirkungen auf die Ausprägung des Fügeelementes hat. Für das zu konzipierende System wird deshalb ein von der Stempelbewegung entkoppeltes Niederhaltersystem genutzt. Dieser Niederhalter kann bei einer Verfahrenskombination auch zur Nietzuführung verwandt werden.

Da eine ausreichende Kraft durch Schraubenfedern gleichmäßig über die Niederhalterfläche aufgebracht werden kann, wird die Variante E aufgrund der Bauraum- und Störkantenvorteile ausgewählt.

4.3 Erfassung der Prozesskennwerte

Zur Überwachung des Radialclinchprozesses können die Parameter Fügekraft, Fügeweg, akustische, thermische oder visuelle Informationen sowie Radialmoment und Radialdrehzahl ausgewertet werden (Bild 4-4). Bei der Alternative A werden die Fügekräfte und der Fügeweg ausgewertet. Im Konzept B wird die Möglichkeit der digitalen Bildverarbeitung genutzt. Das Verfahren wird durch die nur einseitige Überwachung der Fügestelle mit einer Kamera begrenzt. Störgrößen wie eine Unter- oder Überbelichtung durch Fremdlicht bzw. Reflexion von Bauteiloberflächen können nicht ausgeschlossen werden. Die Bilderfassung muss mit entsprechender Bildverarbeitung gekoppelt werden, um Aussagen zum Prozess zu liefern. Im Konzept C werden die Messgrößen Drehmoment und Drehzahl erfasst, die durch die Einleitung der Rotationsbewegung für den Radialkopf entstehen.

Das Konzept D nutzt die Möglichkeit, den Körperschall, der durch den Fügeprozess erzeugt wird, aufzunehmen und auszuwerten. Dieses Verfahren ist insbesondere für impulsförmige Signalverläufe geeignet. Da Vibrationen über große Frequenzbereiche im industriellen Einsatzumfeld durch andere Maschinen und Anlagen nicht ausgeschlossen werden können, ist die Zuverlässigkeit eingeschränkt.

Die Verfahren mit Bilderfassung, Schwingungserfassung und Thermografie sind für den analysierten Anwendungsfall weniger geeignet, da die Umgebungseinflüsse im industriellen Umfeld nicht konstant sind und sich deshalb negativ auf die Überwachungsqualität auswirken. Der technische Aufwand ist höher als bei der Erfassung

des Fügeweges, der Fügekraft, der Drehzahl und des Drehmomentes. Für die Realisierung werden die Lösungsalternativen A und C ausgewählt.

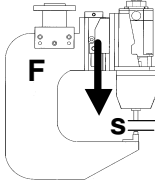
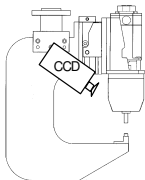
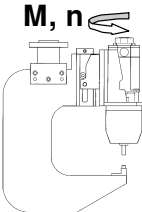
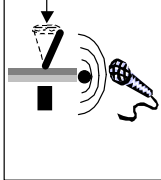
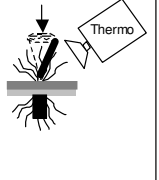
Lösungsalternative	A	B	C	D	E
	Kraft-/Wegerfassung	Bild-erfassung	Drehzahl-/Drehmoment-erfassung	Akustische Schwingungs-erfassung	Temperatur-erfassung
Prinzipbild Bewertungs-kriterien					
Integration der Sensorik in den Prozess	einfach	einfach	einfach	schwierig	schwierig
Möglichkeit zur Erkennung von Stempel-Matrizenversagen	gut	bedingt	bedingt	bedingt	bedingt
Empfindlichkeit gegen Umgebungseinflüsse	gering	hoch	gering	hoch	hoch
Möglichkeit zur Erkennung der Restbodendicke	möglich	kaum möglich	kaum möglich	möglich	möglich
Technischer Aufwand	gering	mittel	gering	hoch	hoch
Zeit zur Messwerterfassung	gering	mittel	gering	mittel	hoch
Empfindlichkeit gegen Änderungen der Bauteilgeometrien	gering	mittel	gering	hoch	mittel

Bild 4-4 Lösungsalternativen für die Signalerfassung beim Radialclinchen

Grundsätzlich können alle Lösungsalternativen für Fügeeinrichtungen zum Radialclinchen eingesetzt werden. Die hier vorgenommene Auswahl ist vor dem Hintergrund der ermittelten Randbedingungen erfolgt.

Nach der Konzeption eines Radialclinchsystems wird, basierend auf dem theoretischen Verständnis des Radialclinchprozesses, die Berechnung der Fügekraft erfolgen. Diese Berechnung bildet den Ausgangspunkt für die Auslegung des Prozesswerkzeugs. Entsprechend den ausgewählten Lösungskonzepten kann im Anschluss das Gesamtsystem aufgebaut werden, die Systemadaption vorgenommen und Musterdatensätze für die Prozessüberwachung auf Basis der neuronalen Netze aufgenommen werden.

5 Optimierung der Verbindungsfestigkeit und Ableitung von Wirkzusammenhängen für das Radialclinchen

5.1 Versuchsaufbau und Sensorik zur Ermittlung grundlegender Einflussfaktoren auf die Verbindungsfestigkeit

Zur Untersuchung der Einflussfaktoren wurde die in Bild 5-1 dargestellte Versuchseinrichtung realisiert. Der Versuchsaufbau besteht aus:

- einer elektrischen Pressvorrichtung mit Steuerung,
- einem Adapter mit Schrittmotor zur Aufnahme und zum Antrieb des Radialwerkzeugs,
- einer Vorrichtung zur Aufnahme verschiedener Probengeometrien und der Fügekrafterfassung,
- einem PC mit Messwerterfassung zur Kennlinienaufnahme des Fügewegs, der Motordrehzahl, des Radialmoments und der Fugekraft.

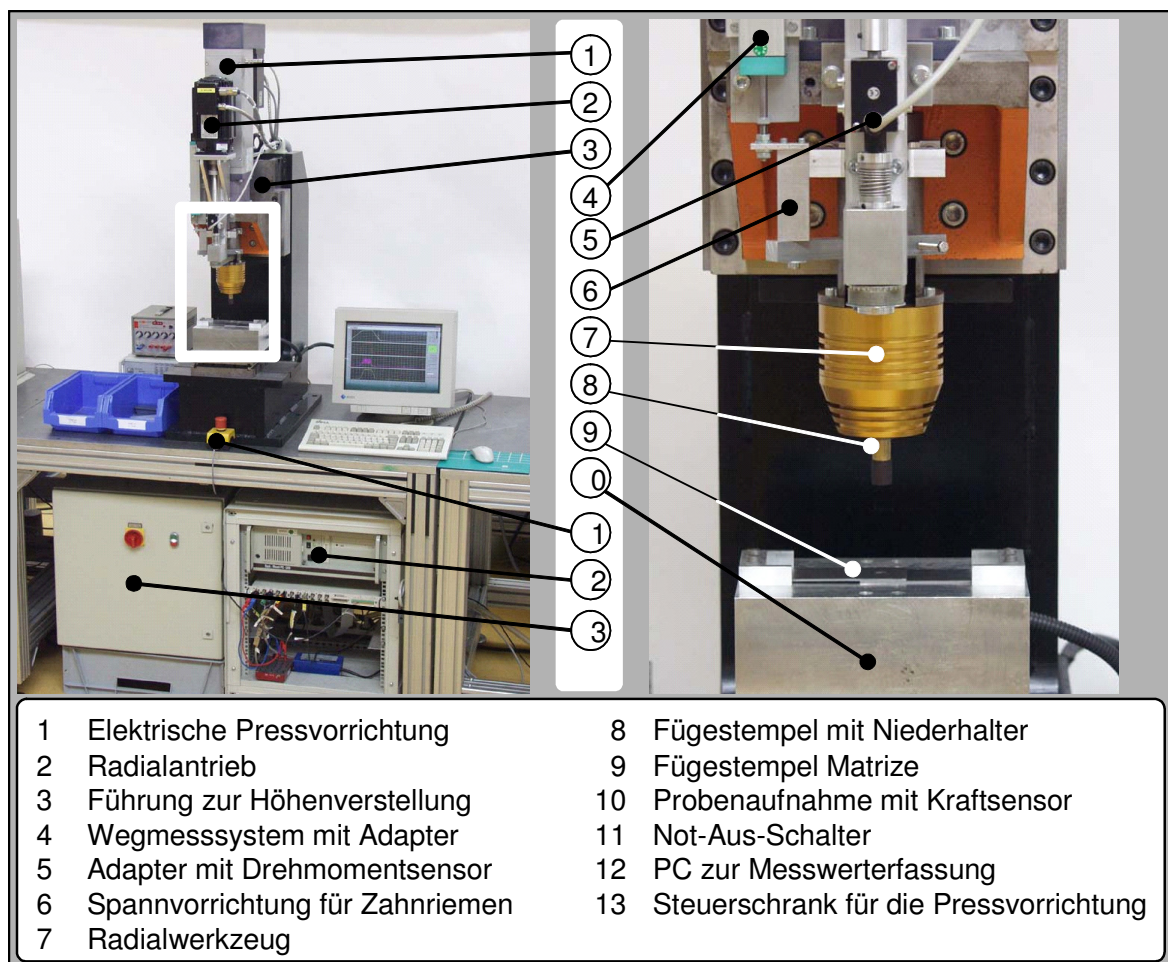


Bild 5-1 Versuchsaufbau zur Messwerterfassung beim Radialclinchen

Die Versuchseinrichtung besteht aus einer modifizierten elektrischen Spindelpresse (Typ WPS, Hersteller: Wilhelm Messtechnik, Aalen). Die Wegmessung erfolgt über ein potentiometrisches Wegmesssystem (Typ LRW-M-175S, Hersteller: WayCon, Unterhaching), die Messung des Drehmomentes und der Drehzahl erfolgt über einen Drehmomentsensor (Typ DR-2112, Hersteller: Lorenz Messtechnik, Alfdorf) und die Kraftmessung mit einer Kraftmessdose (Typ 8402-6050, Hersteller: Burster, Gernsbach). Die Modifikation der Pressensteuerung und die Ansteuerung des Radialkopfes (Hersteller: BK, CH-Küstnacht) für das Radialclinchen erfolgte mit einer grafischen Benutzeroberfläche die in C++ programmiert worden ist. Die modifizierte Pressensteuerung gibt ein Triggersignal für die Erfassung der Messdaten. Außerdem wurde eine Radialnietmaschine der Fa. Agme (Typ: RR12) eingesetzt.

Für die Optimierung der Verbindungsfestigkeit werden die in Kapitel 3.8 ausgewählten Materialien AlMg3 und H400LA mit einer Einzelblechdicke von $t_1 = t_2 = 1,0$ mm verwendet. Die Blechwerkstoffe werden, sofern nichts anderes angegeben, im Anlieferungszustand verarbeitet. Die in Kapitel 3.5 beschriebene Versuchsanordnung zur quasistatischen Verbindungsfestigkeit wird mit einer Prüfgeschwindigkeit von 10 mm/min auf einer Zug-Druckprüfmaschine (Typ Z020/TH2A, Hersteller: Zwick, Ulm) durchgeführt. Zum Ausgleich des vorhandenen Spiels wird eine diskrete Vorlast von 10 N aufgebracht. Im Rahmen dieser Untersuchungen wird die Bruchkraft ermittelt. Die zur Messdatenauswertung eingesetzte Software wurde in der Entwicklungsumgebung LabView 7.0 der Fa. National Instruments selbst entwickelt. Die makroskopischen Querschliffe werden mit einer Nasstrennschleifmaschine (Typ Labotom 3, Hersteller: Strüts, Willich) mit Umlaufkühlanlage hergestellt.

5.2 Experimentelle Untersuchung der Verbindungsfestigkeit beim Radialclinchen - Einfluss der Stempelgeometrie auf die Verbindungsfestigkeit beim Radialclinchen

Die für die statische Tragfähigkeit eines Verbindungselementes wichtigen geometrischen Kennwerte werden wesentlich durch die Geometrie der Matrize und des Fügestempels bestimmt. Beim Radialclinchen wird, aufgrund der Verwendung gleicher Matrizen, von einer ähnlichen Fügeelementausbildung im Vergleich zum konventionellen Clinchen ausgegangen. Durch die Verwendung von Standardmatrizen ist im industriellen Umfeld eine höhere Akzeptanz für das Radialclinchen zu erwarten. Auf

dem Markt haben sich, wie im Stand der Technik dargestellt, zwei Grundaufbauweisen für Matrizen durchgesetzt. Für die Untersuchungen zur Verbindungsfestigkeit werden einteilige (starre) Matrizen (Hersteller: Tox-Pressotechnik, Weingarten) und mehrteilige (bewegliche) Matrizen (Hersteller: Eckold, St.-Andreasberg) eingesetzt. Die Matrizengeometrien wurden in Vorversuchen ermittelt.

Der Stempeldurchmesser im Verhältnis zum Matrizendurchmesser hat einen wesentlichen Einfluss auf die Ausprägung und damit auf die Qualität der Verbindung. Durch diese Prozessgrößen können Halsdicke und Hinterschnitt, sowie die Kaltverfestigung der Verbindungselemente eingestellt werden. Einen geringeren Einfluss hat der Radius an der Stempelspitze im Übergang vom Stempelhalsbereich zur Stempelstirnfläche. Der Stempelspitzenradius beeinflusst das Nachfließverhalten des Materials während der Tiefziehphase. In Bild 5-2 sind die verwendeten Stempelgeometrien mit Stempeldurchmesser und -form dargestellt. Die eingesetzten Fügestempel werden aus dem Werkzeugstahl S 6-5-2 S (Stoff-Nr. 1.3343, DIN17350) hergestellt.

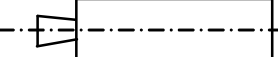
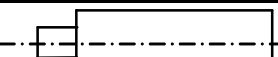
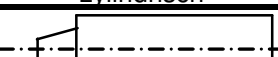
Stempelgeometrie	d _{st} [mm]								
 hinterschnitten	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2
 zylindrisch	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2
 konisch	4,6	4,8	5,0	5,2	5,4	5,6	5,8	6,0	6,2
Radius Stempelspitze = 0,5 mm									

Bild 5-2 Verwendete Stempeldurchmesser und -formen für das Radialclinchen

Der Radius an der Stempelspitze wird mit 0,5 mm angesetzt. Die Bleche werden längs zur Walzrichtung entnommen. Aus den Versuchen wurde jeweils der arithmetische Mittelwert $\bar{x}$ der maximal ertragenen Haltekräfte x_i gebildet

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (5.1)$$

Zusätzlich zum Mittelwert wird bei der Darstellung der Ergebnisse das Streuband zwischen dem jeweiligen maximalen und minimalen Wert einer Versuchsreihe angegeben.

5.2.1 Verbindungsfestigkeiten beim Radialclinchen mit einteiliger Matrize

Die Stempeldurchmesser werden im Durchmesserbereich von 4,6 mm bis 6,2 mm bei sonst gleichen Fügeparametern variiert. Die Anzahl der untersuchten Stempeldurchmesser ist abhängig vom Festigkeitsbereich der Verbindungen bei den Prüfarten (vgl. Bild 3-10). Diese liegen bei den Kopf- und Schälzuguntersuchungen in einem engeren Bereich als bei den Scherzugfestigkeiten. Stempeldurchmesser oder Versuchsergebnisse sind nicht aufgeführt oder dargestellt, wenn keine tragfähige Verbindung entsteht.

Verbindungsfestigkeit AlMg3 – einteilige Matrize

Die erreichten Verbindungsfestigkeiten für das Radialclinchen mit einteiliger Matrize von AlMg3 sind in Bild 5-3 dargestellt. Das Maximum der Haltekräfte beim Scherzug liegt bei 1,38 kN. Beim konventionellen Clinchen werden Verbindungsfestigkeiten von 1,0 kN angegeben [Tox04]. Beim Versagensverhalten der Zugproben werden die drei Versagensarten Halsabriss, Ausknöpfen und eine Kombination aus Halsabriss und Ausknöpfen beobachtet.

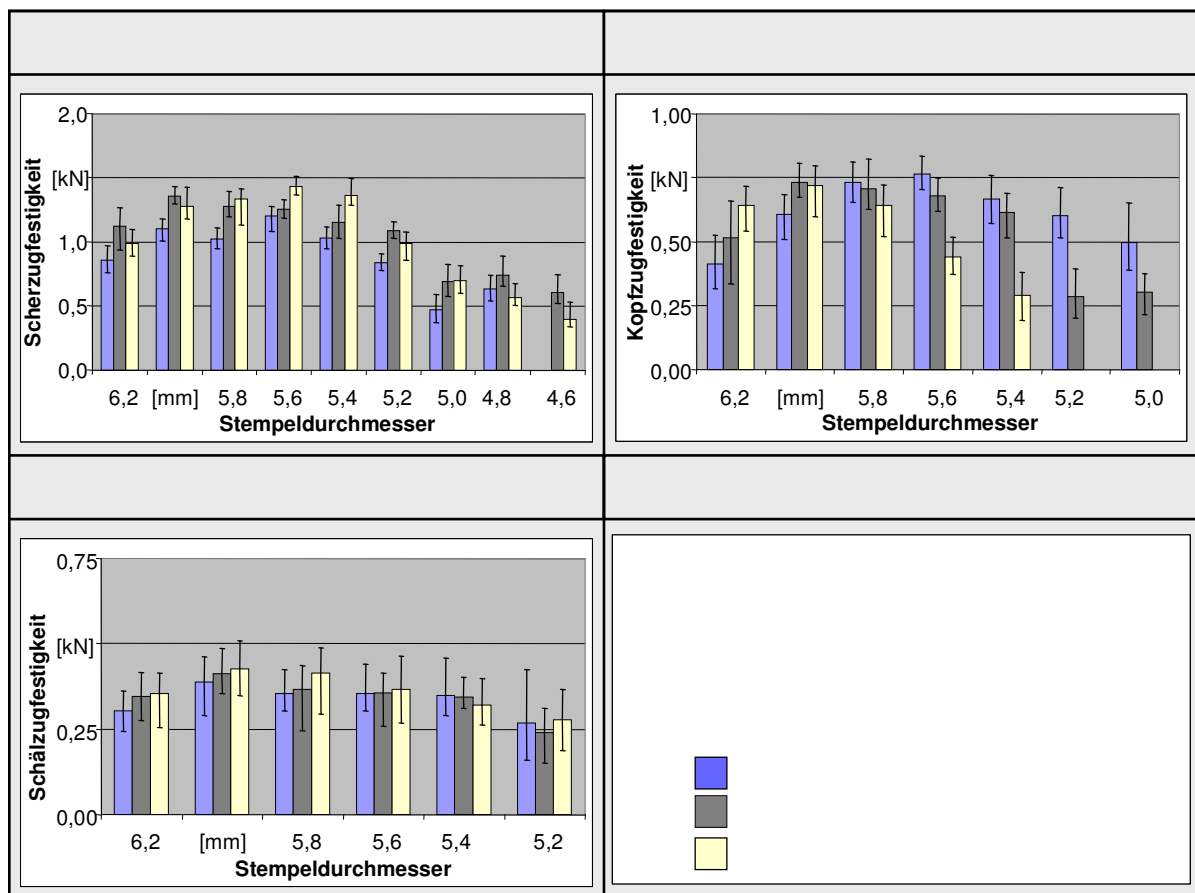


Bild 5-3 Verbindungsfestigkeiten AlMg3 mit einteiliger Matrize

Dabei wird bei Stempeldurchmessern, die kleiner als 5,4 mm sind, ein einheitliches Ausknöpfen unter Scherzuglast beobachtet. Die höchsten Verbindungsfestigkeiten liegen für den Kopfzug bei 0,76 N. Die Schälzugfestigkeiten liegen bei konischen Stempeln mit dem Stempeldurchmesser von 6,0 mm am höchsten. Damit liegen die Verbindungsfestigkeiten beim Scherzug über den Herstellerangaben, beim Kopfzug leicht unter den Werten. Für den Schälzug wurden keine Angaben gemacht. Beim Vergleich der ermittelten Kopfzugfestigkeiten zeigt sich, dass mit hinterschnittenen Stempeln die besten Ergebnisse erzielt werden. Im Kopfzug bei konischen Stempeln entsteht keine tragende Verbindung mit Stempeldurchmessern, die kleiner als 5,4 mm sind.

Verbindungsfestigkeit H400LA – einteilige Matrize

Mit den in Bild 5-4 angegebenen Versuchsparametern werden im Scherzug mit einem konischen Stempel Verbindungsfestigkeiten von 3,5 kN erreicht. Die maximalen Kopfzugfestigkeiten liegen bei 2,4 kN.

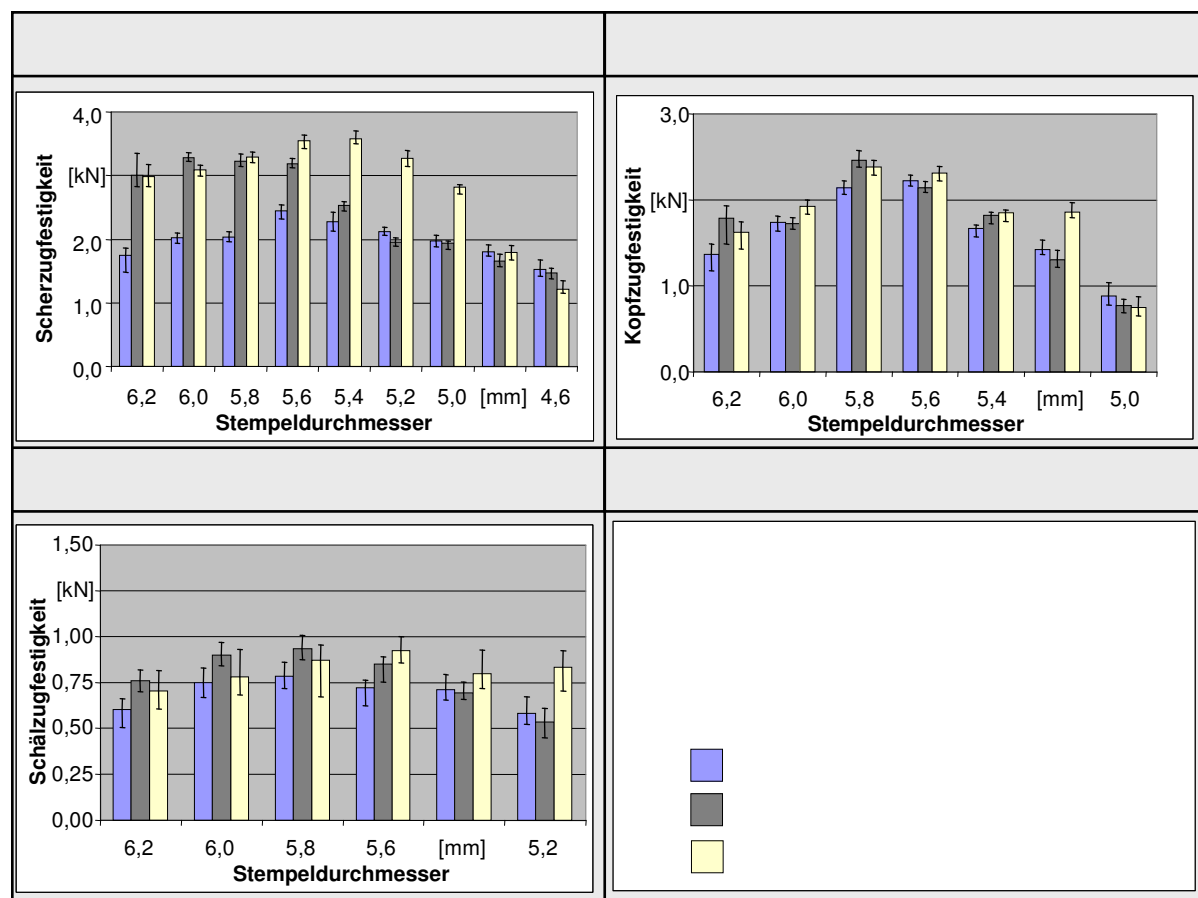


Bild 5-4 Verbindungsfestigkeiten H400LA mit einteiliger Matrize

Dieser Festigkeitswert wird mit einem zylindrischen Stempel erreicht. Durch eine konische Stempelform sind Haltekräfte von 2,3 kN erreichbar. Maximale Schälzugfestigkeiten werden durch den konischen Stempel ($\varnothing$ 5,6 mm) mit 0,9 kN und den zylindrischen Stempel ($\varnothing$ 5,8 mm) mit 0,94 kN erreicht. Die Festigkeiten liegen beim konventionellen Clinchen bei 3,5 kN [Hahn00] und 4,0 kN [Tox04] im Scherzug bzw. bei 1,1 kN [Hahn00] im Schälzug und 2,2 kN im Kopfzug [Tox04]. Es werden somit vergleichbare Verbindungsfestigkeiten erreicht.

Die Stufenfolgeuntersuchung (Bild 5-5) mit makroskopischen Querschliffen zeigt die Ausbildung des Hinterschnittes mit 0,25 mm in Schnitt 8.

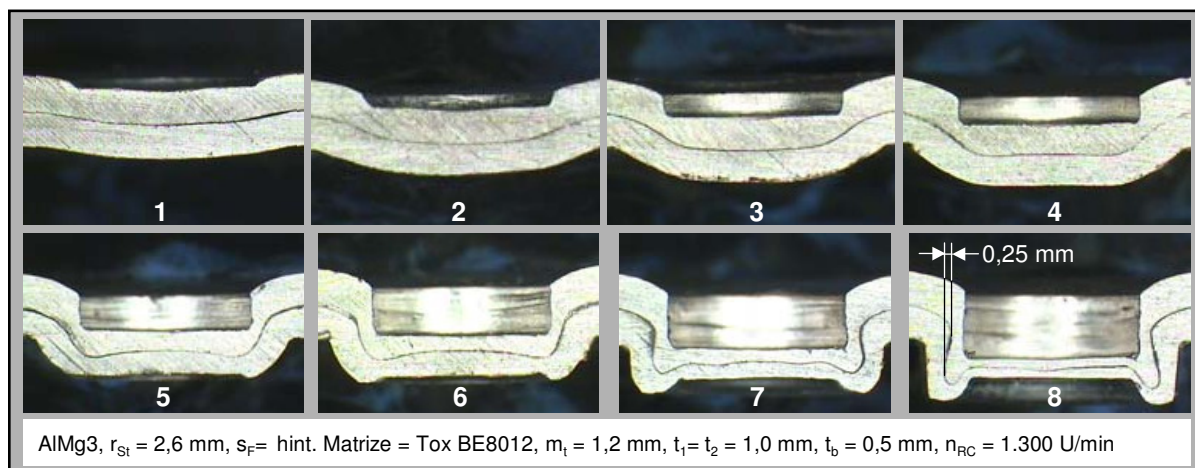


Bild 5-5 Stufenfolgeuntersuchung mit makroskopischen Querschliffen für AlMg3

Der Einfluss der Stempelform auf die Ausbildung des Fügeelementes ist in Bild 5-6 dargestellt. Mit zunehmendem Stempelwinkel wird mehr Werkstoff im Halsbereich nach außen verdrängt. Auf die Ausbildung des Hinterschnittes hat die Stempelform einen geringen Einfluss.

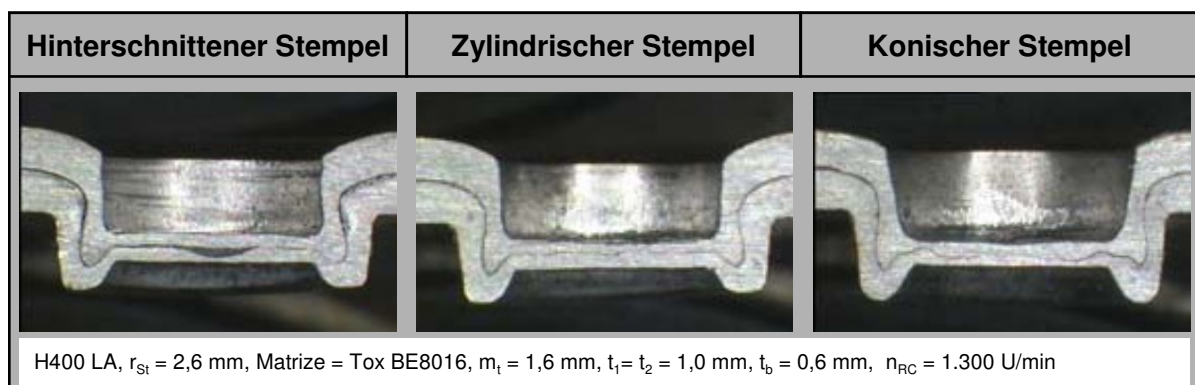


Bild 5-6 Vergleich der Stempelformen im Probenquerschliff

5.2.2 Verbindungsfestigkeiten beim Radialclinchen mit mehrteiliger Matrize

Verbindungsfestigkeit Al Mg3 – mehrteilige Matrize

Für das Radialclinchen mit mehrteiliger Matrize werden den Versuchen die gleichen Parameter zugrundegelegt wie den Versuchen mit einteiliger Matrize.

Mit der mehrteiligen Matrize werden Scherzugfestigkeiten von 1,82 kN bei einem konischen Stempel mit einem Durchmesser von 5,4 mm erreicht (Bild 5-7). Die Scherzugfestigkeiten der zylindrischen Stempel liegen im Maximum bei 1,52 kN und die der Stempel mit Hinterschnitt bei 1,34 kN. Kopfzugfestigkeiten von 1,18 kN werden mit einem zylindrischen Stempel des Durchmessers 5,2 mm erreicht. Die höchsten Haltekräfte im Schälzug werden ebenfalls mit einem zylindrischen Stempel bei einem Durchmesser von 5,2 mm erreicht. Die Haltekräfte für das konventionelle Clinchen werden mit 2,26 kN im Scherzug und 1,20 kN im Kopfzug angegeben [Ecko99].

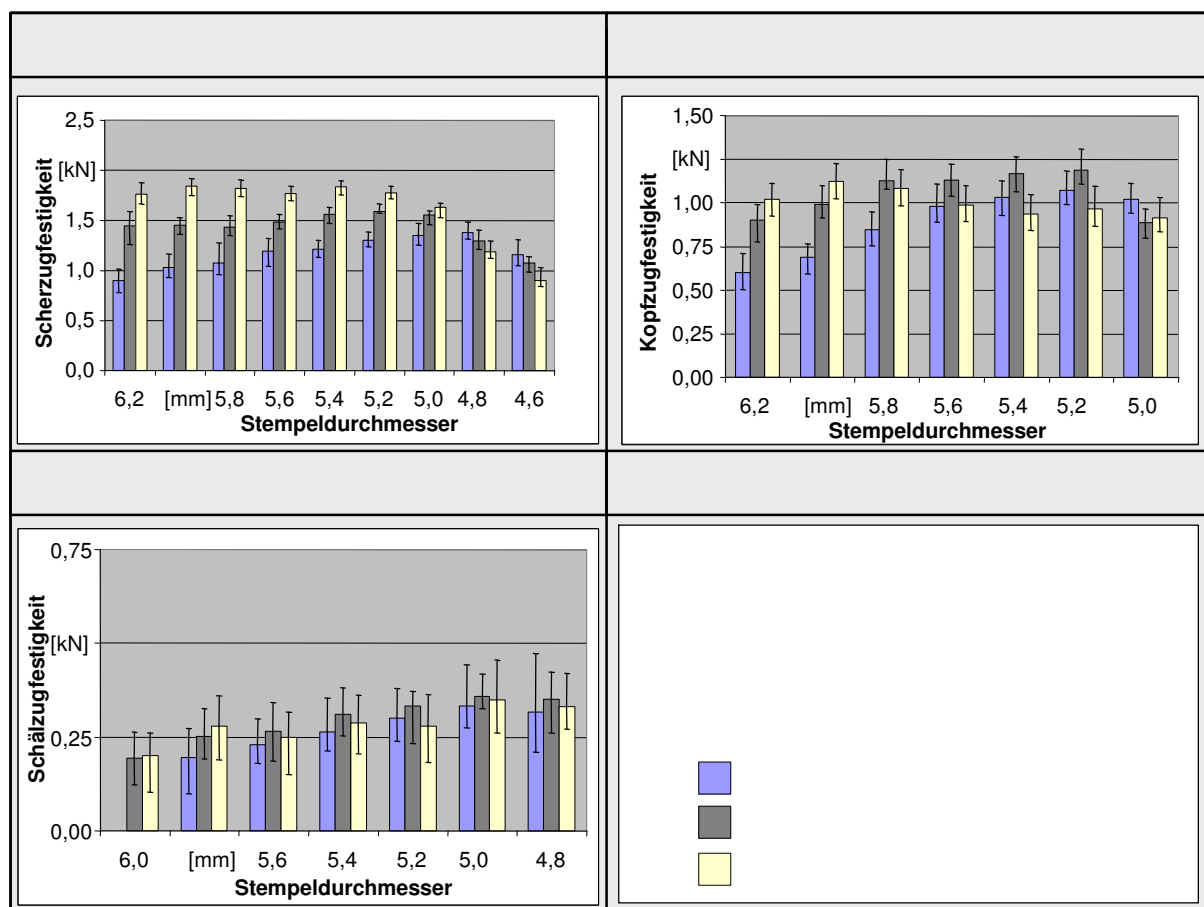


Bild 5-7 Verbindungsfestigkeiten AlMg3 mit mehrteiliger Matrize

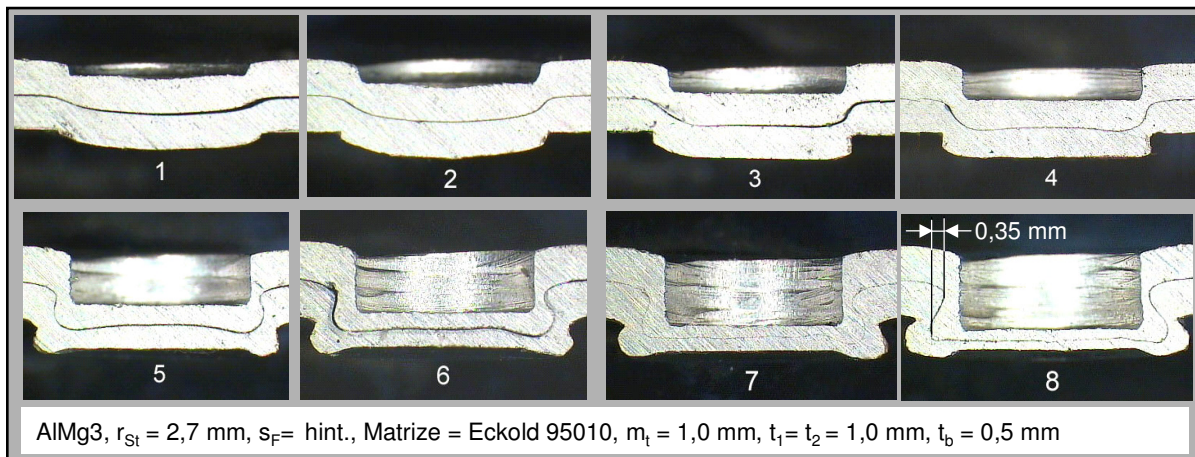


Bild 5-8 Stufenfolgeuntersuchung mit makroskopischen Querschliffen für AIMg3

Die Stufenfolgeuntersuchung (Bild 5-8) mit makroskopischen Querschliffen zeigt die gute Ausbildung des Hinterschnittes mit 0,35 mm in Schnitt 8.

Verbindungsfestigkeit H400LA – mehrteilige Matriz

Mit mehrteiliger Matriz werden insbesondere bei Stempeln mit konischer Form hohe Festigkeiten erreicht (Bild 5-9). Im Scherzug werden 4,22 kN mit dem Stempeldurchmesser 5,4 mm gehalten. Die maximalen Scherzugfestigkeiten der zylindrischen und hinterschnittenen Stempelform liegen bei Durchmessern von 5,4 mm bzw. 5,6 mm niedriger. Im Kopfzug wird mit 2,28 kN die höchste Verbindungsfestigkeit ebenfalls mit einem konischen Stempel des Durchmessers 5,6 mm erreicht. Die maximalen Verbindungsfestigkeiten im Schälzug liegen bei 0,95 kN mit der konischen Stempelform. Beim konventionellen Clinchen werden im Scherzug Haltekräfte von 3,9 kN und im Schälzug Haltekräfte von 1,1 kN erreicht [Hahn00].

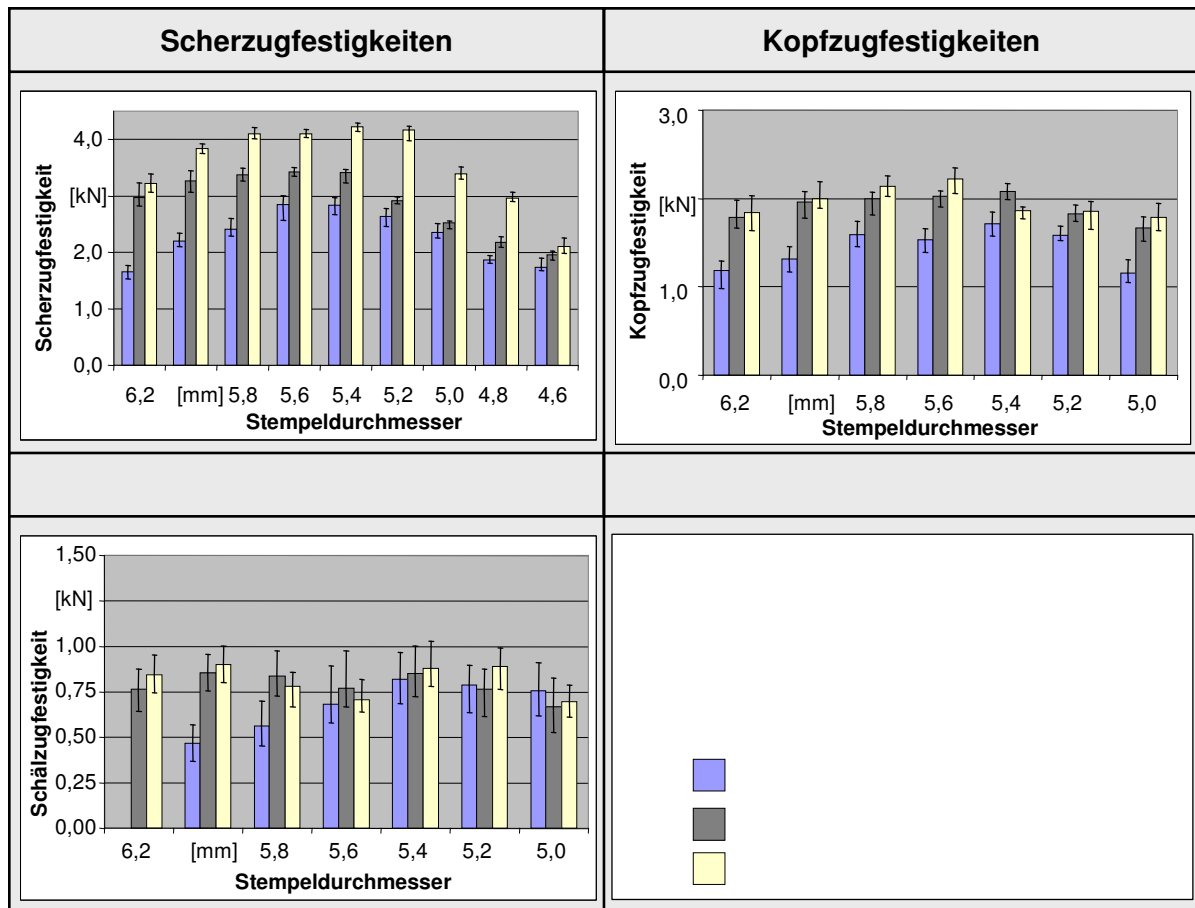


Bild 5-9 Verbindungsfestigkeiten von H400LA mit mehrteiliger Matrice

Auch bei der mehrteiligen Matrice ist der Einfluss der Stempelgeometrie deutlich (Bild 5-10). Während der hinterschnittene Stempel einen nahezu senkrechten Napf erzeugt, öffnet sich dieser mit der Zunahme des Stempelwinkels.

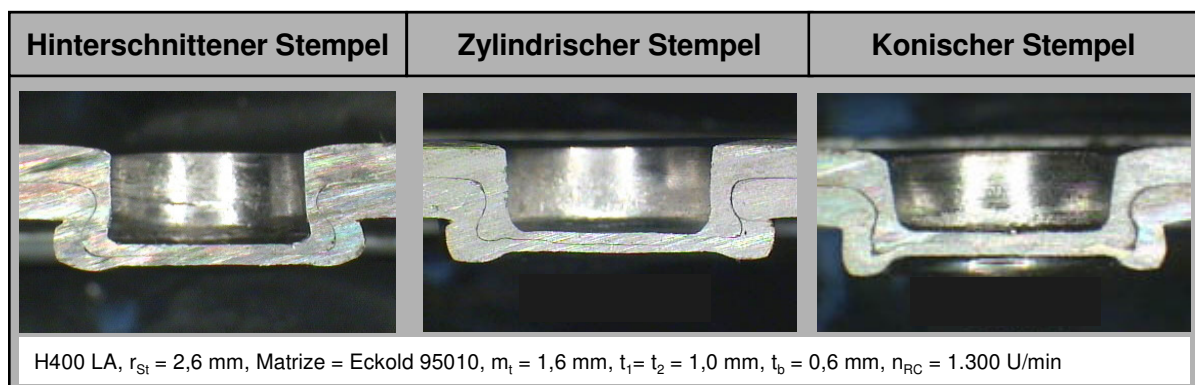


Bild 5-10 Vergleich der Stempelformen im Probenquerschliiff

5.3 Zusammenfassung und Folgerungen aus den Untersuchungen zur Verbindungsfestigkeit

Die Untersuchungen zur Verbindungsfestigkeit zeigen, dass mit dem Radialclinchen im Vergleich zum konventionellen Clinchen von AlMg3 mindestens gleichwertige, für den härtesten Werkstoff H400LA sogar bessere Verbindungsfestigkeiten erreicht werden können (Bild 5-11).

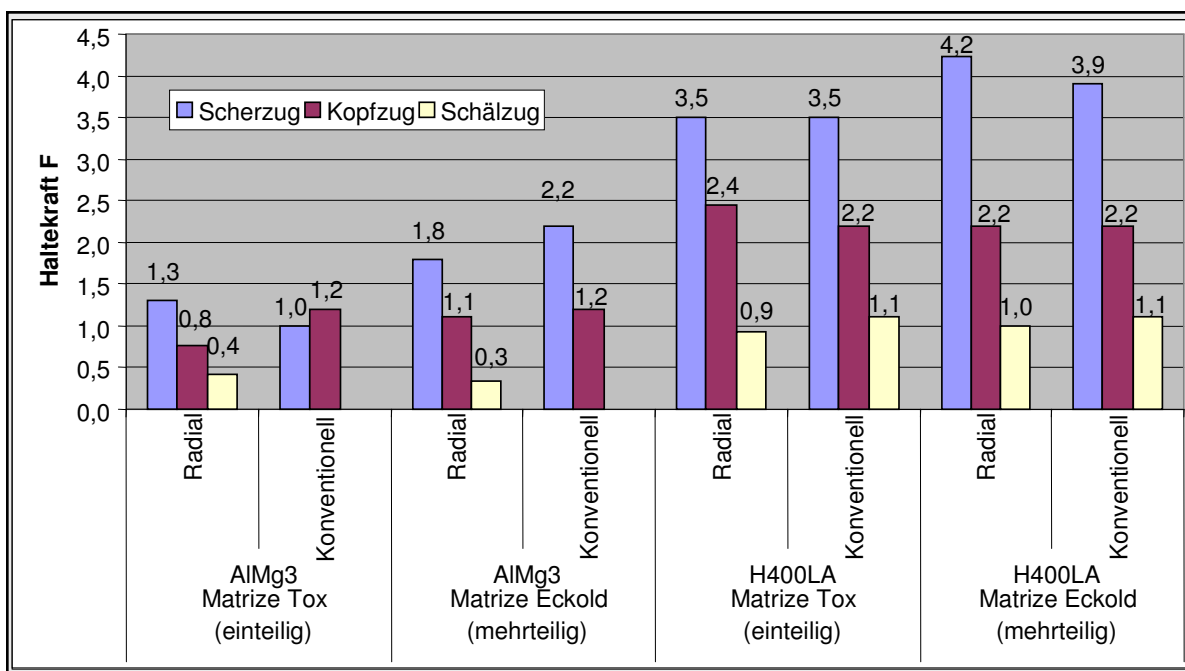


Bild 5-11 Vergleich der optimalen Verbindungsfestigkeiten beim Radialclinchen mit dem konventionellen Clinchen

Die Optimierung der Verbindungsfestigkeit durch die Verwendung alternativer Matrizendurchmesser, Matrizentiefen und systematischer Variation der Restbodendicke ist ebenfalls möglich. Die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ist bei den untersuchten Werkstoffen gegeben. Vorteilhaft ist die Wahl einer konischen Stempelspitze. Zum einen wird mehr Werkstoff verdrängt und steht für den Hinterschnitt zur Verfügung, zum anderen ergeben sich durch den Werkstoffverlauf geringere Spannungsspitzen bei Belastungen, insbesondere unter Scherzug.

5.4 Berechnung der Parameterzusammenhänge zwischen Fügekraft, Fügezeit und Drehzahl

Die Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern Fügekraft, Fügezeit und Drehzahl sind für das Radialclinchen bisher nicht bekannt. Diese haben einen großen Einfluss auf die Gestaltung der Fügeeinrichtung und sind für eine einfache überschlägige Parameterabschätzung, z. B. für die Anlagenauslegung im betrieblichen Umfeld hilfreich. Die fügetechnischen Zusammenhänge können durch Wirkzusammenhänge dargestellt werden (Bild 5-12).

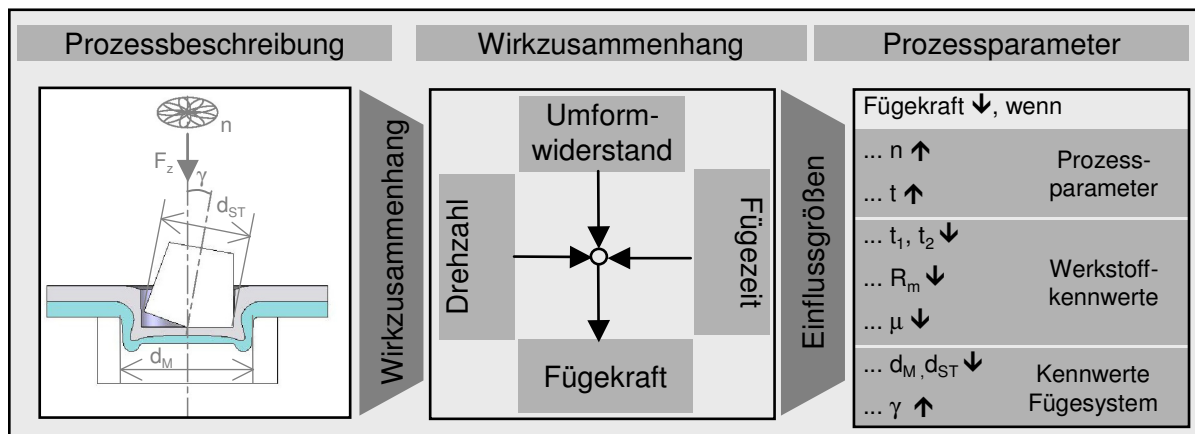


Bild 5-12 Beschreibung der Zusammenhänge beim Radialclinchen

5.4.1 Ableitung der Wirkzusammenhänge zwischen Fügekraft, Fügezeit und Drehzahl

Auf Basis der in Bild 5-12 dargestellten Wirkzusammenhänge kann die zur Erzeugung einer Clinchverbindung geleistete Umformarbeit W_{FP} beim konventionellen Clinchen mit linearer Stempelbewegung als Integral der Fügekraft F_C über den Fügeweg s mit

$$W_{FP} = \int F_C(s) ds \quad (5-2)$$

beschrieben werden. Beim Radialclinchen wird die lineare Fügebewegung mit der Bewegung des Stempels auf einer hypozykloiden Bahn zur Erzeugung des Verbindungselementes überlagert. Die zur Erzeugung des Punktes verrichtete Arbeit erweitert sich um das Integral des Rotationsmomentes M_{Rot} über den Rotationswinkel φ_R wie folgt:

$$W_{FP} = W_C + W_{Rot} = \int F_C(s)ds + \int M_{Rot}(\varphi_R)d\varphi_R \quad (5-3)$$

Die zur Ausformung eines Fügeelementes notwendige Umformarbeit W_{FP} wird durch die axiale Bewegung und durch die Bewegung des Stempels auf einer hypozykloiden Bahn durch ein Rotationsmoment aufgebracht. Das Rotationsmoment wird durch den Rotationsantrieb in ausreichender Höhe bereitgestellt, so dass die Drehzahl über den gesamten Fügeprozess konstant ist. Mit einer konstanten Drehzahl ist das Rotationsmoment M_{Rot} eine Funktion der Fügekraft und der Winkelgeschwindigkeit. Der Drehwinkel φ_R und die axiale Fügekraft F_C sind dabei die variablen Prozessparameter. Der Fügeweg s ist bei der gleichen Fügeaufgabe konstant und ergibt sich aus der Gesamtblechdicke, der Matrizentiefe und der zu erreichenden Restbodendicke.

Mit $\varphi_R = 0$ liegt der Sonderfall des konventionellen Clinchens mit geradliniger Stempelbewegung vor. Die gesamte Umformarbeit wird durch die axiale Fügekraft verrichtet. Dies entspricht der maximalen Fügekraft, wie sie aus dem konventionellen Clinchen bekannt ist (vgl. Gleichung 5-2).

Zur Ausformung einer Clinchverbindung muss die axiale Fügekraft beim Radialclinchen mindestens über der zur partiellen Umformung notwendigen Fließspannung k_f und den radialen Reibungswiderständen liegen. Daher kann die Fügekraft nicht unter eine minimale Fügekraft sinken. Zur Zusammenfassung von Drehzahl und Fügezeit wird der dimensionslose Überlagerungsfaktor K eingeführt:

$$K = n_{RC} \left[\frac{1}{s} \right] \cdot t_{St} [s] \quad (5-4)$$

Die für die Fügekraftreduzierung notwendige Überlagerung K kann durch eine hohe Fügezeit t_{St} bei einer geringen Drehzahl n_{RC} oder durch eine hohe Drehzahl bei einer geringen Fügezeit erreicht werden. Bild 5-13 zeigt die qualitative Darstellung dieser Zusammenhänge. Für Fügeeinrichtungen mit einer beschränkten Maximalkraft kann dieses Defizit bei Fügeaufgaben mit höherer Werkstofffestigkeit oder höherer Blechdicke durch einen hohen Überlagerungsfaktor ausgeglichen werden.

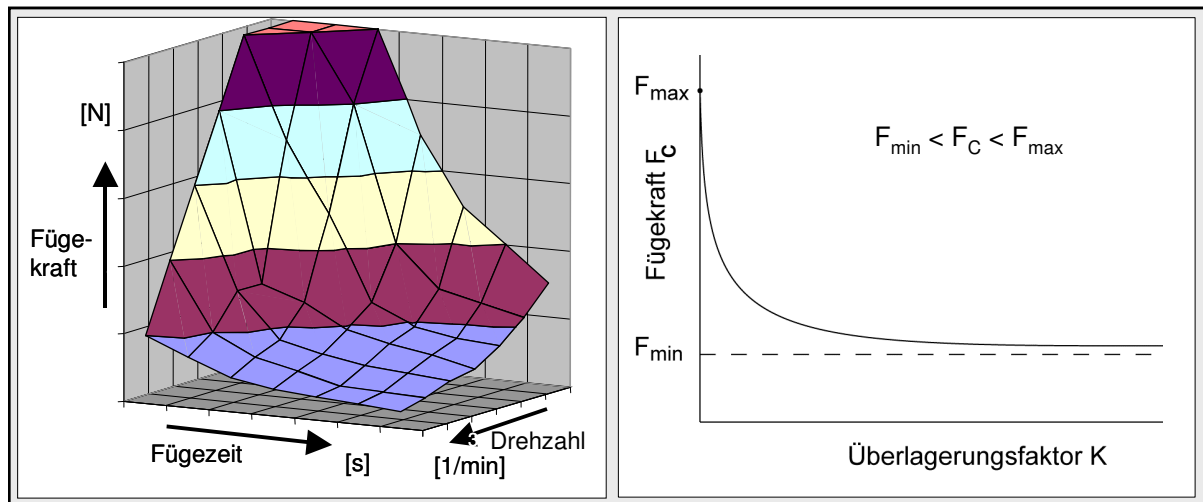


Bild 5-13 Qualitativer Zusammenhang Fügekraft, -zeit, -drehzahl und Darstellung der Fügekraft mit Überlagerungsfaktor

Die Beschreibung der maximalen Radialfügekraft F_c unter Berücksichtigung der Zusammenhänge zwischen Fügekraft und Überlagerungsfaktor kann auf die in der Praxis und in der Forschung vorhandenen Angaben [Ecko99, Hahn00, Muts94, Rich97, Tox04] der Maximalkräfte $F_{\max}$ des konventionellen, linearen Clinchens sowie der Überlagerung K mit einem empirischen Ausdruck zusammengeführt und die Radialfügekraft angenähert werden:

$$F_c = \frac{F_{\max}}{\ln(K)} \quad \text{für } K > e \quad (5-5)$$

Für die in Gleichung 5-5 beschriebene Berechnung ist nur die Kenntnis der maximalen Fügekraft notwendig. Sobald zwei experimentell ermittelte Werte von Überlagerungsfaktor und Fügekraft und die minimale Fügekraft zur Verfügung stehen, kann der Zusammenhang zwischen Fügekraft und Überlagerungsfaktor wie folgt ausgedrückt werden:

$$F_c = a \cdot K^{-b} + F_{\min} \quad \text{für } K \gg 0 \quad (5-6)$$

Die Faktoren a und b werden hierbei experimentell bestimmt. Durch experimentelle Untersuchungen wird der Zusammenhang zwischen den Parametern für die Berechnungsansätze im Folgenden verifiziert.

5.4.2 Experimentelle Verifikation der Zusammenhänge zwischen Fügezeit, Drehzahl und Fügekraft

Die oben beschriebenen Zusammenhänge werden anhand von zwei höherfesten Stählen (St52-3 und H320LA, Bild 5-14) und zwei weiteren Werkstoffen (DC04 und AlMg3) verifiziert. Für die untersuchten Werkstoffe kann eine gute Übereinstimmung der Berechnungen gezeigt werden. Bei $K > 50$ liegt die tatsächliche Fügekraft bei St-52-3 um 21 Prozent nach (5-5) höher und um 2,1 Prozent niedriger nach (5-6) als die berechnete Fügekraft. Für den Werkstoff DC04 liegt die gemessene Kraft bei $K = 40$ nach (5-5) um 0,5 Prozent und nach (5-6) um 5,3 Prozent über der berechneten Kraft.

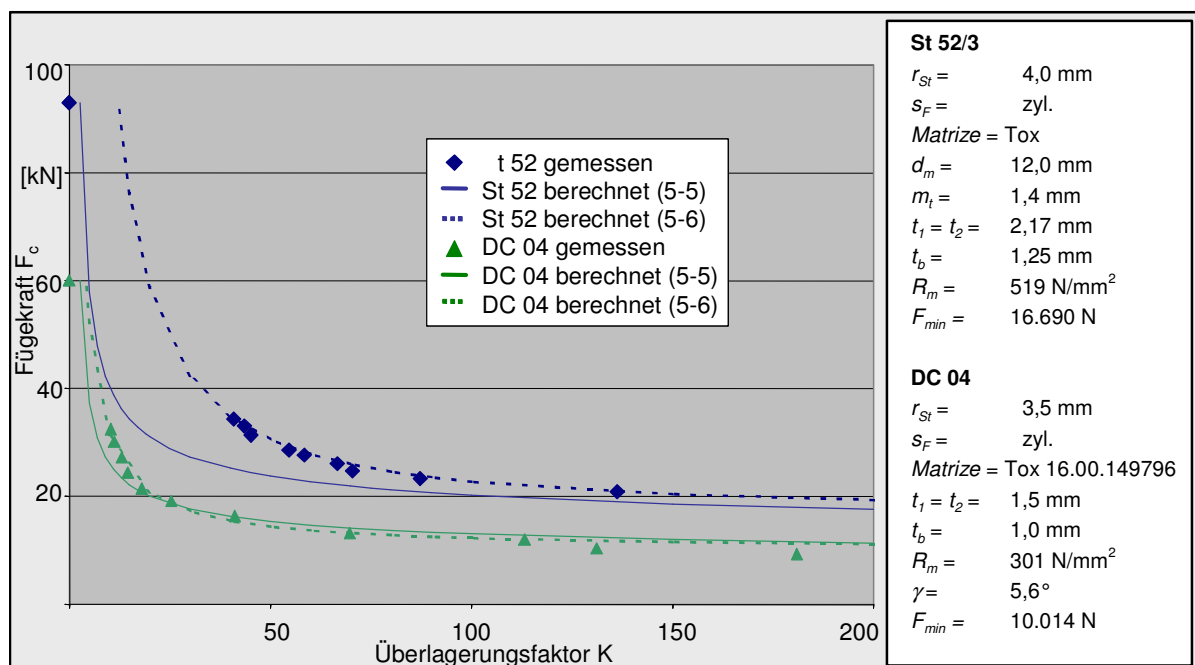


Bild 5-14 Vergleich der berechneten und gemessenen Parameter

Auch für die in Bild 5-15 dargestellten Ergebnisse aus Experimenten mit St52-3 und DC04 kann für eine überschlägige Abschätzung der Fügekraft eine befriedigende, teilweise gute Übereinstimmung gezeigt werden. Bei $K = 50$ Überlagerungen liegt die tatsächliche Fügekraft bei H320LA um 16,5 Prozent nach (5-5) höher als die berechnete Fügekraft. Für den Berechnungsansatz nach (5-6) ist die tatsächliche Fügekraft um 2,5 Prozent höher. Für den Werkstoff AlMg3 liegt die gemessene Kraft nach (5-5) um 11,7 Prozent über der berechneten Kraft bei 20 Überlagerungen, nach (5-6) ist kein Unterschied feststellbar.

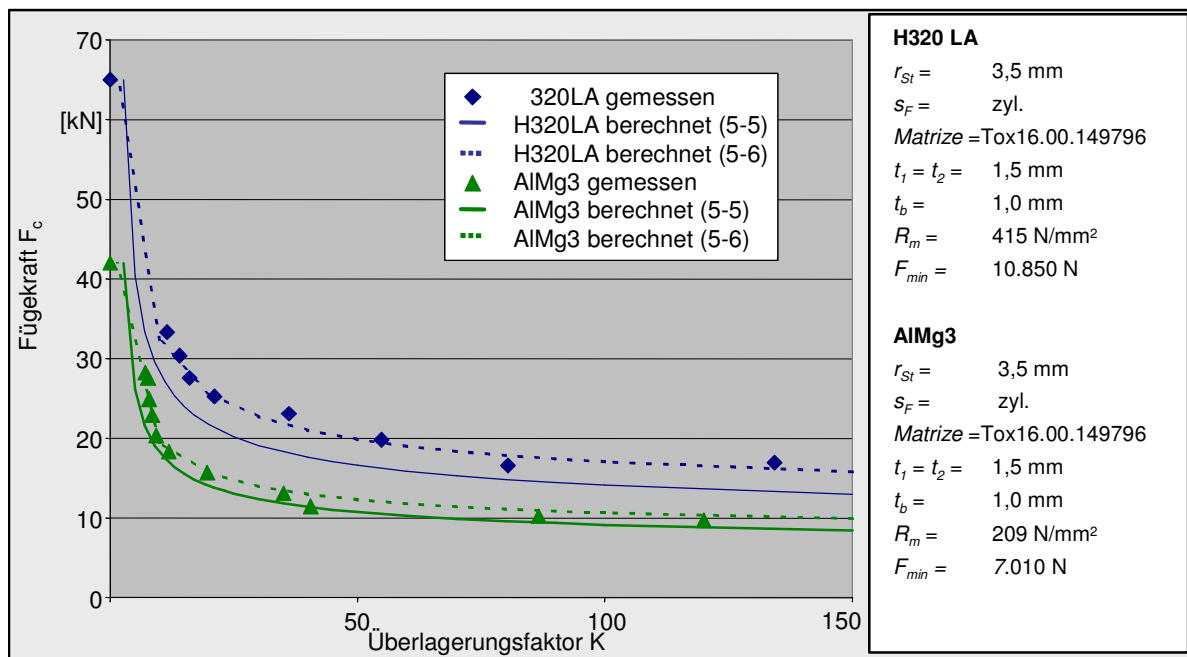


Bild 5-15 Vergleich der berechneten und gemessenen Parameter für H320LA und AlMg3

5.5 Folgerungen

Die durchgeführten Experimente zeigen für beide Berechnungsansätze eine gute Übereinstimmung der berechneten Werte mit den gemessenen Werten der Fügekraft. Hierbei ist die Übereinstimmung mit Gleichung (5-5) für die Materialien mit geringerer Festigkeit besser. Damit steht für das Fügen mit überlagerter Bewegung ein neuer Ansatz zur Verfügung, die Fügekraft mit Kenntnis der maximalen Fügekraft des konventionellen Clinchens und dem Überlagerungsfaktor abzuschätzen. Bei bekannten Kennwerten des Fügesystems, z. B. der Maximalkraft und Drehzahl, kann die notwendige Fügezeit für einen Prozess abgeschätzt werden, indem Gleichung (5-6) mit (5-4) nach der Fügezeit aufgelöst wird. Die Auslegung von Fügeeinrichtungen in automatisierten Abläufen wird vereinfacht. Die beschriebenen Zusammenhänge ermöglichen die flexible Nutzung von Radialclinchanlagen. Während bei konventionellen Clincheinrichtungen immer die Maximalkraft erreicht werden muss, um die Restbodendicke zu erreichen, kann die fehlende Maximalkraft bei Radialclincheinrichtungen durch eine längere Fügezeit und / oder eine höhere Rotationsdrehzahl ausgeglichen werden. Die Restbodendicke kann in Abhängigkeit von Belastungsfall und Fügwerkstoff für jede Clinchverbindung individuell eingestellt werden und ist nicht durch die Maximalkraft der Fügeeinrichtung beschränkt.

6 Entwicklung eines Berechnungsverfahrens für die Fügekraft beim Radialclinchen sowie Verifikation der Ergebnisse

6.1 Ermittlung der prozessrelevanten Einflussfaktoren und Eingrenzung grundlegender umformtechnischer Zusammenhänge

Für das automatisierte Radialclinchen ist es erforderlich, den Prozess sicher zu beherrschen und die für die Fügequalität und die Auslegung der Systemkomponenten notwendigen Prozessparameter zu kennen. Insbesondere die Kenntnis der notwendigen Fügekraft ist von Bedeutung für die Dimensionierung der Fügeeinrichtung. Deshalb sollen in diesem Abschnitt die Einflussfaktoren für die folgenden Einflüsse ermittelt werden:

- Prozesssicherheit bzw. Prozessunregelmäßigkeiten,
- Prozessgeschwindigkeiten und
- auftretenden Prozesskräfte.

Aus der Analyse ist bekannt, dass beim Clinchen z. T. hohe Fügekräfte auftreten. Aus der Fachliteratur zum Pressen mit überlagerter Bewegung ist darüber hinaus bekannt, dass die Kraftreduzierung nur endlich groß ist und mit zunehmenden Prozesszeiten sinkt [Scho92]. Für Anwendungen müssen deshalb Prozesszeiten und Kraftreduzierung in einem optimierten Verhältnis zueinander stehen und hohe Clinchgeschwindigkeiten zu Grunde gelegt werden. Es ist daher erforderlich, die Prozesszeiten gering zu halten und unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen ein Berechnungsverfahren für die Fügekraft zu entwickeln.

Die relativ komplexen Umformvorgänge beim Clinchen von Blechwerkstoffen [Klas94] und die Vielzahl von veränderlichen Einflussgrößen sprechen dabei für eine Vorgehensweise, bei der die zu untersuchenden Parameter zunächst eingegrenzt und Berechnungsmodelle für die entscheidenden Fügephasen I und II (Durchsetzen / Tiefziehen und Stauchen) entwickelt werden. Wenn möglich, werden Berechnungs- und Modellierungsansätze für die Kontaktfläche aus dem Pressen bzw. Nieten mit überlagerter Bewegung auf das Radialclinchen übertragen. Die Ergebnisse der Fügekraftberechnung bilden die Grundlage für die Auslegung der prototypischen Radialclincheinrichtung. Aus den Anforderungen in Kapitel 3 und den

konzeptionellen Überlegungen in Kapitel 4 lassen sich die in Bild 6-1 aufgeführten Einflussfaktoren ableiten und zusammenfassen.

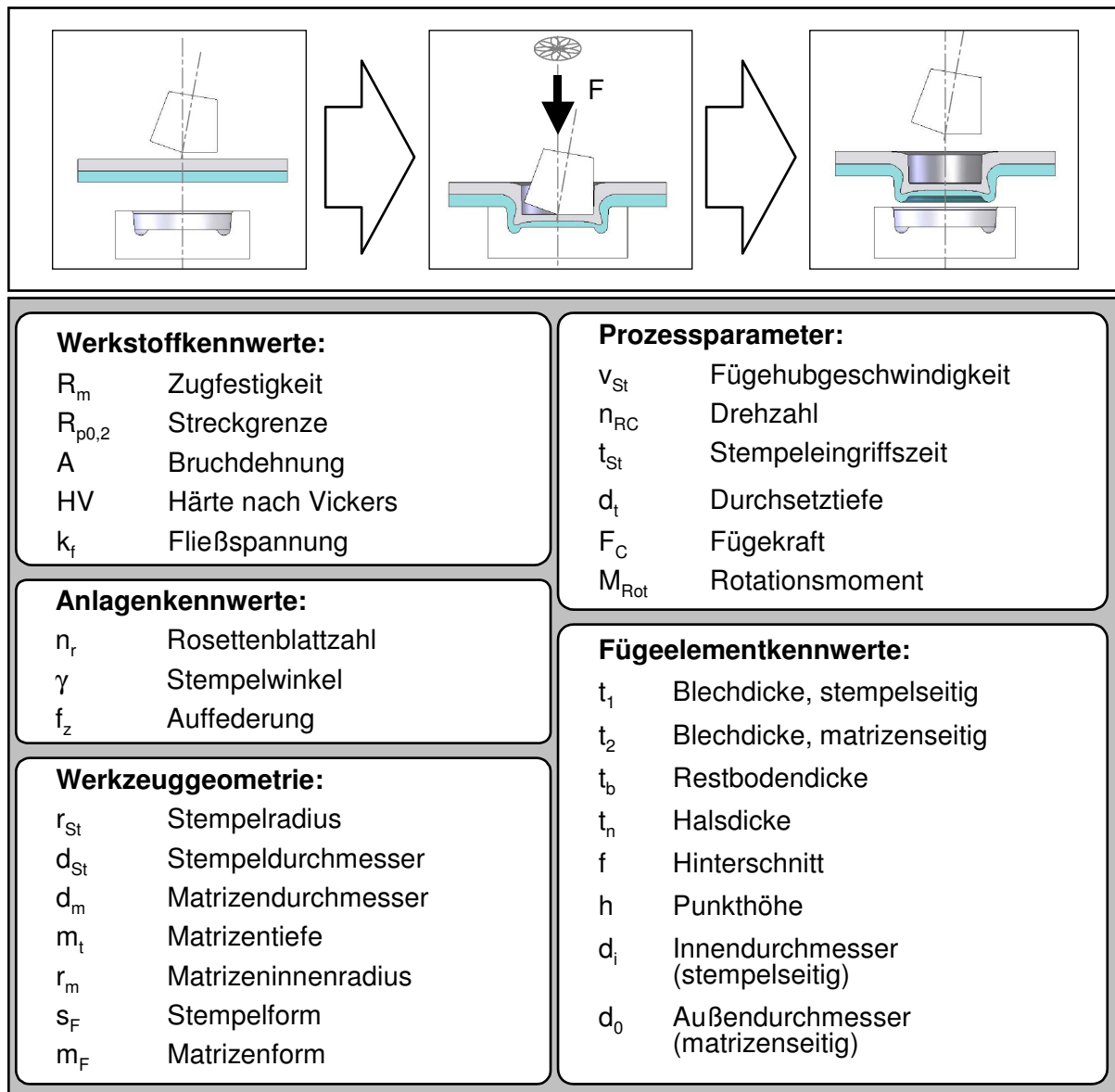


Bild 6-1 Einflussfaktoren auf den Radialclinchprozess

Das Ergebnis des Fügeprozesses ist von verschiedenen Prozessgrößen abhängig. Aus diesen Prozessgrößen werden die erforderlichen Grundlagen für die Entwicklung von Berechnungsmodellen zur Vorausberechnung des Fugekraftverlaufs und der daraus resultierenden Reaktionskräfte abgeleitet. Das in Kap. 4 konzipierte Füge-system wird aufgrund der Anforderungen aus Kap. 3 für die Verifikation des Berechnungsmodells und der Entwicklung der Prozessüberwachung realisiert.

6.2 Entwicklung eines Modells zur Berechnung der Fügekraft beim Radialclinchen

Verfahren zur Kraftbestimmung in der umformtechnischen Fügechnik [Budd89, Sack96] dienen vorwiegend der Bestimmung der Maximalkraft. Zur Bestimmung des Fügekraftverlaufes beim Radialclinchen können diese Ansätze nur bedingt genutzt werden. Berechnungsansätze, die für das Durchsetzen entwickelt worden sind, gehen von einem kleinen Spalt zwischen Stempel und Matrice aus. Dieser führt zu einem Abscheren der Blechebenen [Jimm63, Saue80]. Da dies bei dem in dieser Arbeit untersuchten Clinchverfahren nicht zutrifft, werden für das Radialclinchen Ansätze aus dem Bereich der Kaltmassivumformung mit überlagerter Bewegung [Zhan84, Scho92, Hein96], des Taumelnietens [Schn96] und Verfahren der oberen und unteren Schranke [Lang84] herangezogen. Die Erstellung der Berechnungsmodelle erfolgt in Anlehnung an die genannten Quellen.

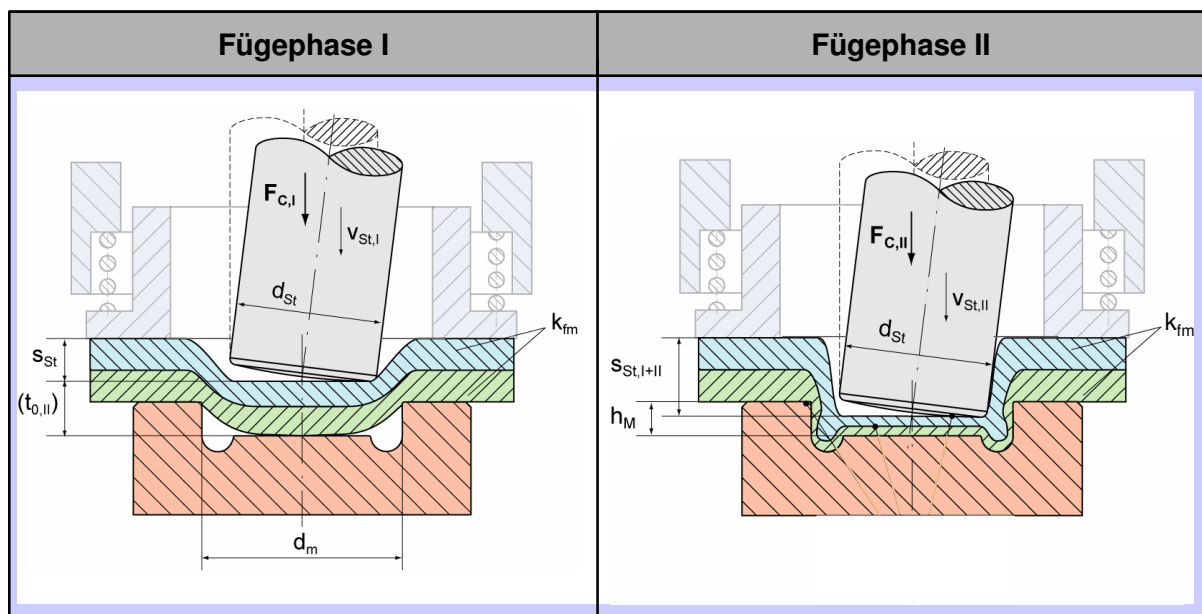


Bild 6-2 Phasen für den Fügeprozess beim Radialclinchen (jeweils mit Stempel in Endlage)

Die Analyse des Prozesses wird durch die umlaufende plastische Zone und die Stützwirkung der elastischen Umgebung erschwert. Daher wird die Stempelbahn auf dem Kegelmantel für die Untersuchungen herangezogen. Die relevanten Phasen beim Radialclinchen (B und C in Bild 3-7) sind in Bild 6-2 gezeigt. Die Fügephase II bzw. Stauchphase beginnt mit dem Aufsetzen des Bleches auf dem Matrizenboden.

6.3 Berechnung der Radialclinchgrößen Vorschubgeschwindigkeit, Hubzustellung, Radialkonstante und Kontaktflächenverhältnis

Die Prozessdauer vom ersten Aufsetzen des Stempels bis zum Erreichen der Restbodendicke wird durch die Stempelgeschwindigkeiten in den zwei Prozessphasen $i, i \in \{I, II\}$ bestimmt. Dem Bild 3-7 kann entnommen werden, dass für die erste Fügephase eine kurze Fügezeit mit einer hohen Stempelgeschwindigkeit realisiert wird. Für die Stauchphase wird mehr Zeit benötigt. Ausgehend von den unterschiedlichen Stempelgeschwindigkeiten in den Prozessphasen muss der Kraftbedarf für die jeweilige Phase berechnet werden. In Bild 6-3 sind die Grundgrößen für die phasenunabhängigen Prozessparameter für die überlagerte Bewegung dargestellt.

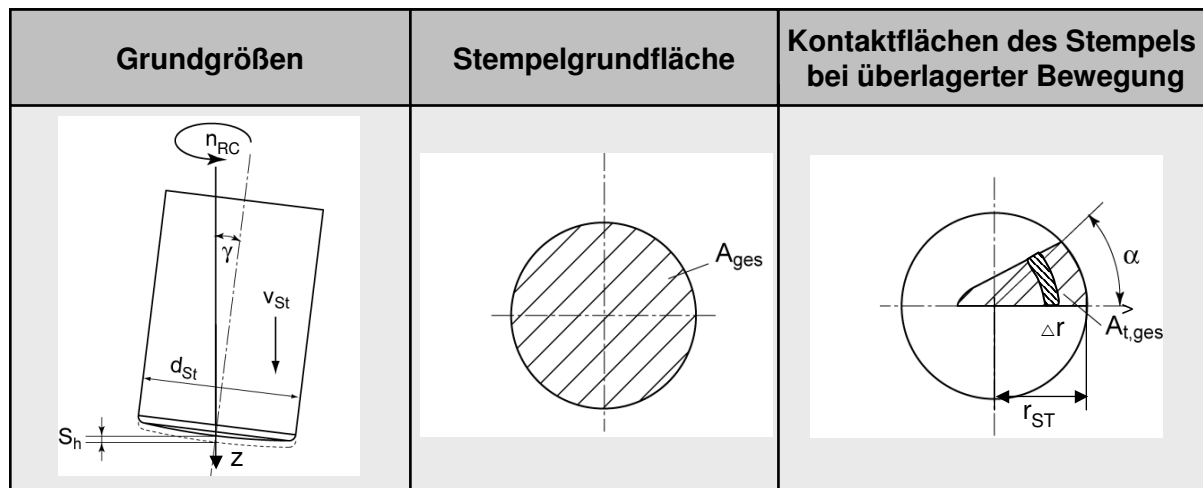


Bild 6-3 Prozessparameter beim Radialclinchen

Für den Stempel in z-Richtung können die Vorschubgeschwindigkeiten $v_{St,i}$ in Abhängigkeit des Stempelweges $s_{St,i}$ in beiden Phasen wie folgt beschrieben werden:

$$v_{St,i} = \frac{s_{St,i}}{t_i} \quad (6-1)$$

Bei konstanter Radialdrehzahl ($n_{RC} = const.$) über den gesamten Fügeprozess ergibt sich die Stempelzustellung $s_{h,i}$ in beiden Phasen wie folgt:

$$s_{h,i} = \frac{v_{St,i}}{n_{RC}} \quad (6-2)$$

Die dimensionslose Größe Q [Scho92, Zhan84] charakterisiert die Überlagerung der Stempelbewegung beim Radialclinchen. Die Größe beinhaltet die Parameter Stempelzustellung s_h , Stempelradius r_{St} und Radialwinkel γ . Für die Berechnungen wird der maximale Radialwinkel γ eingesetzt. Q wird dabei als Maß für die Größe der Kontaktfläche herangezogen. Q kann einen Maximalwert von $Q = 1$ aus geometrischen Gründen nicht überschreiten.

$$Q_i = \frac{s_{h,i}}{2 \cdot r_{St} \cdot \tan \gamma} \quad (6-3)$$

Der Berührwinkel α in beiden Phasen ist maßgebend für die überlagerte Bewegung und berechnet sich wie folgt:

$$\alpha_i = \cos^{-1} \left(1 - \frac{s_{h,i}}{2 \cdot r_{St} \cdot \tan \gamma} \right) = \cos^{-1} (1 - Q_i) \quad (6-4)$$

Als rechnerische Größe, die das Verhältnis der Kontaktfläche zur Gesamtfläche des Stempels beschreibt, wird das Kontaktflächenverhältnis λ [Scho92] verwendet.

$$\lambda = \frac{A_{t,ges}}{A_{ges}}, \text{ wobei gilt } 0 \leq \lambda \leq 1 \quad (6-5)$$

Die Kontaktflächenverhältnisse in beiden Phasen berechnen sich nach [Zhan84] wie im Folgenden dargestellt:

$$\lambda_i = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\bar{\alpha}_i}{2} + \frac{1 + 2 \cdot Q_i}{3} \sin \alpha_i \right) \text{ mit } \bar{\alpha}_i = \arccos(1 - Q_i) \quad (6-6)$$

Mit dem Kontaktflächenverhältnis kann die tatsächliche Stempeleingriffsfläche in Abhängigkeit von dem oben beschriebenen Basisparameter als Maß für die Kraftreduzierung dargestellt werden.

6.4 Berechnung des Fügekraftverlaufs beim Radialclinchen

6.4.1 Berechnung der Fügekraft in der Fügephase I

Beim Radialclinchen kann der Umformbereich durch die Matrizenrundfläche beschrieben werden. Beim Eindringen des Stempels entsteht eine Vertiefung: um diese Fläche erweitert sich der umgeformte Bereich. Für die Berechnung des Umformgrades ϕ wird die kreisförmige Grundfläche A_{ges} herangezogen, die durch den

Stempelvorschub um eine Zylindermantelfläche A_1 vergrößert wird, angenähert, wobei r_{St} der Stempelradius und s_{St} der Stempelweg ist:

$$A_{ges} = \pi \cdot \left(\frac{d_m}{2} \right)^2 \quad (6-7)$$

$$A_1 = \pi \cdot \left(\frac{d_m}{2} \right)^2 + 2 \cdot \pi \cdot r_{st} \cdot s_{St} \quad (6-8)$$

Der Umformgrad φ ist somit:

$$\varphi = \ln \frac{A_1}{A_{ges}} \quad (6-9)$$

Die Fügekraft

$$F_C = A_{ges} \cdot k_{wm} \quad (6-10)$$

kann aus der Fläche A_{ges} und dem mittelbaren Formänderungswiderstand k_{wm} [Lang84, Schu96, Spur84] berechnet werden. Der Formänderungswiderstand ergibt sich aus der Formänderungsfestigkeit k_{fm} unter Berücksichtigung der auftretenden Verluste. Die Verluste werden im Formänderungswirkungsgrad η_F zusammengefasst:

$$\eta_F = \frac{k_{fm}}{k_{wm}} \quad (6-11)$$

Der Umformwirkungsgrad liegt bei $\eta_F = 0,5$ bis $0,7$. Sind die Beanspruchungen gleichmäßig über die ganze Fläche verteilt, wird $\eta_F = 0,7$ gesetzt. Für ungleichmäßige Beanspruchungen ist $\eta_F = 0,5$ zu wählen [Lang84]. Für das Radialclinchen wird von einer ungleichmäßigen Beanspruchung ausgegangen, da der Bereich der Krafteinwirkung diskontinuierlich über die Blechoberfläche wandert.

Die bezogene Formänderungsarbeit w_{id} ist die Arbeit, die notwendig ist, um ein Volumenelement von 1 mm^3 umzuformen:

$$w_{id} = \int_0^{\varphi_g} k_f \cdot d\varphi \cong k_{fm} \cdot \varphi \quad (6-12)$$

In der Fügephase findet die wesentliche Umformung im Bereich des Stempels statt. Die Fügekraft beim Radialclinchen F_C kann mit:

$$F_C = A_{ges} \cdot k_{wm} \cdot \varphi = A \cdot \frac{k_{fm}}{\eta_F} \cdot \varphi = A_{ges} \cdot \frac{w_{id}}{\eta_F} \quad (6-13)$$

berechnet werden. Dabei ist k_{wm} der mittelbare Formänderungswiderstand, bzw. k_{fm} die mittlere Formänderungsfestigkeit, die sich aus dem integralen Mittel der Formänderungsfestigkeit zwischen Ein- und Auslauf der Formgebungszone ergibt. Vereinfacht kann statt des Integralmittelwerts das arithmetische Mittel verwendet werden.

Die Fügekraft für die axiale Stempelkraft beim Radialclinchen berechnet sich mit (6-7) bis (6-13) schließlich für die Fügephase I zu:

$$F_{c,I} = \lambda_I \cdot A_{ges} \cdot \frac{k_{fm}}{\eta_F} \cdot \ln\left(\frac{A_I}{A_{ges}}\right) = \lambda_I \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_m}{2}\right)^2 \cdot \frac{k_{fm}}{\eta_F} \cdot \ln\left(\frac{\left(\frac{d_m}{2}\right)^2 + 2 \cdot r_{St} \cdot s_{St}}{\left(\frac{d_m}{2}\right)^2}\right) \quad (6-14)$$

Mit Gleichung 6-14 ergibt sich der in Bild 6-4 dargestellte Kraftverlauf in z-Richtung für eine weggesteuerte Fügeeinrichtung für unterschiedliche Drehzahlen in der Fügephase I. Bei gleichen Prozesszeiten führt eine höhere Drehzahl zu einer Reduzierung der Fügekraft. Dies deckt sich mit dem in Kap. 5 entwickelten Zusammenhang der abfallenden Exponentialfunktion. Der Effekt der Kraftreduzierung sinkt mit zunehmender Drehzahl.

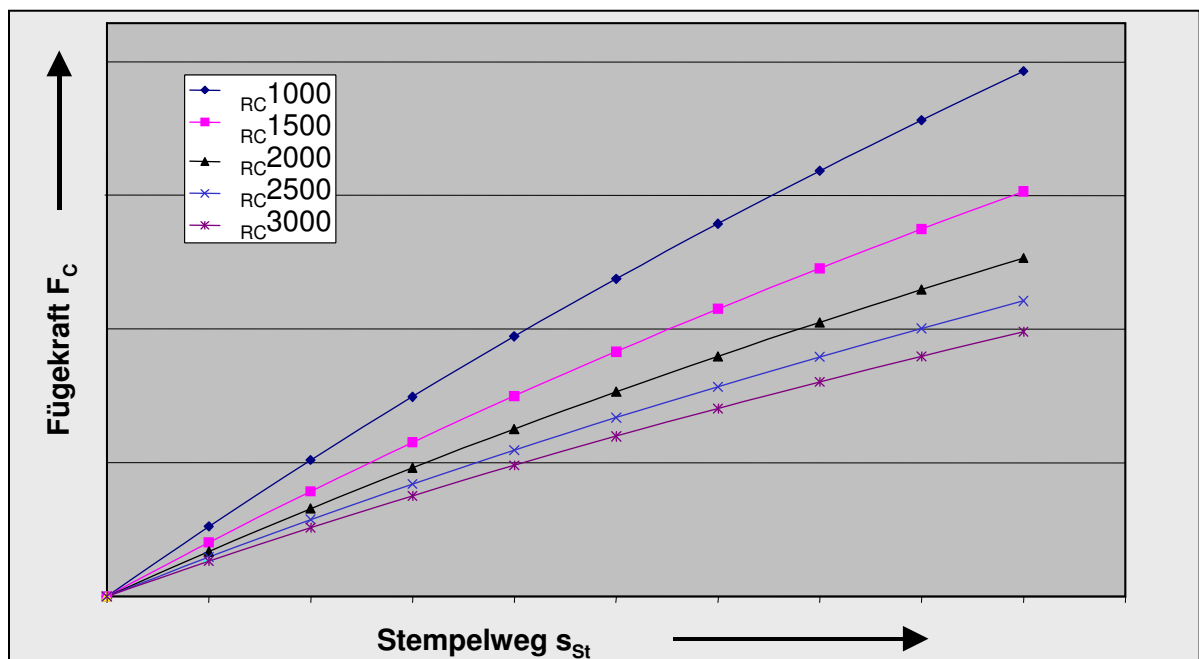


Bild 6-4 Darstellung des Fügekraftverlaufs über dem Stempelweg in Phase I

6.4.2 Berechnung der Fügekraft in der Fügephase II

Der Beginn der Fügephase II ist in Bild 6-2 dargestellt. Die Blechlagen haben nach Phase I den Matrizenboden erreicht, der Werkstoff wird dann vorwiegend tangential nach außen verdrängt. Zur Fügekraft aus der Phase I kommt mit der Stauchkraft in der Fügephase II eine weitere Kraftkomponente hinzu. Zur Berechnung des Kraftanteils aus dem Stauchprozess werden die beiden Blechlagen als Scheibe modelliert. Es wird angenommen, dass die Fügekraft für Biegeanteile in den Randbereichen der Scheibe durch den Stempelhals vernachlässigbar ist, da diese im Verhältnis zur Stauchkraft gering ist. Die Grundlage für die weiteren Berechnungen der Fügekraft in der Stauchphase bis zum Erreichen der Restbodendicke stellt die Plastizitätstheorie nach v. Mises dar [Lang84]. Es wird davon ausgegangen, dass sich der Werkstoff inkompressibel verhält und während des Fließvorgangs keine Volumenänderungen auftreten. Diese Voraussetzungen führen zu der Bedingung für das zulässige Geschwindigkeitsfeld. Diese Bedingung wird als Kontinuitätsgleichung des inkompressiblen Werkstoffs bezeichnet.

Die Extremalprinzipien der von Misesschen Plastizitätstheorie werden in der Umformtechnik dazu verwendet, die oberen und unteren Schranken für die zur Durchführung des Umformvorgangs erforderlichen äußeren Kräfte zu bestimmen [Lang84]. Unter Berücksichtigung von zulässigen Spannungs- und Geschwindigkeitsfeldern werden Werte für die Umformkräfte ermittelt, die die obere und untere Schranke für die auftretenden Kräfte bilden.

6.4.2.1 Berechnung der mittleren Druckspannung

Unter Beachtung des Kontaktflächenverhältnisses λ und der Stauchspannung $\bar{p}$ kann für die Umformkraft beim plastischen Umformen in Phase II für den Stauchanteil angesetzt werden [Schn96]:

$$F_{c, \text{stauchen}} = \lambda_{II} \cdot \pi \cdot r_{St}^2 \cdot \bar{p} \quad . \quad (6-15)$$

Nimmt man an, dass die erforderliche Stauchspannung um 15 Prozent [Spur84] über der erforderlichen Fließspannung liegt, gilt für die mittlere Druckspannung:

$$\bar{p} = \bar{n}_\sigma \cdot 1,15 \cdot k_f \quad . \quad (6-16)$$

Die Berechnung des mittleren Umformfaktors $\bar{n}_\sigma$ erfolgt nach der Methode der oberen Schranke. Dafür muss unter der Voraussetzung der Volumenkonstanz ein kinematisch zulässiges Geschwindigkeitsfeld aufgestellt werden. Dies wurde für die überlagerte Bewegung nachgewiesen [Schn96, Scho92]. Durch die aufzubringende Umformleistung lässt sich der mittlere Umformfaktor $\bar{n}_\sigma$ und somit die Umformkraft berechnen.

6.4.2.2 Berechnung der Umformleistung

Die Umformleistung beim Radialclinchen setzt sich aus den Teilen ideale bzw. idealer Umformleistung P_{id} , Reibleistung P_R und Scherleistung P_S zusammen [Lang84].

Nach der Methode der oberen Schranke gilt für die Stempelkraft:

$$F_{St} = \frac{P_{id} + P_R + P_S}{v_{St}} \quad . \quad (6-17)$$

Es gilt nach [Mayr83] für die ideale Umformleistung mit φ_R als Drehwinkel:

$$P_{id} = k \cdot \sqrt{2} \cdot \int_V \sqrt{\dot{\epsilon}_r^2 + \dot{\epsilon}_z^2 + \dot{\epsilon}_{\varphi_R}^2} \cdot dV \quad (6-18)$$

mit $\dot{\epsilon}_r = 0$, $\dot{\epsilon}_{\varphi_R} = -\dot{\epsilon}_z$, $\frac{\partial v_z}{\partial z} = \dot{\epsilon}_z$ und der Volumenkonstanz $\dot{\epsilon}_r + \dot{\epsilon}_z + \dot{\epsilon}_{\varphi_R} = 0$ erhält man:

$$P_{id} = 2 \cdot k \cdot v_{St} \cdot r \cdot \Delta r \cdot \varphi_R \quad . \quad (6-19)$$

Für die Reibleistung in der Kontaktfläche kann angesetzt werden:

$$P_R = \int_{A_R} |\tau_R \cdot \Delta v| \cdot dA_R \quad . \quad (6-20)$$

Es wird die Schubfließgrenze nach Tresca für die tatsächlich wirkende Reibschubspannung τ_R eingesetzt. Unter der Annahme, dass die Relativgeschwindigkeit zwischen Stempel und Blechoberfläche der Tangentialkomponente der Wandergeschwindigkeit $z = t$ entspricht, ergibt sich:

$$P_R = \mu \cdot \frac{k_f}{\sqrt{3}} \cdot \frac{v_{St}}{t} \cdot \varphi_R^2 \cdot r^2 \cdot \Delta r \quad . \quad (6-21)$$

Für die Scherleistung kann angesetzt werden:

$$P_S = \int_{A_S} |\tau_{\max} \cdot \Delta v| \cdot dA_S \quad (6-22)$$

Geht man davon aus, dass an der Grenze zum nicht umgeformten Gebiet ebenfalls die Spannung nach der Schubfließgrenze von Tresca $\tau = \frac{k_f}{\sqrt{3}}$ wirkt, folgt:

$$P_S = \frac{k_f}{\sqrt{3}} \cdot v_{St} \cdot \varphi_R \cdot r \cdot \Delta r \quad (6-23)$$

6.4.2.3 Berechnung des mittleren Umformfaktors

Durch den Stempel wird die äußere Leistung P_A in das Blech eingebracht [Schn96]:

$$P_A = \int_A \bar{p} \cdot v_{St} \cdot dA \quad (6-27)$$

bzw.
$$P_A = \bar{p} \cdot v_{St} \cdot \varphi_R \cdot r \cdot \Delta r \quad (6-28)$$

Nun wird, analog zur Methode der oberen Schranke,

$$P_A = P_{id} + P_R + P_S \quad (6-29)$$

mit (6-16) und (6-28)
$$\bar{n}_\sigma = \frac{\bar{p}}{1,15 \cdot k_f} = \frac{P_A}{\int_A v_{St} \cdot dA_K \cdot 1,15 \cdot k_f} = \frac{P_{id} + P_R + P_S}{v_{St} \cdot \varphi_R \cdot r \cdot \Delta r \cdot 1,15 \cdot k_f} \quad (6-30)$$

gesetzt.

So ergibt sich für den Mittelwert des Umformfaktors $\bar{n}_\sigma$ auf der Kontaktfläche:

$$\bar{n}_\sigma = \frac{1}{A_K} \cdot \int \left(\frac{2}{1,15} + \frac{\mu}{2 \cdot t} \cdot \varphi_R \cdot r + \frac{1}{2} \right) dA_K \quad (6-31)$$

Mit $dA_K = r \cdot d\varphi_R \cdot dr$ ergibt sich:

$$\bar{n}_\sigma = \frac{1}{\lambda_{II} \cdot A_{ges}} \cdot \left[\int_0^\alpha \int_0^{r_{St}} \left(\frac{2}{1,15} + \frac{\mu}{2 \cdot t} \cdot \varphi_R \cdot r + \frac{1}{2} \right) \cdot r \cdot d\varphi_R \cdot dr \right. \\ \left. + \int_\alpha^\pi \int_0^{\frac{2 \cdot r_{St} \cdot Q}{(1 - \cos \varphi_R)}} \left(\frac{2}{1,15} + \frac{\mu}{2 \cdot t} \cdot \varphi_R \cdot r + \frac{1}{2} \right) \cdot r \cdot d\varphi_R \cdot dr \right] \quad (6-32)$$

Durch Berechnung des Integrals unter Anwendung der mathematischen Software Maple, Version 7.0 ergibt sich der mittlere Umformfaktor zu:

$$\bar{n}_\sigma = \frac{1}{\lambda_{II} \cdot A_{ges}} \cdot \left(\frac{0,0833 \cdot \mu \cdot r_{St}^3 \cdot \alpha^2}{t} + 1,1196 \cdot r_{St}^2 \cdot \alpha + \right. \\ \frac{-0,83 \cdot 10^{-11} r_s^2 Q^2 \left(-0,4 \cdot 10^{11} \mu r_{St} Q \alpha \tan(\frac{1}{2} \alpha)^4 - 0,4 \cdot 10^{10} \mu r_{St} Q \tan(\frac{1}{2} \alpha) - 0,27 \cdot 10^{11} \mu r_{St} Q \alpha \tan(\frac{1}{2} \alpha)^2 \right)}{t \cdot \tan(\frac{1}{2} \alpha)^5} \\ \frac{-0,19 \cdot 10^{11} \mu r_{St} Q \tan(\frac{1}{2} \alpha)^3 - 0,8 \cdot 10^{10} \mu r_{St} Q \alpha + 0,43 \cdot 10^{11} \mu r_{St} Q \ln(\tan(\frac{1}{2} \alpha)^2) \cdot \tan(\frac{1}{2} \alpha)^5}{t \cdot \tan(\frac{1}{2} \alpha)^5} \\ \left. \frac{-0,21 \cdot 10^{11} \mu r_{St} Q \ln(1 + \tan(\frac{1}{2} \alpha)^2) \tan(\frac{1}{2} \alpha)^5 - 0,27 \cdot 10^{12} t \cdot \tan(\frac{1}{2} \alpha)^4 - 0,9 \cdot 10^{11} t \cdot \tan(\frac{1}{2} \alpha)^2}{t \cdot \tan(\frac{1}{2} \alpha)^5} \right) \quad (6-33)$$

6.4.2.4 Berechnung der Fließspannung

Die Fließkurve für Kaltumformungen von unlegierten und niedriglegierten Stählen lässt sich mit der Ludwik-Hollomon-Gleichung [Lang84] wie folgt darstellen:

$$k_f = C \cdot \varphi^n \quad (6-34)$$

Diese Funktion gilt für unlegierte und niedriglegierte Stähle bei Raumtemperatur bis zu einem Umformgrad von $\varphi \approx 1$, da bei Raumtemperatur die Umformgeschwindigkeit im allgemeinen keinen Einfluss auf die Fließspannung hat. Der Verfestigungsexponent n kann Werkstofftabellen entnommen oder durch die Aufnahme von Fließkurven ermittelt werden. Für die Konstante C gilt nach Lange [Lang84] folgende Beziehung:

$$C = R_m \cdot \left(\frac{e}{\varphi_g} \right)^n \quad (6-35)$$

Da in der Phase II die Bleche gestaucht werden, lässt sich der Umformgrad φ als Funktion der Blechdicke wie folgt ausdrücken:

$$\varphi = \ln \frac{t_{0,II} - s_{St,II}}{t_{0,II}} \quad . \quad (6-36)$$

Für das weitere Stauchen nimmt die Blechdicke analog zum Stempelweg in der Phase II ab:

$$t_{II} = t_{0,II} - s_{St,II} \quad . \quad (6-37)$$

Damit folgt für die Fließspannung in Abhängigkeit vom Stempelweg unter der Annahme $k_f(\varphi) = k_f(-\varphi)$:

$$k_f = C \cdot \left(\ln \frac{t_{0,II} - s_{St,II}}{t_{0,II}} \right)^n \quad . \quad (6-38)$$

Die gesamte axiale Fügekraft $F_{c,II}$ der Fügephase II wird aus der Summe der Fügekraftkomponenten analog zur Fügephase I und der Fügephase berechnet. Abweichungen zwischen tatsächlichem und berechnetem Werkstoffverhalten werden durch die Einführung eines Korrekturfaktors C_R für die radiale Bewegung berücksichtigt. Mit (6-14), (6-15) und (6-34) lautet die neu entwickelte Gleichung der Fügekraft für das Radialclinchen in Phase II:

$$F_{c,II} = \lambda_{II} \cdot C_R \cdot \left(\left(\pi \cdot \left(\frac{d_m}{2} \right)^2 \cdot \frac{k_{fm}}{\eta_F} \cdot \ln \left(\frac{\left(\frac{d_m}{2} \right)^2 + 2 \cdot r_{st} \cdot s_{St}}{\left(\frac{d_m}{2} \right)^2} \right) \right) + \left(\pi \cdot r_{St}^2 \cdot \overline{n_\sigma} \cdot 1,15 \cdot k_f \right) \right) \quad (6-40)$$

Bild 6-5 zeigt die Darstellung des berechneten Kräfteverlaufs gegen den Stempelweg in Phase II des Radialclinchprozesses mit einer konstanten Fügezeit.

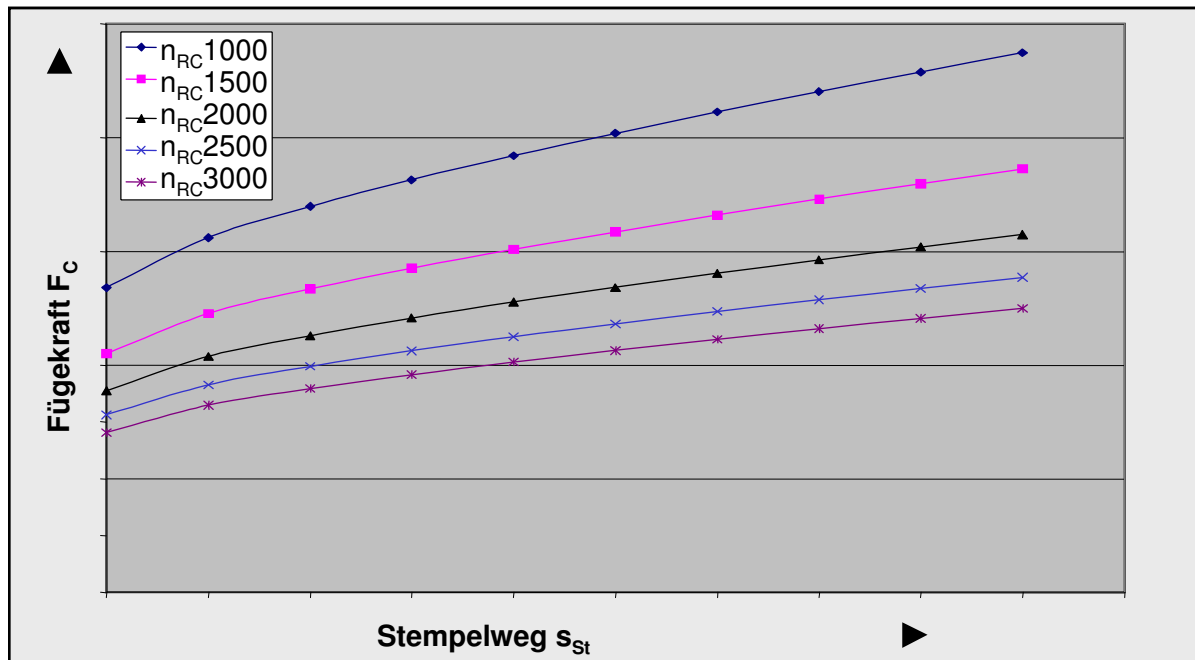


Bild 6-5 Darstellung des Fügekraftverlaufs über dem Stempelweg in Phase II

6.5 Berechnung der Auffederung der Fügeeinrichtung und der Niederhalterkraft

Zum Vergleich der berechneten mit den gemessenen Fügekräften muss die Federkraft des Niederhalters und die Auffederung der Zange mit berücksichtigt werden. Beim umformtechnischen Fügen ist eine elastische Auffederung stationärer und mobiler Fügeeinrichtungen während des Fügeprozesses kaum vermeidbar. Das bedeutet, der gemessene absolute Fügeweg des Fügeprozesses ist größer als der für die Ausbildung des Fügeelementes entscheidende relative Fügeweg. Die im Wegsignal der Prozessüberwachung sichtbar werdende Auffederung ist stark einrichtungsabhängig. Zur Berücksichtigung der Auffederung im Prozessmodell wird diese mit der Verlagerungskennlinie (Federkennlinie) $f_z = f(F)$ berücksichtigt. Zwischen der Fügekraft F_c und der dadurch hervorgerufenen Gesamtauffederung f_z besteht nach dem Hookeschen Gesetz ein linearer Zusammenhang:

$$C_z = \frac{\Delta F}{\Delta f_z} = \frac{F_c}{f_z} \quad . \quad (6-42)$$

Die Zangenauffederung $f_z = f(F_c)$ ist somit eine Funktion der Kraft in z-Richtung:

$$f_z = \frac{F_c}{C_z} \quad . \quad (6-43)$$

Der in Kapitel 4.3 konzipierte Niederhalter übt während des Fügeprozesses eine Kraftkomponente auf die Fügeeinrichtung aus. Im Bild 6-6 ist ein passiver Niederhalter zum Zeitpunkt des Aufsetzens auf dem Blech modelliert. Bei passiven Niederhaltern ist die Federkennlinie C_{Nh} und die Anzahl der Federn n_{Nh} zu berücksichtigen. Die Niederhalterkraft, die bis zum Ende des Fügeprozesses aufgebaut wird, kann, wie in Bild 6-6 beschrieben, berechnet werden. Hierbei ist h_{wmax} der Weg des Stempels vom Aufsetzen des Niederhalters auf das Blech bis zur Endlage des Stempels bei Erreichen der Restbodendicke t_b in Abhängigkeit der Distanz h_s von Stempelspitze bis zur stempelseitigen Blechoberfläche, der Gesamtblechdicke t_t und der Matrizentiefe m_t .

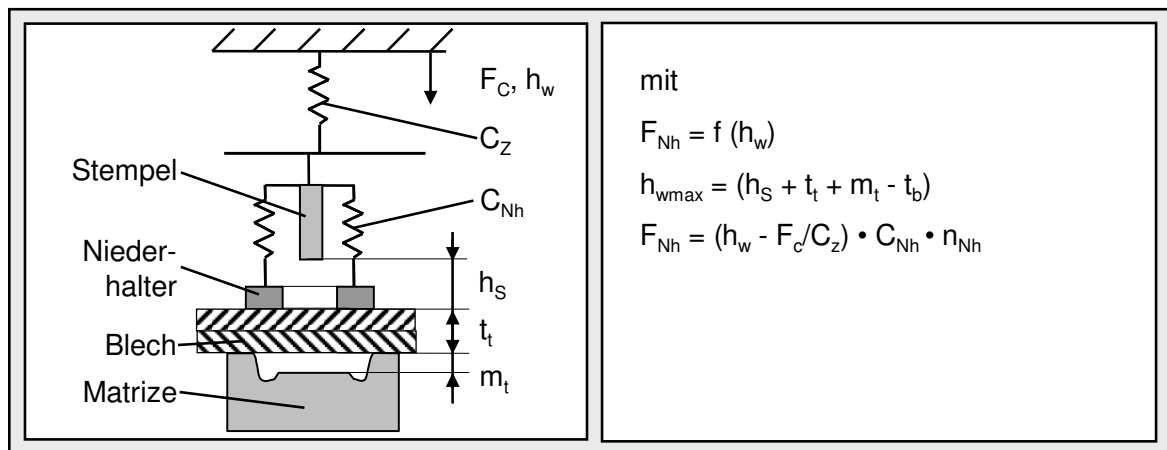


Bild 6-6 Modellierung des Niederhalters

Nach der Berechnung der Umformkräfte in den Phasen Tiefziehen und Stauchen und der Berechnung des Einflusses des Niederhalters auf die Fügeeinrichtung werden die Ergebnisse zu einem Kraftverlauf integriert und anhand von verschiedenen Blechwerkstoffen verifiziert. Die Auffederung und die Niederhalterkräfte werden hierbei vom Kraft- und Wegverlauf subtrahiert.

6.6 Vergleich des theoretisch ermittelten Kraftverlaufs mit experimentellen Untersuchungen

Zur Aufnahme des experimentellen Fügekraftbedarfs beim Radialclinchen für Blechwerkstoffe wird die in Kapitel 4 konzipierte Versuchsanlage realisiert. Für die in Bild 6-7 angegebenen Parameter wird der Vorschub entsprechend eingestellt und dem theoretisch ermittelten Kraftverlauf gegenübergestellt. Dargestellt sind die gemittelten Werte über 7 Versuche. Die experimentell ermittelten Werte zeigen hierbei

eine gute Übereinstimmung mit den Berechnungen. Für die relevanten Bereiche mit hohen Fügegeschwindigkeiten und höheren Prozesskräften liegt die Abweichung bei -5 Prozent bzw. +10 Prozent zwischen den berechneten und den gemessenen Maximalkraftverläufen beim Radialclinchen. Für die sehr niedrigen Fügegeschwindigkeiten mit einer Fügekraft von 17,1 kN liegt die Abweichung bei +22 Prozent.

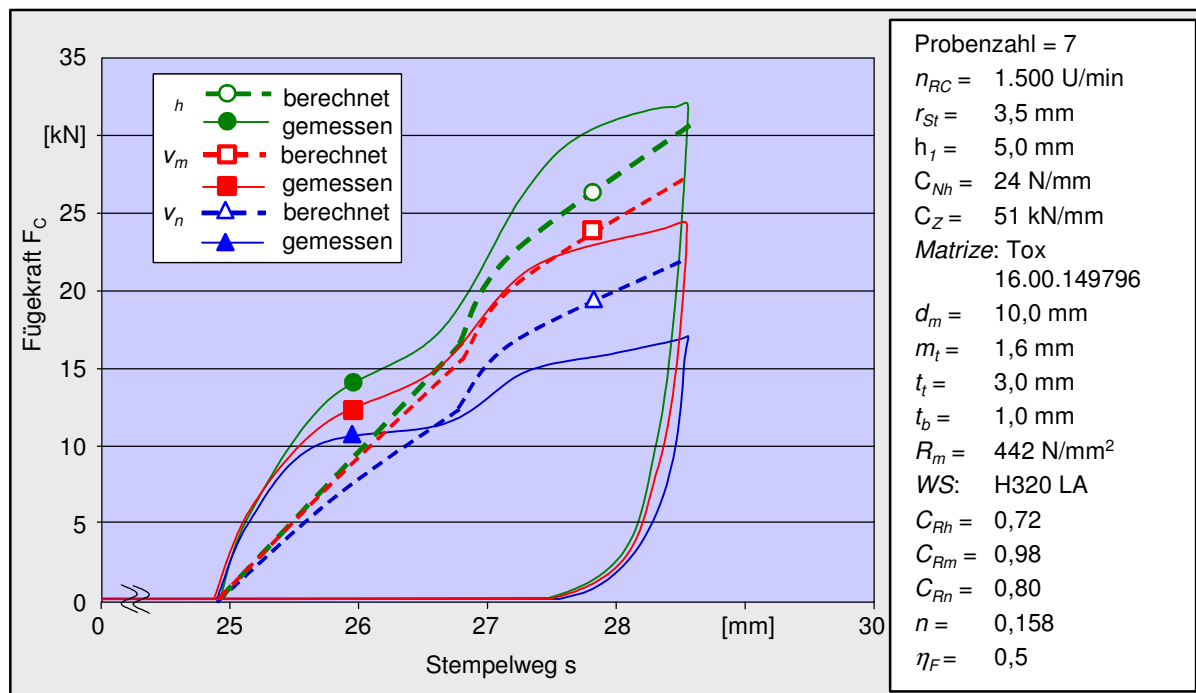


Bild 6-7 Gegenüberstellung der theoretischen und der experimentell bestimmten Fügekräfte beim Radialclinchen mit dem Werkstoff H320

Zur Verifikation des Berechnungsmodells wird der Werkstoff DC 04 mit ähnlichen Prozesskräften untersucht. Die Gegenüberstellung der theoretischen und experimentell ermittelten Prozesskräfte kann dem Bild 6-8 entnommen werden. Wie schon beim Werkstoff H320LA ist die Übereinstimmung zwischen den theoretischen und experimentell ermittelten maximalen Fügekräften gut gegeben.

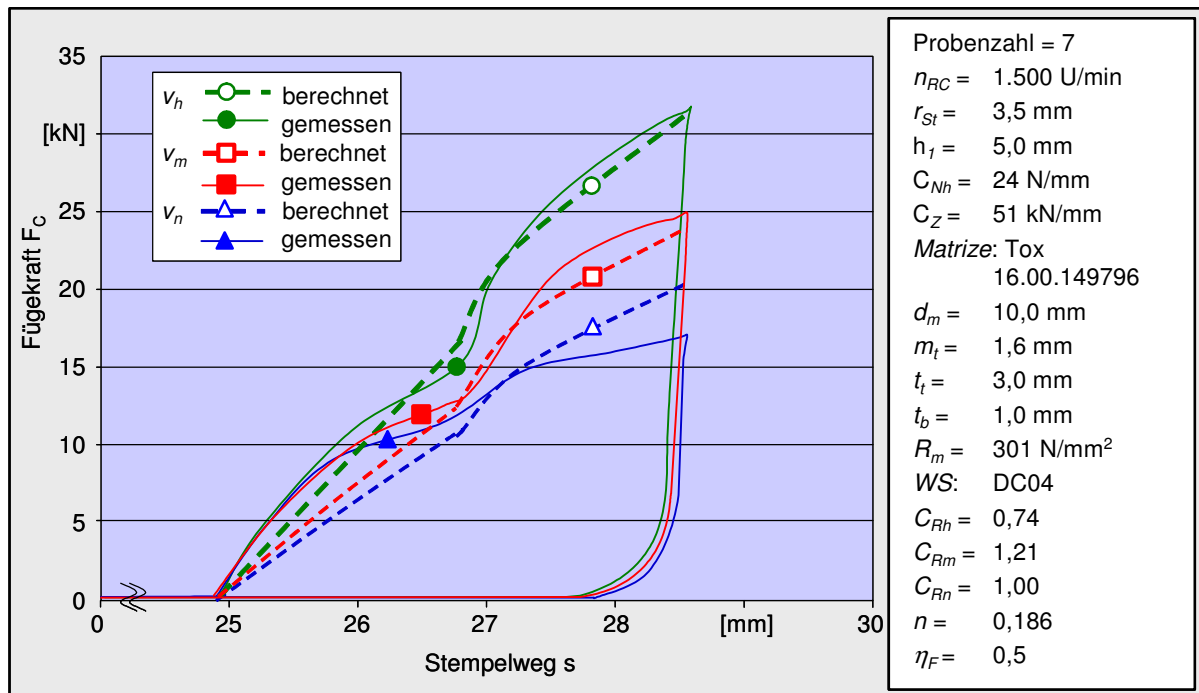


Bild 6-8 Gegenüberstellung der theoretischen und der experimentell bestimmten Fügekräfte beim Radialclinchen mit dem Werkstoff DC04

Für die hohen Fügegeschwindigkeiten konnten keine signifikanten Abweichungen festgestellt werden. Die Abweichungen für die mittleren Fügegeschwindigkeiten betragen -12 Prozent. Für die niedrigen Fügegeschwindigkeiten und somit hohen Prozesszeiten liegen die Abweichungen bei +22 Prozent.

6.7 Folgerungen

Durch die experimentellen Versuche konnte eine gute Übereinstimmung der maximalen Kräfte mit den theoretisch bestimmten maximalen Fügekräften festgestellt werden. Das hier entwickelte Berechnungsmodell mit Berücksichtigung der charakteristischen überlagerten Stempelbewegung ist zur Berechnung der maximalen Fügekräfte beim Radialclinchen in Kenntnis der Fügeaufgabe und der Fließkurve der Fügepartner geeignet. Das Berechnungsmodell wurde dabei sowohl für den höherfesten Stahlwerkstoff H320LA als auch für den Tiefziehwerkstoff DC04 verifiziert. Die theoretischen Grundlagen sind auf weitere Fügeworkstoffe übertragbar. Es steht somit ein neues Verfahren zur Berechnung der Fügekräfte beim Radialclinchen zur Verfügung, das die Anlagenauslegung vereinfacht.

7 Entwicklung einer Prozessfehlerklassifikation auf der Basis von neuronalen Netzen sowie deren Verifikation

7.1 Grundlagen und Vorgehensweise

Die sich aus der Analyse ergebende Problemstellung fordert, ein neuronales Netz so zu gestalten und zu trainieren, dass es eine geeignete Approximierung an den Radialclinchprozess darstellt, um diesen zu überwachen und die Prozessfehler zu klassifizieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Prozessüberwachung mit Fehlerklassifikation für den Radialclinchprozess entwickelt. Durch die Fehlerklassifikation kann zusätzlich zur Gutteil- / Schlechttelaussage eine Aussage zur Fehlerursache gemacht werden und definierte Fehlerstrategien verfolgt bzw. die Einbindung in die Produktionssysteme vereinfacht werden.

Die Entwicklung der Prozessüberwachung mit Fehlerklassifikation für das Radialclinch erfolgt in mehreren Schritten. Zur Erstellung eines Überwachungsmodells für die Fehlerklassifikation sind folgende Teilschritte notwendig:

- Aufnahme der ausgewählten Prozesssignale (Stempelweg, Fügekraft, Fügedrehzahl, Radialmoment),
- Bestimmung geeigneter Signalanalysemethoden,
- Ermittlung signifikanter Merkmale in den Prozesssignalen (Minima, Maxima, Steigungen),
- Entwicklung und Auswahl geeigneter Netzwerkmodelle.

Als Qualitätskriterium für die Auswahl und den Entwurf der Netzwerkmodelle gilt die Generalisierungsfähigkeit des neuronalen Netzes. Das heißt, je mehr unbekannte Datensätze richtig klassifiziert werden, desto besser wird die Arbeit des Netzes bewertet [Zell94]. Dabei ist zu beachten, dass die Qualität der Generalisierungsfähigkeit nicht nur von Netztyp und Netztopologie abhängt, sondern insbesondere von der Auswahl der Trainingsmuster.

Ziel der Merkmalsselektion ist es, dem neuronalen Netz jene Daten zur Verfügung zu stellen, die für die Mustererkennung am besten geeignet sind. Eine Mustererkennung ist nur so gut, wie die aus den Signalen selektierten Merkmale. Die Ge-

winnung geeigneter Kennwerte aus den Messsignalen ist ein wichtiges Teilproblem bei der automatischen Mustererkennung. Das Aufsuchen des optimalen Netztyps bzw. der optimalen Netztopologie ist die Vor- und Nachbereitung der Signale. Deshalb wird die in Bild 7-1 dargestellte Vorgehensweise in Anlehnung an [Frie99] verfolgt.

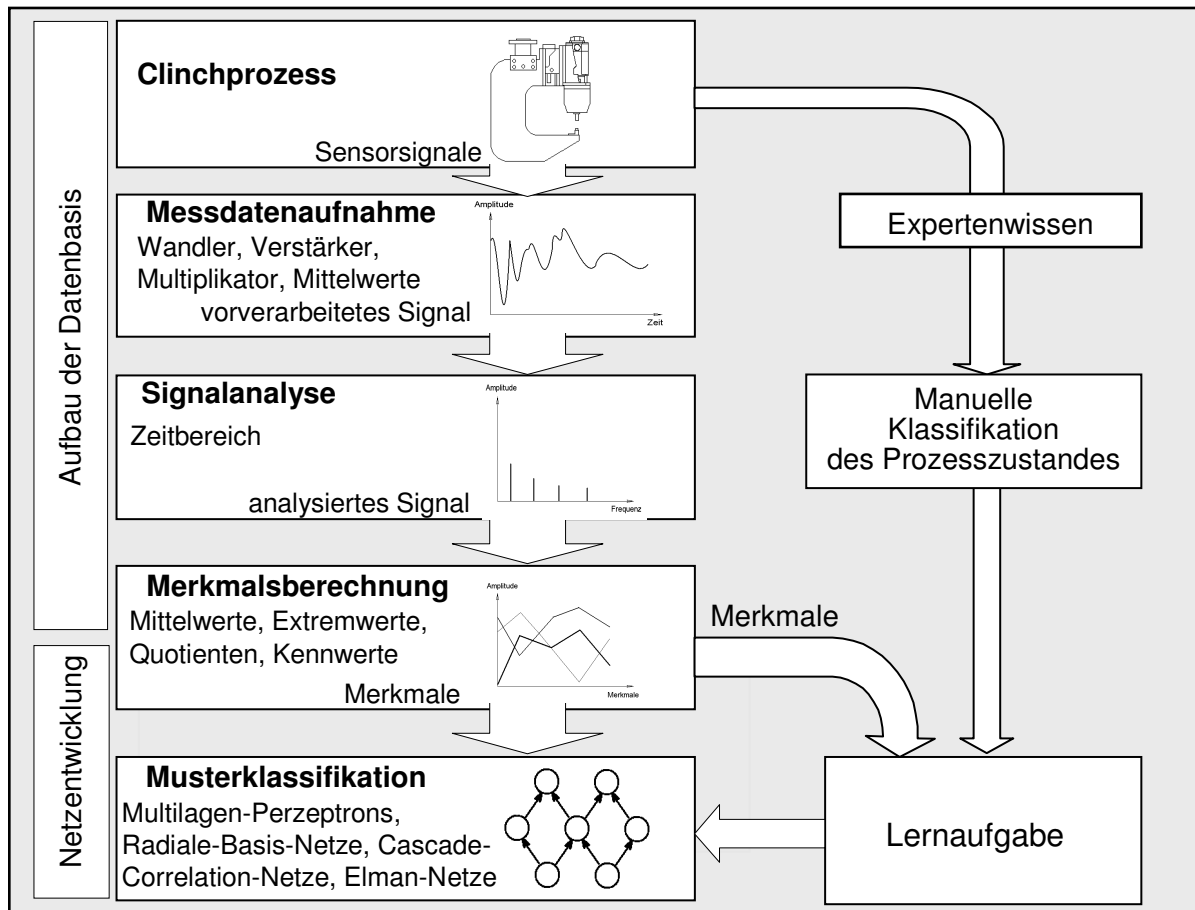


Bild 7-1 Vorgehensweise zur Aufbereitung der Messdaten beim Radialclinchen [Frie99]

7.2 Klassifikation der Fehler beim Radialclinchen

Die in Kapitel 3.3 beschriebenen Prozessfehler beim Radialclinchen lassen sich in 22 Kategorien klassifizieren. Die Kategorien mit Unterausprägungen und Fehlerbeschreibung sind in Bild 7-2 dargestellt. Für Fehler, die sich in den Prozessgrößen charakteristisch auswirken und sich von anderen Fehlern klar abgrenzen, werden 30 Datensätze angefertigt. Für Fehler, die unterschiedliche Ausprägungen in den Prozessgrößen aufweisen, werden 60 Datensätze aufgenommen. Abweichungen entstehen durch nicht nutzbare Datensätze. Zur Verifikation der entwickelten neu-

ronalen Netze wurden die in Bild 7-2 dargestellten Testdatensätze zu einem späteren Zeitpunkt aufgenommen. Die Trainingsdatensätze wurden in vier Durchgängen nach 15 vorherigen Clinchungen aufgenommen, um einen stabilen Prozess zu gewährleisten. Fehlklassifikation bedeutet, dass der Prozessfehler zwar erkannt wird, aber nicht der richtigen Ursache, also einer falschen Klasse zugewiesen wird. Die Erkennungssicherheit der Prozessüberwachung bedeutet in diesem Zusammenhang, die Erkennungswahrscheinlichkeit eines unzulässigen Prozesszustandes ohne Berücksichtigung der Klassifikation.

Fehler- quelle	Nr.	Klassifikation	Kurzbeschreibung	Datensätze	
				Training, Validation	Test
Bedienungsfehler	1	Gut	Klassifizierung 'gut' durch Prüfung $t_b = 1,0$ mm, Scherzug, Stempel: zyl., 7,0 mm, Matrize: TOX: 16.00.149796, $t_1=t_2= 1,5$ mm, H320M LA	60	20
	2	Kein Blech	Clinchprozess ohne Werkstoff	30	10
	3	Ein Blech	Statt zwei Blechen ein Blech	30	10
	4	Zu viele Bleche	Statt zwei Blechen drei Bleche	30	10
	5	Falscher Werkstoff (zu weicher Werkstoff)	AlMg3 $t_1=t_2= 1,5$ mm, sowohl matrizen- als auch stempelseitig	30	10
			Stempelseitig AlMg3 und matrizenseitig H320M LA	30	10
			Stempelseitig H320M LA und matrizenseitig AlMg3	28	10
	6	Falscher Werkstoff (zu fester Werkstoff)	H400 ($t_1=t_2= 1,5$ mm) sowohl matrizen- als auch stempelseitig	27	10
			Stempelseitig H400 und matrizenseitig H320M LA	30	10
			Stempelseitig H320M LA und matrizenseitig H400	30	10
	7	Fremdkörper (Papier)	Starkes Papier (210 g/m^2) auf dem stempelseitigen Blech	32	10
			Starkes Papier (210 g/m^2) unter dem matrizenseitigen Blech	30	10
			Einlegen von starkem Papier (210 g/m^2) zwischen die Bleche	29	10
Einrichtungsfehler	8	Fremdkörper (Aluminium)	Fremdkörper AlMg3 ($1,0 \times 4,0 \times 4,0$ mm) auf dem stempelseitigen Blech	30	10
			Fremdkörper AlMg3 ($1,0 \times 4,0 \times 4,0$ mm) auf dem Matrizenboden	28	10
			Fremdkörper AlMg3 ($1,0 \times 4,0 \times 4,0$ mm) zwischen den Blechen	28	10
	9	Fremdkörper	Bleche zwischenlagig mit Maschinenfett (Hersteller Fuchs, Typ Renolit H443-HD88 Konsistenzklasse 2/3, ca. 1,0 mm)	30	10
	10	Blechabstand	Bleche mit 1mm Spalt (Auflage: $r = 25$ mm)	30	15
	11	Blech verbogen	Oberes Blech (100×100 mm) mit mittiger Abkantung von $15^\circ \pm 1^\circ$	30	10
	12	Falsche Drehzahl	Von 600 U/min bis 2400 U/min in 250 U/min - Schritten	60	20
	13	Falscher Druck	Einstellung Fügekraft von 100 bar bis 200 bar in 25 bar Schritten	24	10
	14	Falscher Stempel	Stempeldurchmesser 7,5 mm statt 7,0 mm	30	10
	15	Falsche Matrize	Durchmesser 12,0 mm statt 10,0 mm, Tiefe 1,5 mm statt 1,6 mm	30	10
	16	Lateralversatz Matrize	Matrize mit 0,4 mm Lateralversatz in Y-Richtung	42	15
Werkzeugfehler	17	Kanten- clinchung	Clinchung auf die Kante des stempelseitigen Bleches	60	21
			Clinchung auf die Kante des matrizenseitigen Bleches	62	20
			Clinchung auf die gemeinsame Kante beider Bleche	57	10
	18	Materialauftrag	Materialauftrag (0,3 mm), Aufkleben einer Stahlfolie auf Matrizenboden	30	10
	19	Partieller Stempelbruch	Verringerung Stempelfläche (20 % bzw. 50%)	115	38
	20	Stempelbruch	Einkerbung Stempelhals in 0,5 mm Schritten, bis zum Bruch	21	5
	21	Partieller Matrizenbruch	Materialabtrag von ca. 20% und ca. 50% des Umfangs	30	17
	22	Matrizenbruch	Matrizen als unprofilierte Amboss (Durchmesser 7,0 mm)	30	10
			Anzahl	1.183	401

Bild 7-2 Klassifikation und Beschreibung der Fehler

Die Fehler Kantenclinchung, Stempel- und Matrizenbruch sind im Bild 7-3 dargestellt. Für den vollumfänglichen Stempelbruch wurden die Stempel mit einer Nass-trennschleifmaschine mit Einschnitten in 0,5 mm Schritten versehen. Die Stempel brachen bei einer Schnitttiefe von 2,5 mm bis 3 mm. Zur Simulation des partiellen

Stempelbruchs wurden mit der Nasstrennschleifmaschine die Stempelflächen um 20 Prozent bzw. 50 Prozent reduziert. Für die Simulation des vollumfänglichen Matrizenbruchs wurde die Matrize durch einen Zylinderstift ersetzt. Für die Experimente mit partiellem Matrizenbruch wurde der Matrizenrand um 20 Prozent bzw. 50 Prozent bis auf die Höhe des Matrizenbodens entfernt.

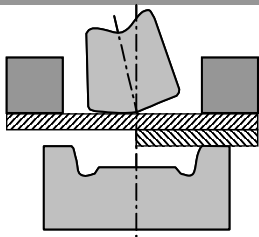
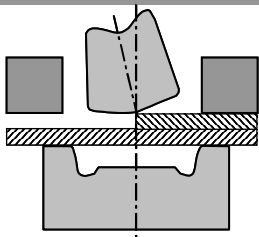
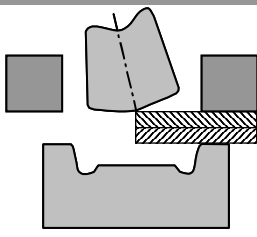
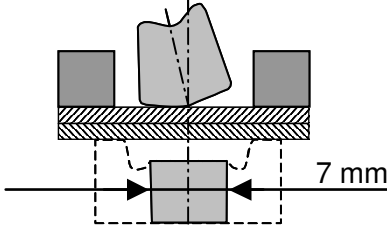
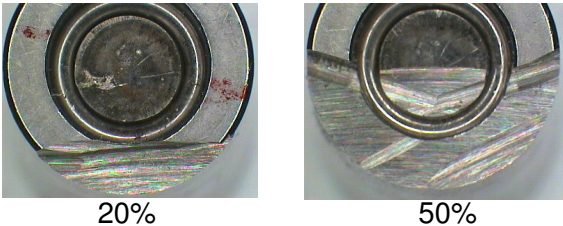
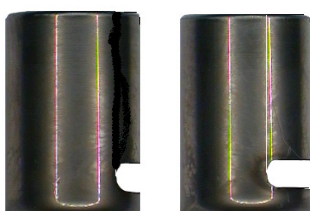
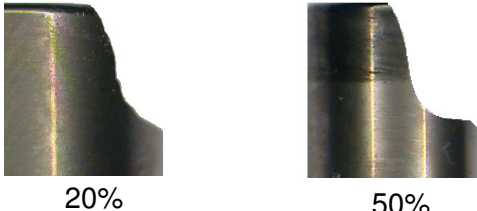
Fehler	Beschreibung		
Clingung auf Kante	Kante unteres Blech	Kante oberes Blech	Kante beide Bleche
			
Matrizenbruch	Vollumfänglicher Matrizenbruch		Partieller Matrizenbruch
			
Stempelbruch	Vollumfänglicher Stempelbruch		Partieller Stempelbruch
			

Bild 7-3 Darstellung von Prozessfehlern

7.3 Analyse der Signale für den Radialclinchprozess

Da bisher noch keine Erkenntnisse über Prozessmerkmale beim Radialclinch vorliegen, wird ein Verfahren zur Untersuchung der Merkmale entwickelt. Die unabhängige Untersuchung einzelner Prozessabschnitte erlaubt die gezielte Analyse von spezifischen Prozessmerkmalen. Dabei werden die in Bild 7-4 gezeigten, markanten Prozesspunkte in den ausgewählten Prozesssignalen, welche unterschiedliche Prozessabschnitte voneinander trennen, für eine erste Auswahl herausgearbeitet.

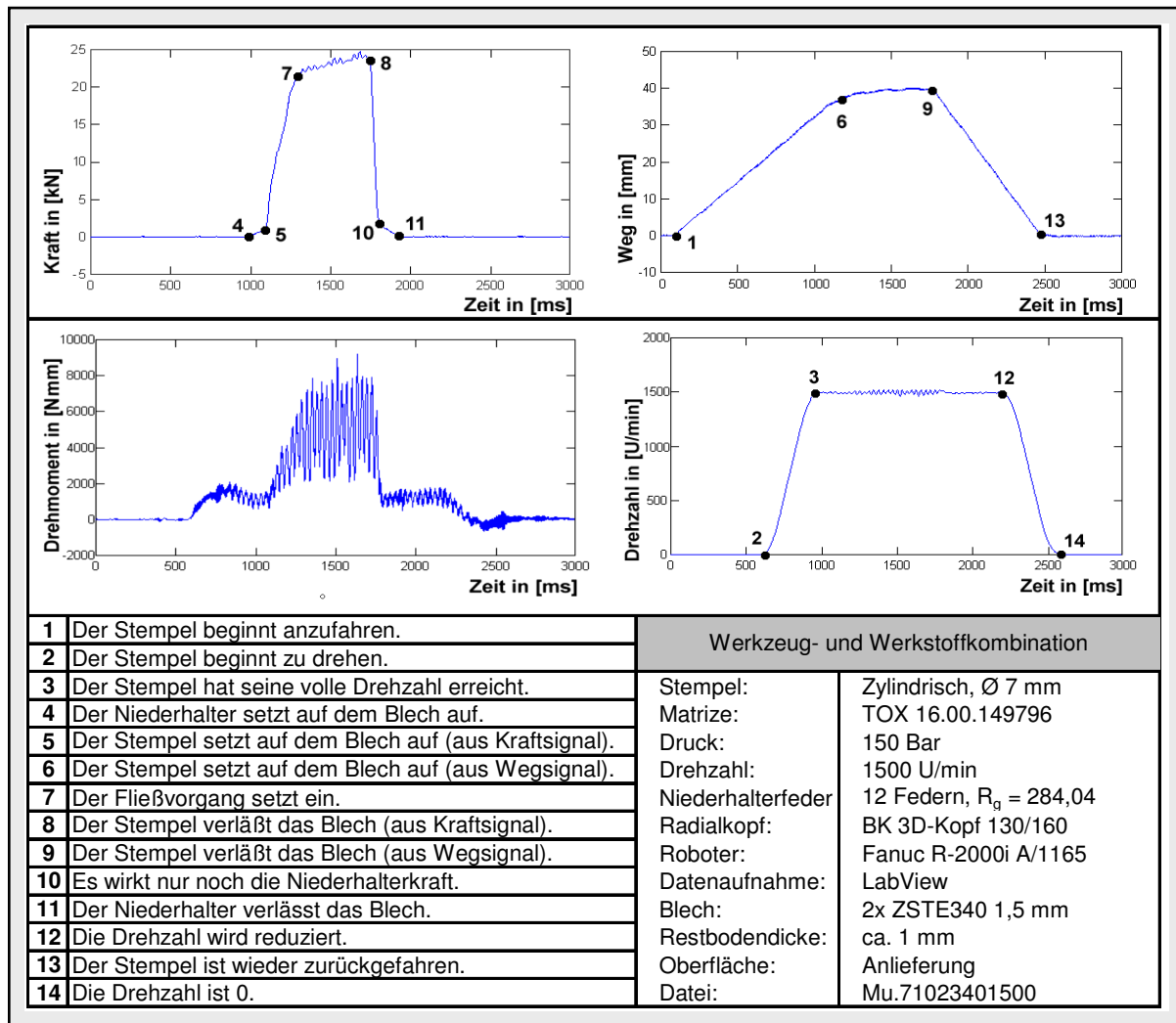


Bild 7-4 Prozessgrößen und markante Punkte

In der Prozessgröße Drehmoment fallen im Zeitbereich Schwingungen auf (Bild 7-4). Diese entstehen durch das Be- und Entschleunigen des Stempels auf der Rosettenbahn. Für die Prozessgröße Drehmoment wird eine Spektralanalyse der Prozesszeit durchgeführt. Ausgeprägte Periodizitäten im Zeitbereich erscheinen im Frequenzbereich als Maxima. Ein Verfahren zur Ermittlung der markanten Prozesspunkte wird in Bild 7-5 vorgeschlagen. Die Selektionsvariablen werden individuell gewählt, z. B. für die Variable m mit 1 Hz zur Hochpassfilterung im Wegsignal. Dieses Verfahren erlaubt die Übertragbarkeit auf weitere Radialclinchanwendungen (andere Werkstoffe, Blechdicken, etc.).

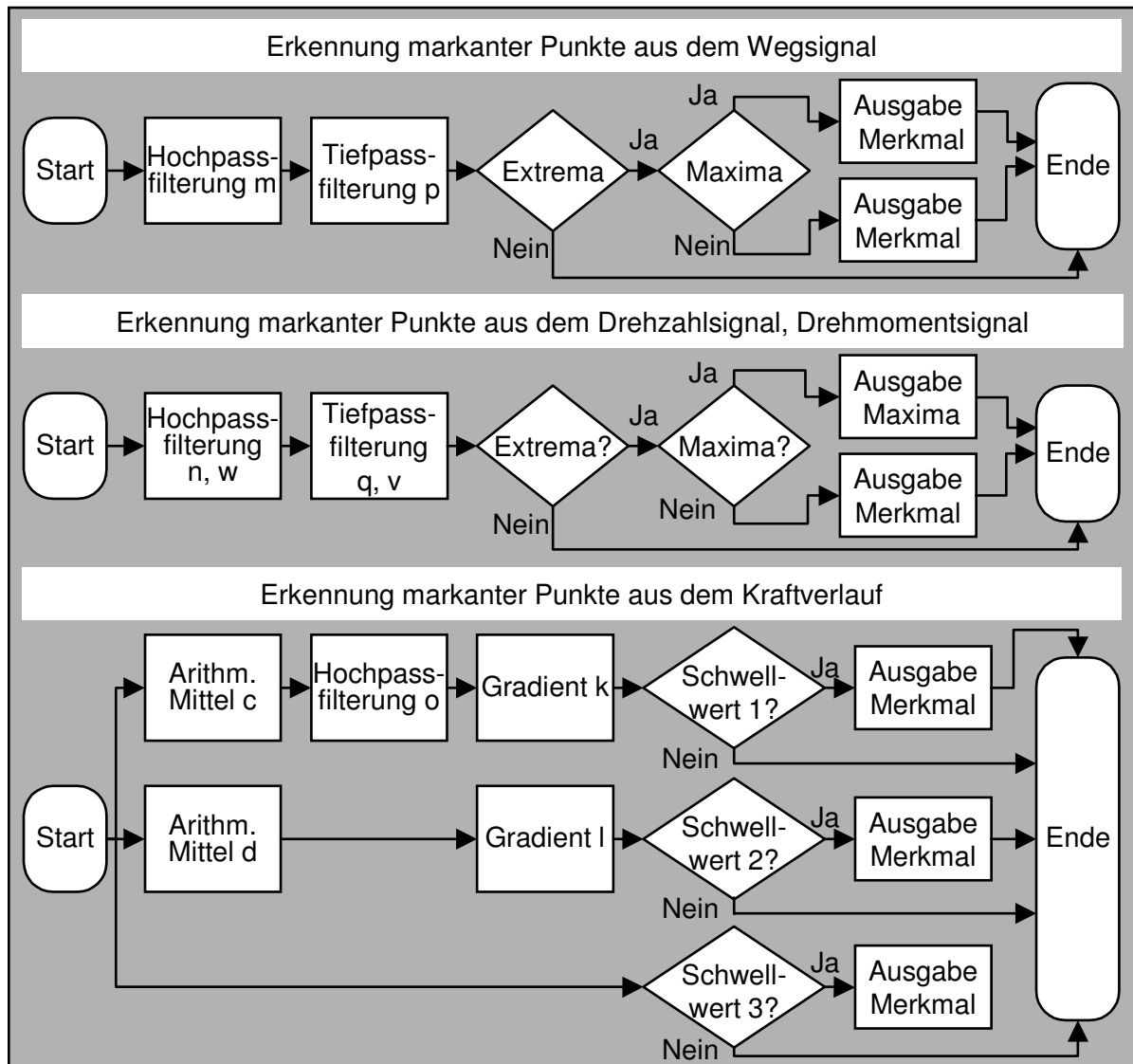


Bild 7-5 Verfahren zur Erkennung markanter Punkte in den Prozessgrößen

Nach Durchführung der Merkmalsextraktion werden 9 Merkmale identifiziert. Die Merkmalsextraktion kann auch auf grafischem Wege erfolgen. Merkmale, die deutlich Klassen voneinander trennen, weisen eine gute Eignung als Eingabemerkmal auf. Insbesondere, wenn eine lineare Trennbarkeit wie im Bild 7-6 für das Merkmal 4 vorliegt. Dargestellt sind die auf $[-1:1]$ skalierten Prozesskenngrößen für die Klassen 1 („Gut“) und 4 („Zu viele Bleche“). Bei Merkmal 4 („Drehmoment“) ist die lineare Trennbarkeit gut gegeben. Hier ist die Klassifikation einfach. Insgesamt wurden 43 Merkmale untersucht, von denen 11 für das Training der Netze ausgewählt wurden. Zusätzlich zu den in Bild 7-6 dargestellten Merkmalen wurden die Varianz der 1. Ableitung der Kraft zwischen Punkt 5 und 7 und die Standardabweichung des Drehmomentes zwischen den Punkten 7 und 8 mit in das neuronale Netz aufgenommen.

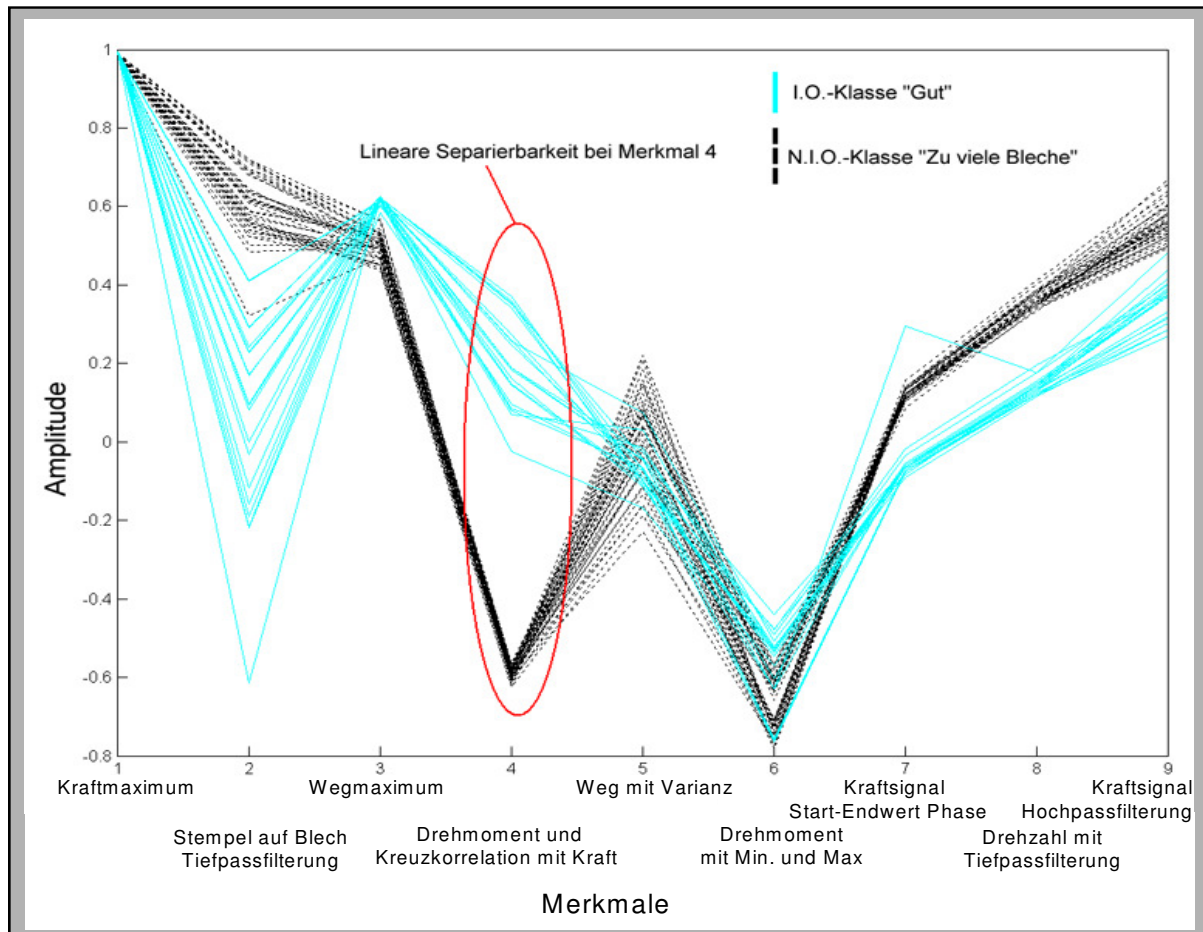


Bild 7-6 Merkmalsidentifikation beim Radialclinchen

7.4 Spezifizierung der Ein- und Ausgabevektoren

Die auf den Bereich der Aktivierungsfunktion normierten Merkmale aller Datensätze bilden die Inputvektoren für das neuronale Netz. Als Aktivierungsfunktion wird der Tangens Hyperbolicus verwendet. Die Merkmale werden auf den Wertebereich $[-1, 1]$ normiert. Zu den Eingabevektoren werden zugehörige Ausgabevektoren (auch Zielvektoren) erstellt, die den jeweiligen Eingabevektor klassifizieren. Die Klassen werden in den Zielvektoren wie in Bild 7-7 so dargestellt, dass jeder Klasse eine „1“ an einer eindeutigen Stelle im Zielvektor zugeordnet wird, während alle anderen Stellen eine „0“ erhalten. Aus diesem Ansatz ergibt sich die benötigte Anzahl der Ausgabeneuronen von 22. Zur Klassifikationszuordnung der Ausgabevektoren wird das „Winner-Takes-All“-Prinzip [Gras04, Zell94] angewandt, d.h., dem Ausgangsneuron mit dem höchsten Ausgabewert wird eine „1“ zugeordnet, während der restliche Ausgangsvektor auf „0“ gesetzt wird. Die Prüfung, an welcher Stelle

sich die „1“ im Ausgabevektor befindet, genügt für das Urteil, ob die Clinchung in der Testphase richtig klassifiziert wurde.

Klasse \ Vektoren	Gut	Kein Blech	Zu viele Bleche	Weitere Klassen	Partieller Matrizenbruch	Matrizenbruch
Ausgabe-/Zielvektor "Gut"	1	0	0	0 0 0	0	0
Ausgabe-/Zielvektor "Kein Blech"	0	1	0	0 0 0	0	0
Ausgabe-/Zielvektor "Zu viele Bleche"	0	0	1	0 0 0	0	0
Weitere Ausgabe-/Zielvektoren	0 0 0	0 0 0	0 0 0	1 0 0 0 1 0 0 0 1	0 0 0	0 0 0
Ausgabe-/Zielvektor "Partieller Matrizenbruch"	0	0	0	0 0 0	1	0
Ausgabe-/Zielvektor "Matrizenbruch"	0	0	0	0 0 0	0	1

Bild 7-7 Vektormatrix zur Klassifikation der Ausgabevektoren

7.5 Verfahren zur Ermittlung der Netzparameter beim Radialclinchen

Die Konzentration auf vorwärts gerichtete Multilagen-Perzeptrons begrenzt die Untersuchung der Lernregeln. Dabei werden Netze diverser Topologien mit Backpropagation in der Standardform und in verschiedenen Modifikationen sowie für kleine Topologien der Levenberg-Marquardt-Algorithmus hinsichtlich ihrer Generalisierungsfähigkeit mit den gewählten Merkmalen geprüft. Die optimale Netzwerkgröße ist nicht bekannt. Einstufige Netze trennen Klassen nur linear und höherstufige Netze bieten keine weiteren Vorteile im Kontext eines verringerten Validationsfehlers. Deshalb werden die Lernregeln auf Netztopologien mit einer und mit zwei versteckten Schichten angewandt. Das Verfahren ist in Bild 7-8 beschrieben. Für die Auswahl zum Start der Entwicklung von Netzen zur Fehlerklassifikation werden intuitiv gewählte Merkmale als Netzeingabe gesetzt. Im zweiten Schritt werden Lernregeln verschiedener Topologien hinsichtlich ihrer Konvergenz verglichen. Hieraus folgt die Analyse des Konvergenzverhaltens und die Ermittlung einer geeigneten Abbruchbedingung. Zur Auswahl der Lernparameter werden diese schrittweise angepasst, um eine gute Generalisierungsfähigkeit zu erreichen. Für die Auswahl der Netztopologie werden die verschiedenen Lernverhalten gegenüber gestellt. Zur Optimierung des Eingabevektors werden die über Bild 7-2 hinausgehenden, zusätzlichen Merk-

male eingebracht bzw. entfernt. Für die Optimierung der Eingabemerkmale wird eine Hauptkomponentenanalyse und eine Skalierungsanpassung durchgeführt. Die Optimierung der Topologien erfolgt durch das Durchtrainieren diverser Topologien. Erneut werden die Lernparameter untersucht und auf gute Generalisierungsfähigkeit eingestellt.

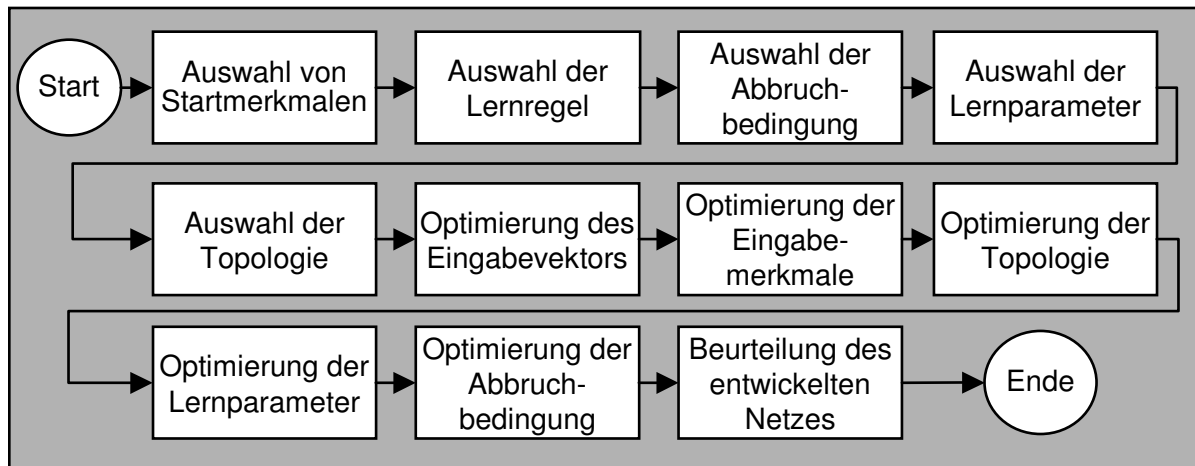


Bild 7-8 Verfahren zur Ermittlung der Netzparameter für das neuronale Netz

Durch die Analyse des Konvergenzverhaltens wird die endgültige Abbruchbedingung festgelegt. Die Beurteilung der entwickelten Netze erfolgt durch die Überprüfung des Generalisierungsverhaltens und durch die Anwendung auf eine Testmenge.

7.6 Parametrisierung der neuronalen Netze

Die Parameter müssen zur hohen Generalisierungsfähigkeit so eingestellt werden, dass das Netz in der Validationsmenge nur einen kleinen Fehler aufweist.

Zur Beschreibung des Fehlers kann die Anzahl der Fehlklassifikationen herangezogen werden. Die Startparametrisierung und die Variationen sind in Bild 7-9 dargestellt. Zur Entwicklung der Prozessüberwachung wird die Entwicklungsumgebung von MathWorks MatLab Version 6.5 mit den Erweiterungen „Signal Processing Toolbox“ und „Neuronal Network Toolbox“ eingesetzt. Die Wahl der Eingabemerkmale (Bild 7-9) in Schritt 1 (Bild 7-8) ist nur vorläufig.

Parameter	Wert bzw. Beschreibung der Start-/ Variationsparameter	Endparameter des neuronalen Netzes
Aktivierungsfunktion	$\sigma = \tanh(\text{net}_j)$	$\sigma = \tanh(\text{net}_j)$
Skalierung Eingabemerkmale	]-1;1[	]-1;1[
Lernfunktion	BP, BP mit M, BP mit aLR, BP mit M und aLR, RP, LM	RP
Parameter der Lernfunktion	Adaptierte Voreinstellungen	SW 1: 0,007, SW 2: 50
Verdeckte Schichten	1, 2	2
Anzahl der Neuronen	20 bis 200 je Schicht	40 in 1. und 200 in 2. Schicht
Abbruchbedingung	Keine Reduktion des VF über 50 000 Epochen	Abbruch nach 3 000 Epochen
Anzahl Eingabemerkmale	9	11
Legende: BP= Backpropagation, M = Momentum, aLR = adaptive Lernrate, RP = Resilient Propagation, LM = Levenberg-Marquardt, SW 1 = initiale Schrittweite, SW 2 = maximale Schrittweite, VF = Validationsfehler		

Bild 7-9 Start- und Endparameter für die neuronalen Netze zur Prozessüberwachung und Fehlerklassifikation

In den in Bild 7-9 dargestellten Schritten wird ermittelt, welche Parameter und Netztypen den Radialclinchvorgang gut verarbeiten können. Das nach dem in Bild 7-8 dargestellte Verfahren entwickelte neuronale Netz hat die in Bild 7-9 dargestellten Endparameter. Die Testclinchungen wurde mit einem IPC Pentium 4 mit einer CPU-Taktung von 2,4 GHz ausgewertet.

7.7 Validierung der Prozessüberwachung und Fehlerklassifikation

Zur Überprüfung der Eignung der entwickelten Prozessüberwachung für das Radialclinch werden die klassifizierten Prozessfehler herbeigeführt und die entwickelten neuronalen Netze anhand der in Bild 7-2 dargestellten 401 Testdatensätzen verifiziert. Die Ergebnisse dieser Tests werden in Bild 7-10 gezeigt. Die Zuverlässigkeit der Detektion von Prozessfehlern lag bei 94 Prozent. Von den in Bild 7-10 dargestellten Fehlern wurden 6 Prozent nicht erkannt, bzw. Gutteile als schlecht eingestuft. Die Genauigkeit der Klassifikation bei herbeigeführten Fehlern lag bei 15,2 Prozent. Das bedeutet, dass von allen Clinchungen 84,8 Prozent richtig klassifiziert wurden. Bei Fehlklassifizierungen konnte beobachtet werden, dass der Prozess zwar als fehlerhaft erkannt wurde, die Klassifikation allerdings nicht richtig war, d. h. ein Fehler der falschen Klasse zugeordnet wurde. Dies wurde deutlich für die Klassen „Kantenclinchung“ und „zu weicher Werkstoff“. Dies kann durch den geringeren

Fügekraftbedarf bei beiden Prozessfehlern erklärt werden. Bei dem Fehler „zu fester Werkstoff“ tritt ebenfalls eine überproportionale Fehlklassifikation in Verbindung mit der Klasse 14 „Falscher Stempel“ auf, da die Fügekraft in beiden Fällen steigt. Hier tritt insbesondere eine Fehlklassifikation mit den Klassen „Fremdkörper“ auf. Das Einlesen der Daten, die Ausführung der Scripte, die Merkmalsberechnung und die Vorwärtspropagierung benötigt 5,5 s von der Datenaufnahme bis zur Ausgabe der Qualitätsaussage. Mehr als 4,8 s werden für die Vorverarbeitung der Daten benötigt.

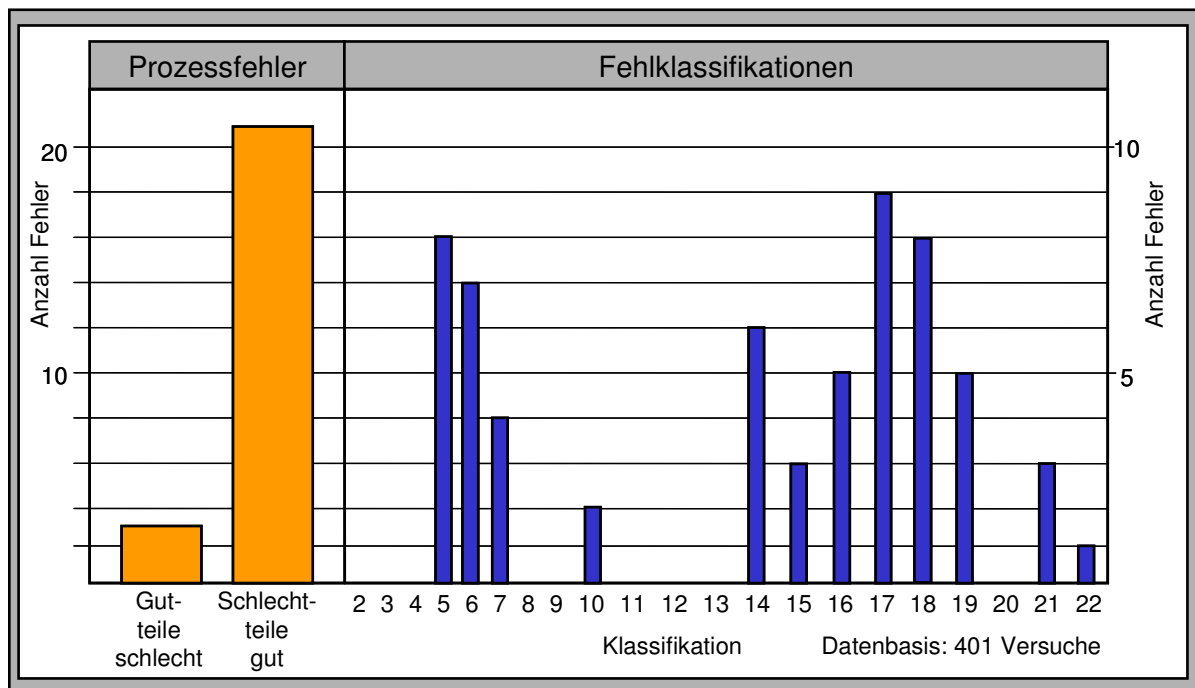


Bild 7-10 Ergebnisse der Prozessüberwachung und Fehlklassifikationen

7.8 Folgerungen

Die experimentelle Verifikation des entwickelten Verfahrens zur Überwachung des Radialclinchprozesses auf der Basis von neuronalen Netzen bestätigt die Eignung von neuronalen Netzen zur Prozessüberwachung und zur Fehlerklassifikation beim Radialclinchen. Es wurde eine Vorgehensweise vorgeschlagen, um für die Überwachung des Radialclinchprozesses wesentliche Merkmale zu identifizieren. Für das Clinchen steht erstmals ein Überwachungssystem zur Verfügung, das Prozessfehler klassifiziert, dem Nutzer Aufschluss über die Fehlerursache gibt und somit die Anwendung einer Fehlerstrategie ermöglicht. Die entwickelten Verfahren zur Merkmalsextraktion erlauben die Übertragung auf weitere Radialclinchapplikationen. Die

Erkennungssicherheit der Testmenge liegt bei über 94 Prozent. Die erkannten Fehler wurden zu 84,8 Prozent richtig klassifiziert. Die Klassifizierung liegt somit im angestrebten Bereich. Die Klassen mit gleichen Fehlerstrategien können in zukünftigen Anwendungen zusammengefasst werden. Das vermindert den Anteil der Fehlklassifikationen und verringert den notwendigen Trainingsumfang für die neuronalen Netze. Durch den Einsatz von leistungsfähigeren Rechnern, eine Parallelisierung der Auswertung und eine maschinennahe Implementierung kann die Auswertung des Radialclinchprozesses deutlich beschleunigt werden. Die Ergebnisse der Prozessüberwachung lassen sich aufgrund der Realisierung in standardisierter Softwareumgebung einfach auf betriebliche Anwendungen übertragen.

8 Realisierung und Erprobung einer Versuchsanlage für das flexibel automatisierte Radialclinchen

8.1 Gesamtaufbau der Versuchsanlage

Zur Erprobung des entwickelten Verfahrens zum kraftreduzierten Radialclinchen, der Werkzeuge für die Automatisierung und Überwachung des Radialclinchprozesses wird eine Versuchsanlage aufgebaut. Der Gesamtaufbau wird auf Basis der konzeptionellen Arbeiten in Kapitel 4 realisiert. Für den Aufbau der Versuchsanlage werden weitestgehend marktübliche Komponenten eingesetzt.

Die beispielhafte Fügeaufgabe aus dem Nutzfahrzeugbereich besteht aus Spannbändern für LKW-Tanks. Die bisherigen Schweißpunkte zur Erzeugung einer Lasche werden durch vier Radialclinchpunkte ersetzt. Bild 8-1 zeigt das Gesamtsystem mit dem Roboter für die Handhabung des Radialclinchwerkzeugs und dem Roboter für die Bauteilbereitstellung.

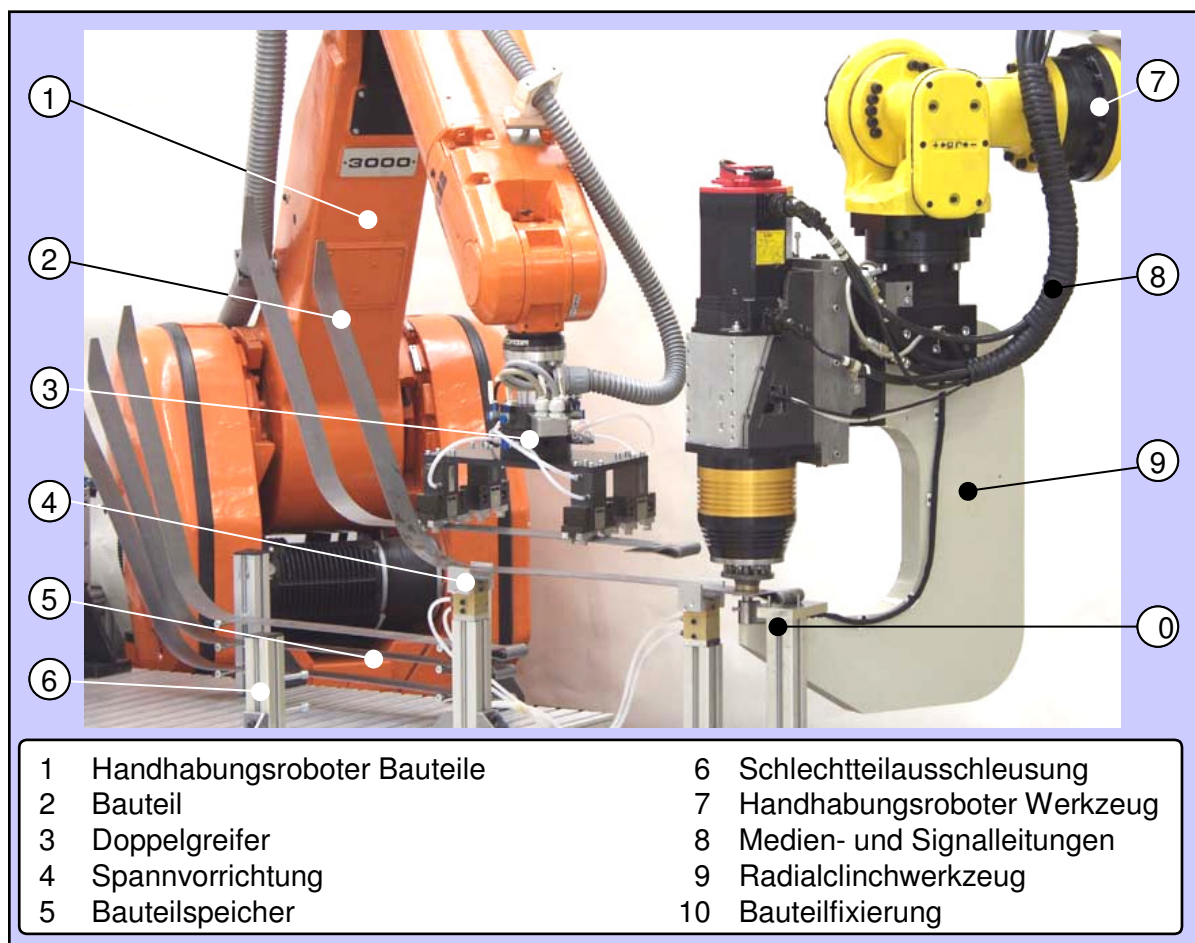


Bild 8-1 Versuchsanlage zum Radialclinchen von Spannbändern

Die Signalauswertung erfolgt über die Software LabView. Für die Bauteile wurde eine Vorrichtung entwickelt, die ein Schnellspannen der Werkstücke ermöglicht.

8.2 Aufbau der Teilsysteme und Komponenten

8.2.1 Handhabungssysteme

Für die Zuführung der Bauteile steht ein Roboter Typ IRB 3000 der Firma ABB zur Verfügung. Der Industrieroboter hat eine Traglast von 400 N. Die Wiederholgenauigkeit ist besser als $\pm 0,2$ mm. Das Radialclinchwerkzeug wird von einem Roboter Typ Fanuc R2000I/165F mit 165 kg Traglast und einer Wiederholgenauigkeit von $\pm 0,3$ mm gehandhabt.

8.2.2 Bereitstellungssystem

Das Bereitstellungssystem in Bild 8-2 wurde für die Handhabung der Spannbänder prototypisch realisiert und besteht aus einem Magazin für die Bauteile, einem Doppelgreifer, der Bauteilfixierung und Magazinen für Gut- und Schlechteile.

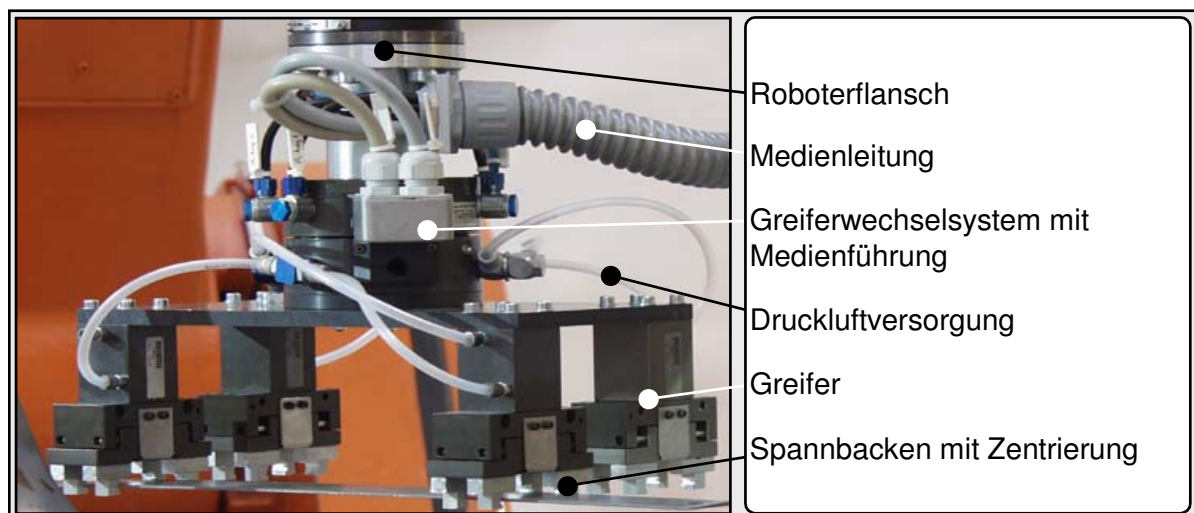


Bild 8-2 Doppelgreifer zur Bauteilbereitstellung

Das Zuführen der Bauteile erfolgt mit dem in Bild 8-2 dargestellten Doppelgreifer. Mit den vier pneumatisch betriebenen Parallelbackengreifern der Firma Sommer Typ MPS 86 können zwei Spannbänder gegriffen werden. Die Bauteile werden durch Zentriervorrichtungen im Greifer und in der Vorrichtung genau positioniert. Aufgrund des Doppelgreifers kann nach einer durchgeführten Clinchung das geclinchte Bauteil entnommen und direkt ein neues Bauteil eingelegt werden. Die Ne-

benzeiten der Versuchsanlage werden so minimiert. Die Steuerung des Bereitstellungssystems erfolgt durch die Robotersteuerung.

8.2.3 Fügwerkzeug zum Radialclinchen

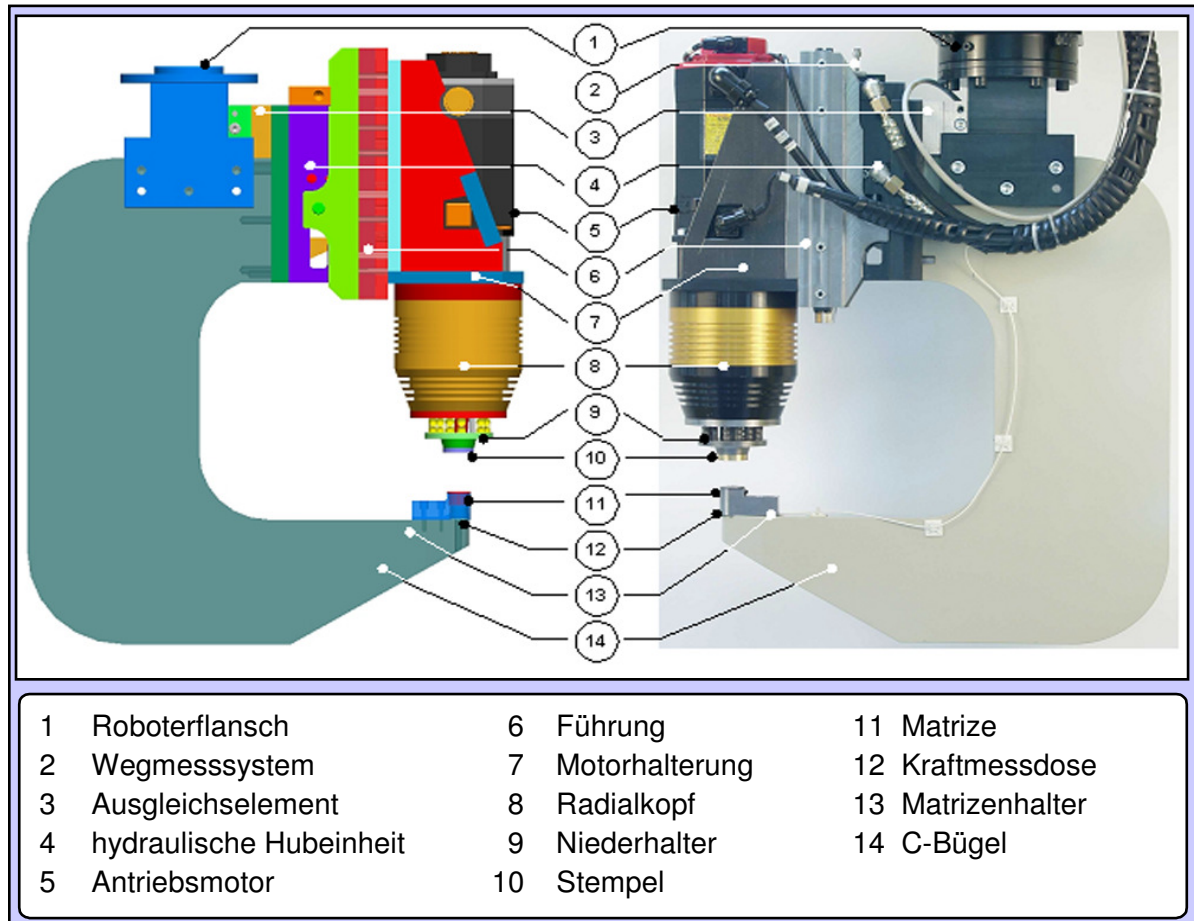


Bild 8-3 Fügwerkzeug zum Radialclinchen

Bild 8-3 zeigt das realisierte Radialclinchwerkzeug. Basierend auf den in Kapitel 4 skizzierten Alternativen ist ein C-Bügel-Konzept realisiert worden. Die Hubeinheit für den Krafthub ist außerhalb der Werkzeugachse angeordnet. Die Erzeugung der translatorischen Fügekraft erfolgt hydraulisch. Das Hydraulikaggregat (Typ SLE 20, Hersteller: Hartmann + Lämmle, Rutesheim) hat eine Förderleistung von 50 l/min. Bei einem Druck von 200 bar werden 40 kN Fügekraft erzeugt. Die Ansteuerung des Hydraulikaggregates und des 4/3-Wegeventils erfolgt über analoge und digitale Ausgangskarten des Roboters und wird über das Anwenderprogramm gesteuert. Die Schnittstelle zwischen dem stehenden Bügel, der beweglichen Aufnahme für den Radialantrieb und dem Radialkopf bildet eine mit Nadelrollen gelagerte MV-Führung (Typ 4020, Hersteller: INA, Schweinfurt). Die bewegliche Aufnahme be-

steht aus Radialantrieb mit einem geregelten Synchronmotor (Typ $\alpha 8i$, Hersteller: Fanuc, Neuhausen/Filderstadt) und dem Radialkopf (Typ 3D BK 130-160, Hersteller: Bodmer Küstnacht) mit Niederhalter und Fügestempel. Der Radialantrieb ist als 7. Achse der Robotersteuerung ausgeführt. Die Matrize wird durch eine Matrizenhalterung fixiert, die in der Horizontalen frei ausgerichtet werden kann.

Das Fügewerkzeug ist zur Prozessüberwachung mit einem Wegmesssystem und einem Kraftmesssystem ausgestattet. Die Kraftmessdose (Typ 8402-6050, Nennkraftbereich 50 kN, Hersteller: Burster, Gernsbach) ist im Kraftfluss zwischen Matrize und Bügel angebracht. Das potentiometrische Wegmesssystem ist stempelseitig an der Schnittstelle zwischen stehendem Bügel und der bewegten Werkzeugachse angebracht (Typ T 75, Hersteller Novotechnik). Das Drehmoment kann über einen Drehmomentsensor (Typ DR 2112, Hersteller Lorenz Messtechnik) und die Drehzahl durch einen integrierten induktiven Drehzahlsensor erfasst werden. Bei der Realisierung wurde auf die Abschirmung von elektrischen Feldern, insbesondere beim Wegsignal geachtet. Für das Wegsignal wurde ein Filter mit einem Kondensator der Kapazität von 100 nF und einem Widerstand von 1,2 K Ω integriert. Die Prozesssignale werden über die Robotersteuerung für die Prozesssteuerung benutzt und können über einen Zellenrechner zur Prozessüberwachung erfasst werden.

Das Gewicht der realisierten Radialclinchzange ohne Medienleitungen, einschließlich Roboterflansch beträgt 137 kg.

8.2.4 Niederhalter

Der Niederhalter (dargestellt in Bild 8-4) wird, basierend auf der Konzeption in Kapitel vier, als passiver Niederhalter mit einer Trennung des Niederhalters von der Stempelbewegung ausgeführt. Durch die Trennung von Stempelbewegung und Niederhalterfunktion werden keine Reaktionskräfte der Stempelbewegung auf das Bauteil übertragen. Aus diesem Grund sind keine Führungen zwischen Auflage- und Flanschfläche notwendig. Durch die Anbringung des Niederhalters am Gehäuse des Radialwerkzeugs (vgl. Bild 8-3, Nr. 9) wird die Niederhalterkraft nicht über die Stempelaufnahme abgestützt. Die Ausführung der Auflagefläche aus Polyamid schont die Blechoberfläche. Die Niederhalterkraft kann durch Anzahl und Auswahl des Federtyps variabel eingestellt werden.

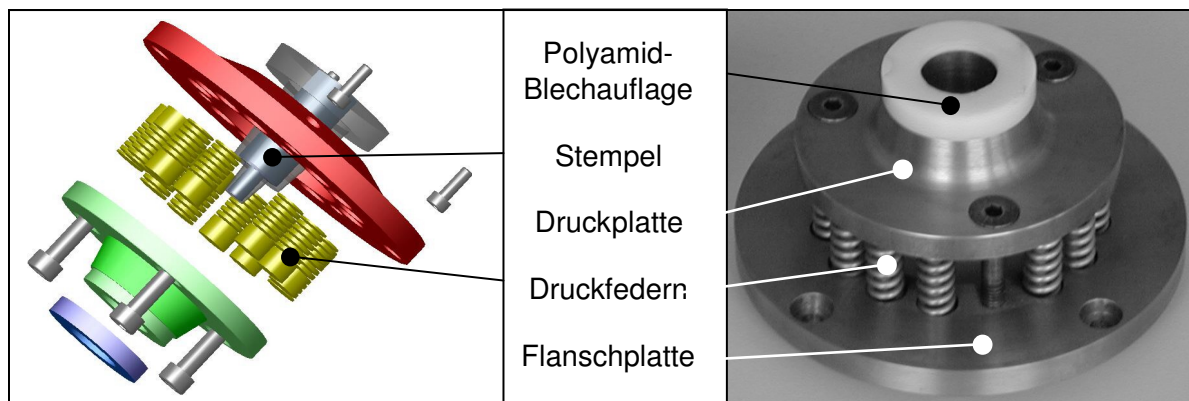


Bild 8-4 Realisierter Niederhalter

Für die Versuche werden zwölf Schraubenfedern (Hersteller Gutekunst) mit einer Gesamtfederrate von 280 N/mm eingesetzt.

8.2.5 Prozessüberwachungssystem

Die Messwerte werden auf einem PC (Intel Pentium 4, 2,4 GHz) erfasst und ausgewertet. Als Schnittstelle dient eine in MatLab generierte Benutzeroberfläche.

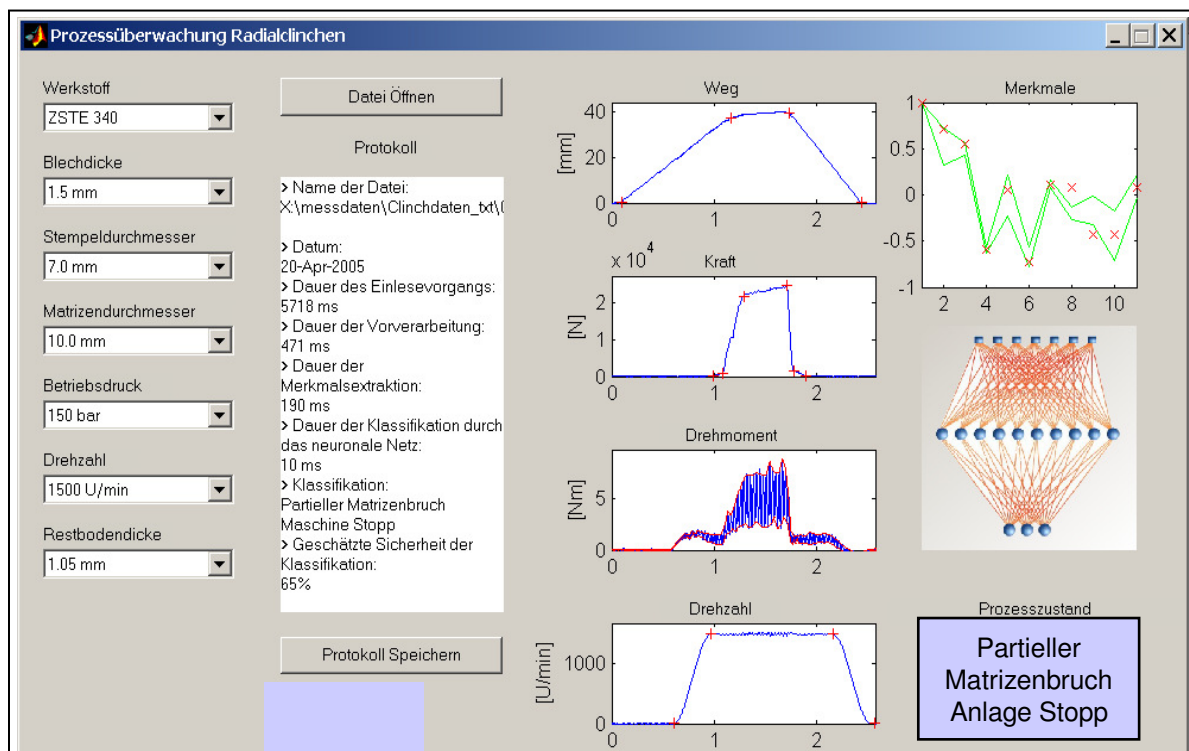


Bild 8-5 Benutzeroberfläche des Programms zur Prozessüberwachung

Bild 8-5 zeigt eine Bildschirmaufnahme der Oberfläche. Hier können die Prozesskennwerte eingegeben werden. Aufgrund der Prozesskennwerte kann das Programm das jeweils geeignete Netz laden oder ein Training anfordern. Das Pro-

gramm protokolliert die durchgeführten Aufgaben. Dieses Protokoll kann manuell oder automatisch gespeichert werden. Die erfassten Prozesskennwerte werden dargestellt. Ein grafischer Plot zeigt Prozessmerkmale und ein Ausgabefenster vermittelt das Ergebnis der Clinchung. Für eine gute Clinchung wird das Ausgabefenster grün und i.O. dargestellt, bei einer fehlerhaften Clinchung erscheint das Fenster rot und N.i.O.

8.3 Programmablauf in der Versuchsanlage

Die Robotersteuerung des Fanuc-Roboters steuert den Fügeprozess. Die Aufnahme der Messdaten erfolgt durch die in Kapitel 8.1 dargestellte Messwerterfassung. Die Bewegungsabläufe der Industrieroboter wurde im Teach-In-Verfahren erstellt und mit den weiteren Komponenten zu dem nachfolgend dargestellten Programmablauf (Bild 8-6) verknüpft. Der Programmablauf stellt den Ablauf zum Fügen der Spannbänder mit vier Clinchpunkten und integrierter Prozessüberwachung dar.

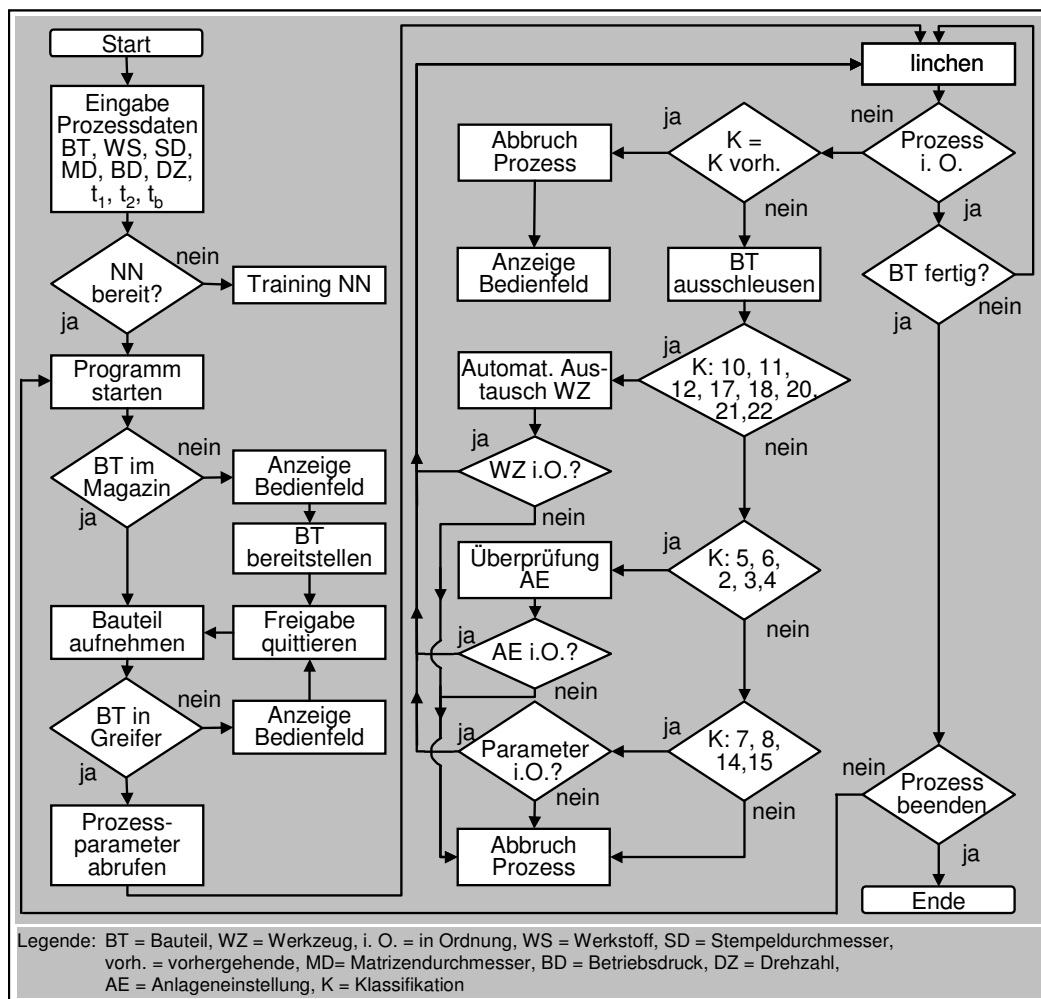


Bild 8-6 Programmablauf der Versuchsanlage für das Clinchen von Spannbändern

8.4 Erprobung der Versuchsanlage am Beispiel von Spannbandern für LKW-Kraftstofftanks

Zur Überprüfung und Analyse des Aufbaus der Versuchsanlage werden 51 Testzyklen mit dem ausgewählten Bauteil durchgeführt. Für das Bauteil wurde der Werkstoff H320 LA, mit einer Gesamtblechdicke von $t_t = 3,0$ mm verwandt. Die Taktzeiten, Fehlerarten und -häufigkeiten sowie die abgeleiteten Verbesserungspotenziale sind im Folgenden dargestellt.

8.4.1 Arbeitsablauf der Versuchsanlage und Fügeprozess beim Radialclinchen

Die Programmierung der Versuchsanlage erfolgt durch den Bediener, der den Arbeitsablauf des Fügevorgangs in der Robotersteuerung hinterlegt. In der Versuchsanlage werden dabei folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Aufnehmen eines Spannbandes aus dem Magazin mittels Parallelbackengreifer
2. Positionieren des Spannbandes in der Bauteilfixierung
3. Positionierung der Radialclinchzange
4. Radialclinchen des Spannbandes mit vier Fügeelementen
5. Entnahme des fertigen Bauteils und Einlegen eines neuen Spannbandes
6. Ablage des fertigen Bauteils

Die mit der Versuchsanlage realisierten Zykluszeiten für die vier Fügeelemente pro Spannband sind in Bild 8-8 dargestellt. Die Radialclinchzange wird im Vergleich mit Bild 8-2 zusätzlich mit einem Drehmomentsensor ausgestattet. Der Fügevorgang wurde mit dem Erreichen der Restbodendicke von 1,0 mm abgeschlossen.

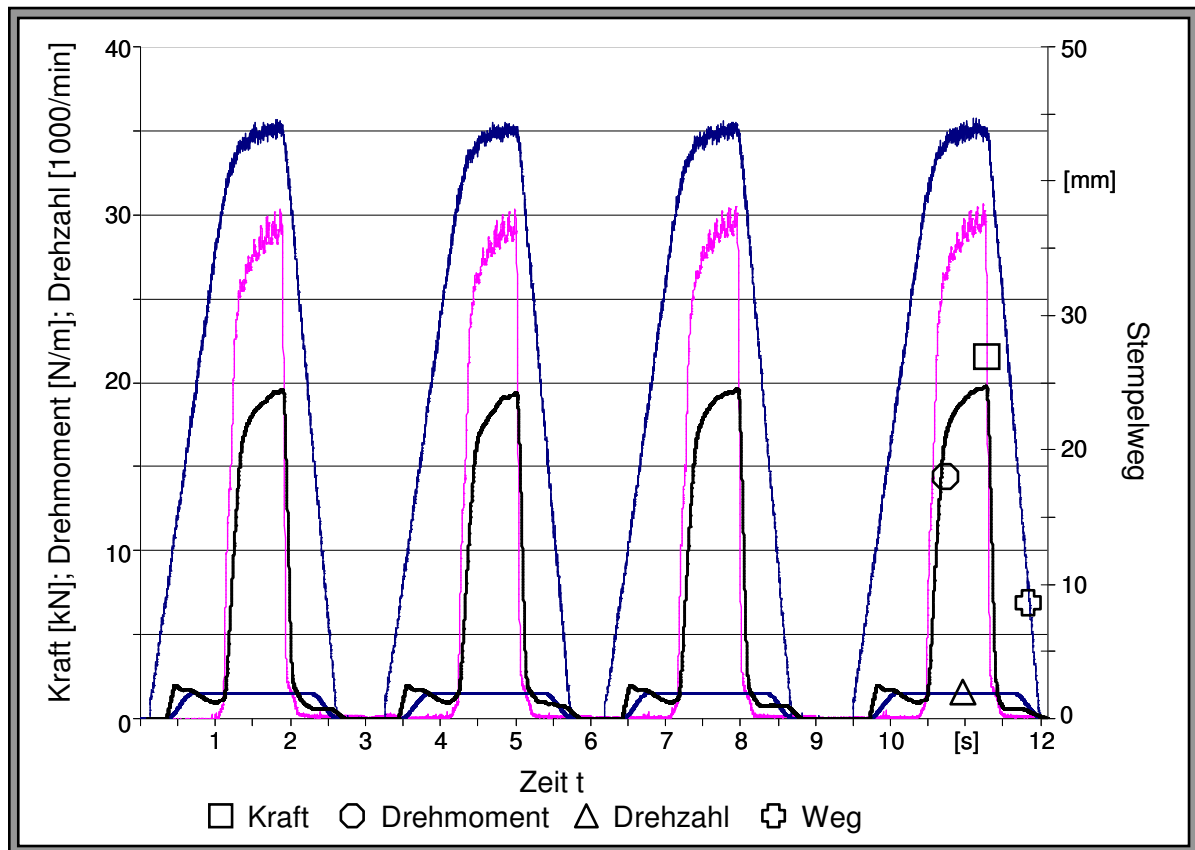


Bild 8-7 Prozessablaufzeiten beim Radialclinchen (H320LA, $t_t = 3,0 \text{ mm}$)

Wie in Bild 8-7 deutlich wird, sind mit der Radialclincheinrichtung Stempel­eingriffszeiten von 1,0 s realisierbar. Die maximale Kraft ist hierbei 29,4 kN. Nach dem Erreichen der unteren Endlage (maximaler Hub) wird durch Beibehaltung der Rotation die Spannung des Bügels abgebaut und die eingestellte Restbodendicke von 1,0 mm erreicht. Nach dem Erreichen der unteren Endlage der Hubeinheit sinken Fügekraft und Drehmoment ab, da mit dem Erreichen der Restbodendicke der Rückhub einsetzt. Fügekraft und Rotationsmoment gehen auf null bzw. auf das Leerlaufdrehmoment zurück.

Das maximale Drehmoment beträgt ca. 18 Nm. Die dargestellten Drehmomentwerte sind gemittelte Werte. Bedingt durch die Stempelführung des Radialwerkzeugs auf der Rosettenbahn weist das Drehmoment eine ausgeprägte Bandbreite auf. Bei der Beschreibung der Rosettenbahn hat der Stempel – je nach Position – verschiedene Geschwindigkeiten und zu verrichtende Umformarbeit. Hieraus ergeben sich positive und negative Beschleunigungen, die die ausgeprägte Bandbreite des Drehmomentes verursachen. Das Drehmoment bewegt sich um $\pm 5 \text{ Nm}$ um das mittlere Drehmoment.

Zur Messung der Lautstärke beim Fügevorgang wurden Messungen mit einem „Uni-test 93473 Sound Level Meter“ des Herstellers CH. BEHA GmbH, Glottertal durchgeführt. Der Schallpegel liegt in 1m Entfernung im Mittel bei 63 dB(A), bei Zuschaltung der Kühlung des Hydraulik-Aggregates bei 73 dB(A). Die Grundlautstärke in der Versuchsanlage betrug bei Messbeginn 57 dB(A).

8.4.2 Fügekraftreduzierung

Das Bild 8-8 gibt einen vergleichenden Überblick über die Fügekräfte beim konventionellen Clinchen und beim Radialclinchen bei verschiedenen Werkstoffen.

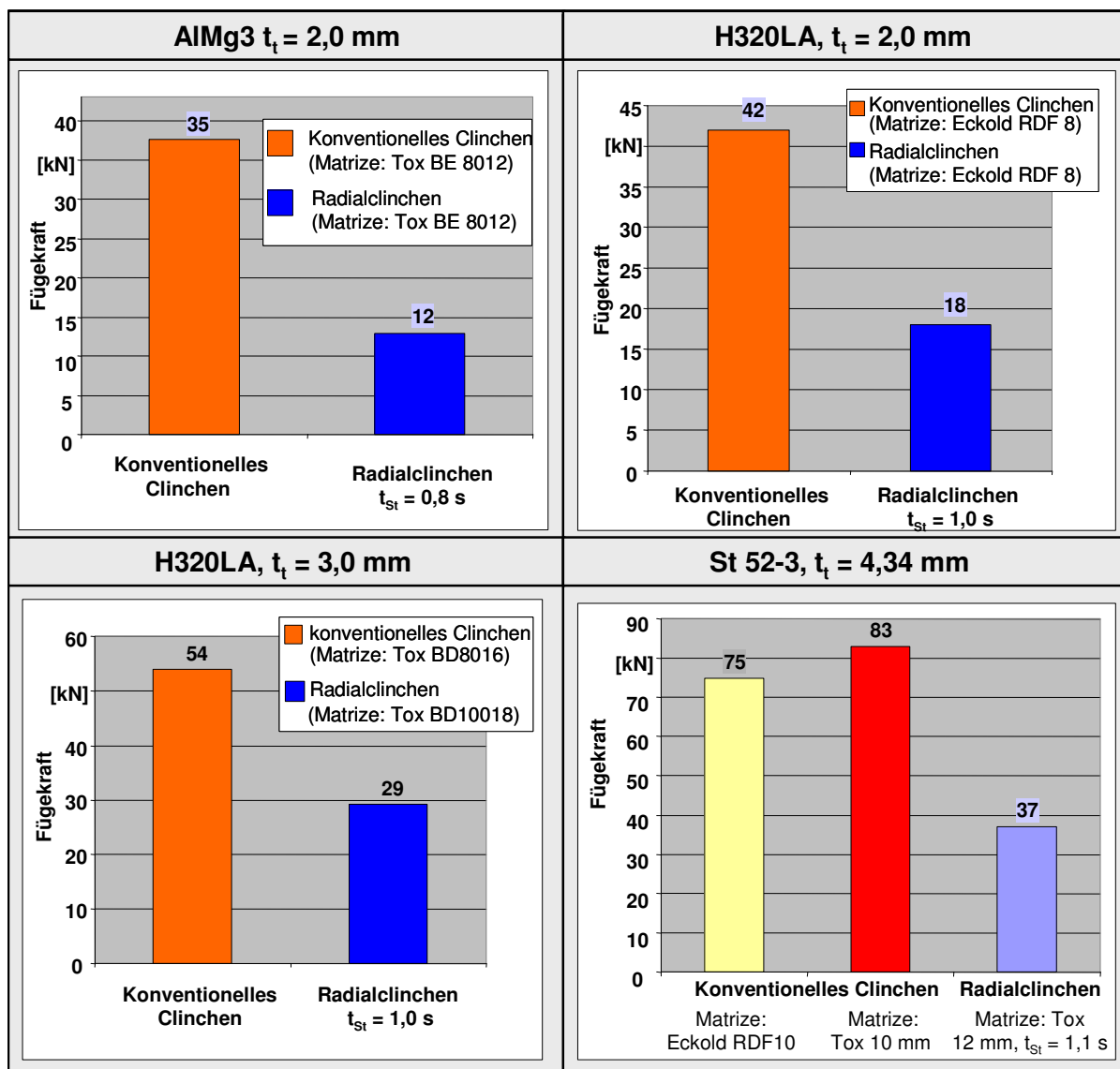


Bild 8-8 Fügekraftvergleich verschiedener Werkstoffe

Mit dem Radialclinchen können beim Clinchen von Gesamtblechdicken von 2,0 mm Reduzierungen der Fügekräfte von AlMg3 mit 65 Prozent und 57 Prozent von

H320LA mit $t_t = 2$ mm in Abhängigkeit von einteiligen und mehrteiligen Matrizen erreicht werden. Für größere Blechdicken mit $t_t = 4,34$ mm der Qualität St52-3 wird eine Fügekraftreduktion von 50 Prozent bis 55 Prozent je nach verwendeter Matrizenart bei einer Stempeleingriffszeit von $t = 1,1$ s erreicht. Im Vergleich zur Tox-Matrize wurde die Fügekraftreduktion bei einer um mehr als 40 Prozent größeren Matrizenrundfläche [Thom02] erreicht. Die Drehzahl betrug 1500 1/min bzw. 2400 1/min für die Fügeaufgabe mit St52-3.

8.4.3 Versuchsergebnisse und Verbindungsfestigkeiten

In Bild 8-9 sind die für den Stahlwerkstoff St52-3 erreichten Verbindungsfestigkeiten aufgetragen. Diese liegen für das konventionelle Fügen bei 9,5 kN im Scherzug, bei 5 kN im Schälzug und bei 7 kN im Kopfzug. Der relativ weite Streubereich beim Schälzug ist durch die Probenform zu erklären. Durch die Umformung nach der Probenherstellung ist bei der verwendeten Blechdicke eine nachteilige Wirkung auf die Verbindung nicht auszuschließen. Die Verbindungsfestigkeiten für das Radialclinch liegen somit im Bereich konventioneller Werte [Thom02].

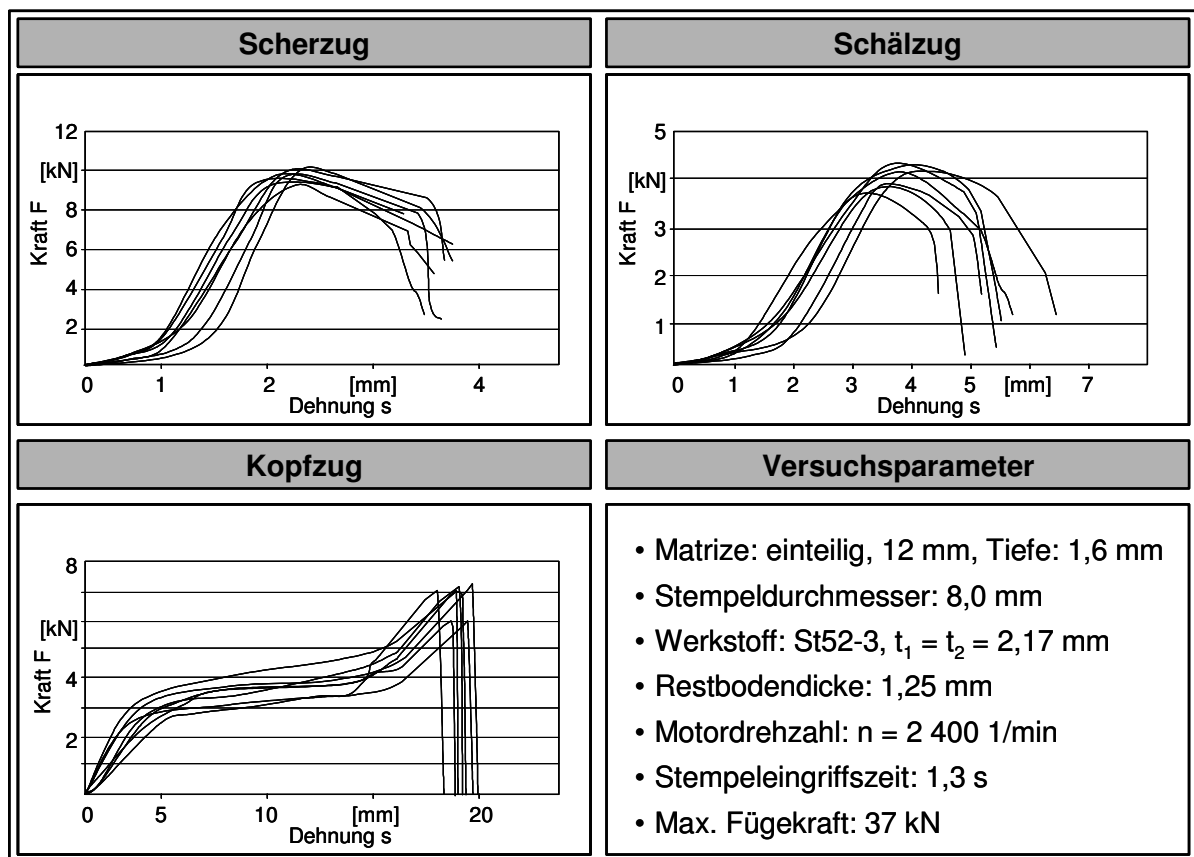


Bild 8-9 Verbindungsfestigkeiten für St52-3

Für die in Bild 8-9 dargestellten Versuchssparameter wurden die Versagensarten in Bild 8-10 dokumentiert und ein Schnittbild des Fügepunktes angefertigt. Beim Scherzug wurde ein Versagen der Proben durch Ausknöpfen des stempelseitigen Bleches und einem Halsabriss beobachtet.

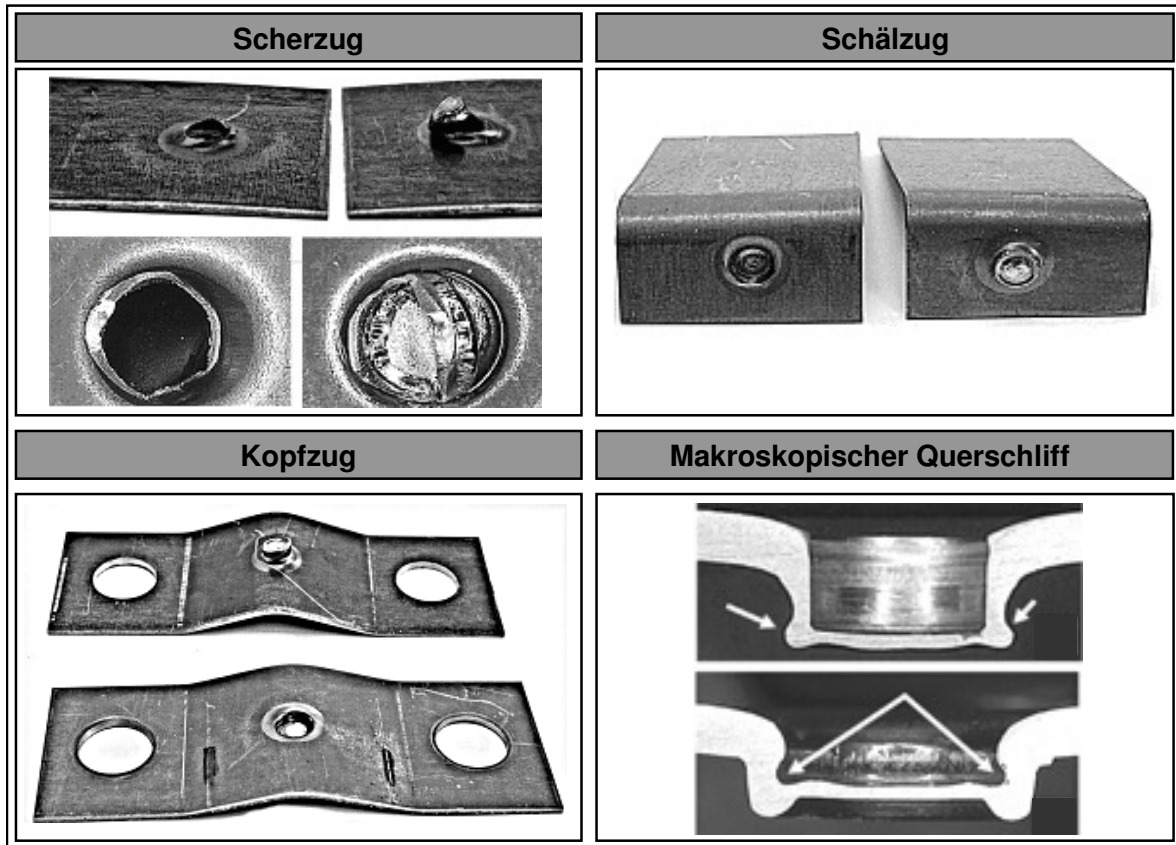


Bild 8-10 Versagensarten und makroskopischer Querschliff von St 52-3

Beim Kopfzug wurde der stempelseitige Napf aus dem matrizenseitigen Blech herausgezogen. Der Hals des Clinchpunktes bleibt geschlossen, der Hinterschnitt versagt. Beim Schälzug erfolgte das Probenversagen durch Herausziehen des stempelseitigen Napfes aus dem matrizenseitigen Blech. Der makroskopische Querschliff zeigt einen deutlichen Hinterschnitt.

8.4.4 Gesamtablaufzeit und Verfügbarkeit der Versuchsanlage

Die durchgeführte Analyse der Prozesszeiten (Bild 8-11) zeigt, dass die benötigte Prozesszeit für das Radialclinchen des Bauteils mit 13 Prozent einen geringen Anteil an der Gesamttaktzeit ausmacht. Insbesondere das Greifen, Einlegen, Spannen und Entnehmen trägt deutlich zu den Nebenzeiten bei. Diese Nebenzeiten können durch eine Optimierung des Fügesystems, insbesondere des Greifsystems noch

verkürzt werden. Die in der Analyse festgestellte zur Verfügung stehende Zeit von 2 s für den Prozess wird deutlich unterschritten.

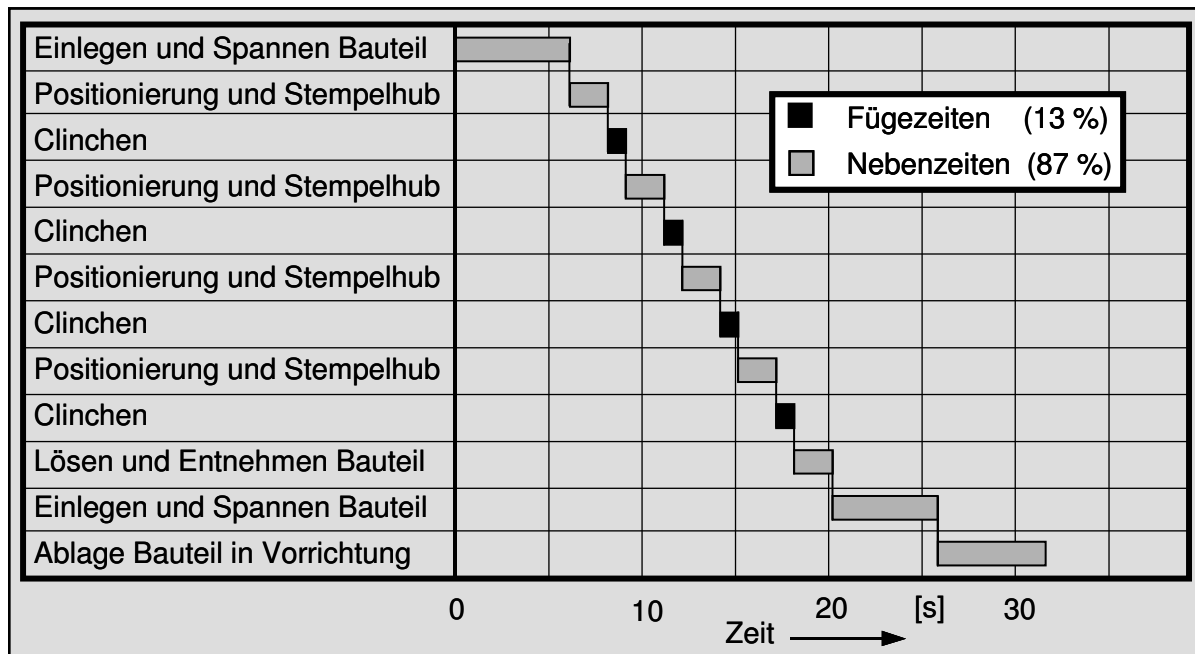


Bild 8-11 Prozesszeiten beim Radialclinchen (Mittelwerte aus 21 Bauteilen)

Der Hauptanteil der Fehler stellt die Bauteilzuführung und das Bauteilhandhabungssystem dar und entstand durch den prototypischen Charakter des Bereitstellungssystems. Im Magazin wurden die Bauteile nicht exakt gegriffen und konnten somit nicht in die Vorrichtung eingelegt werden. Diese Störung lässt sich durch Spannelemente und eine verbesserte Zentrierung der Bauteile eliminieren. Eine weitere Fehlerquelle bestand darin, dass die Robotersteuerungen nicht in vollem Umfang kompatibel waren und Steuerungsprobleme auftraten. Dieses Problem lässt sich durch eine einheitliche Steuerungsarchitektur beheben.

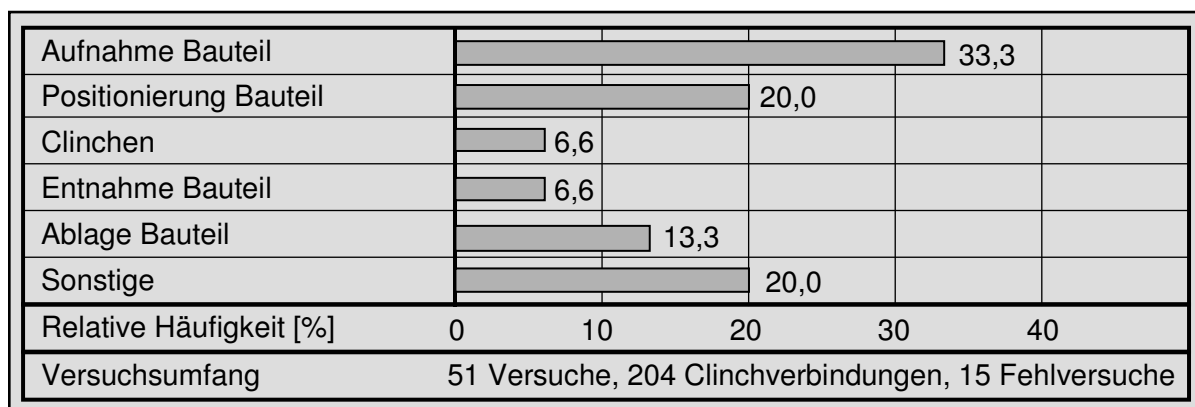


Bild 8-12 Häufigkeit und Verteilung der in der Versuchsphase der Radialclinchzelle aufgetretenen Fehler

Die Fehleranalyse zeigt, dass die aufgetretenen Störungen im prototypischen Charakter der Versuchsanlage begründet sind. Die Optimierung der Teilkomponenten lässt daher eine Verbesserung der Verfügbarkeit erwarten.

8.5 Erkenntnisse und Folgerungen aus der Erprobung

Am Beispiel der Versuchsanlage zum automatisierten Radialclinchen wird die Einsatzfähigkeit des Verfahrens zum umformtechnischen Fügen mit radial überlagerter Stempelbewegung bestätigt. Die mit der Versuchsanlage erzielten Ergebnisse zeigen, dass die an eine automatisierte und prozessüberwachte Radialclinchzelle gestellten Anforderungen an das Radialclinchen von Tank-Spannbändern erfüllt werden.

Im vorliegenden Beispiel ergibt sich für das Radialclinchen eine Fügezeit für ein Bauteil mit vier Clinchpunkten von 12 Sekunden je Spannband und eine Fehlerquote von 1 Prozent bezogen auf die Anzahl geclinchter Spannbänder. Durch den Einsatz eines Clinchwerkzeuges mit radial überlagerter Bewegung konnte die Fügekraft um 65 Prozent im Vergleich zum konventionellen Clinchen mit linearer Stempelbewegung gesenkt werden. Die Fügezeit kann hierbei je nach verfügbarer anlagenbedingter Maximalkraft variabel eingestellt werden. Alternativ können mit der gleichen Anlage Stempel und Matrizen mit einem größeren Durchmesser verwandt werden, um höhere Verbindungsfestigkeiten im Fügepunkt zu erreichen.

Die untersuchten Verbindungsfestigkeiten liegen im Bereich der Verbindungsfestigkeiten des konventionellen linearen Clinchens. Hierbei können dieselben Matrizen-typen wie beim linearen Clinchen verwendet werden. Die Entwicklung spezifischer Radialclinchmatrizen ist nicht notwendig. Dies vereinfacht die Werkzeugentwicklung und erhöht die Akzeptanz in der Industrie. Die Stempelgeometrien können den Anforderungen an die Belastung der Verbindung angepasst werden. Trotz der überlagerten Bewegung des Stempels führte diese Belastung nicht zu erhöhtem Stempelversagen. Wie die Versuche in Kapitel 6 zur Erkennung des Stempelbruchs zeigen, sind Kerben von 2,5 mm bis 3,0 mm notwendig, damit ein Stempelbruch herbeigeführt werden konnte. Die vom Pressen mit überlagerter Bewegung bekannte Erzeugung von horizontalen Reaktionskräften auf die Fügeeinrichtung durch die Be- und Entschleunigung des Stempels auf der Rosettenbahn hatte keinen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit und Anlagengestaltung.

Die Ergebnisse mit der Versuchsanlage zum Fügen von Spannbändern sind auf andere Montageaufgaben übertragbar. Für zahlreiche Anwendungen können die bekannten Einrichtungen und Geräte durch automatisierte Radialclinchzellen substituiert werden.

Durch das entwickelte Radialclinchverfahren werden die bestehenden umformtechnischen Fügetechniken hinsichtlich der automatisierten Herstellung von Clinchverbindungen erweitert und vervollständigt. Beschränkungen in der Handhabbarkeit durch das hohe Zangengewicht werden verringert. Es können größere Ausladungen erreicht und zur Erschließung neuer Fügeaufgaben genutzt werden. Die entwickelte Prozessüberwachung ermöglicht die Klassifizierung von Fehlern beim Radialclinchen. Hierdurch wird die Diagnosefähigkeit von Radialclinchsystemen ermöglicht.

Für den industriellen Einsatz sind folgende Verbesserungsmaßnahmen möglich:

- Erweiterung der Prozessüberwachung um weitere Blechwerkstoffe, -dicken und die Reduzierung des Trainingsaufwandes durch Zusammenfassung von Fehlerklassen.
- Verbesserung der Zugänglichkeit zur Fügestelle durch kleinere Radialwerkzeuge.
- Neben der Anwendung in flexiblen Roboterwerkzeugen können weitere Anwendungsfelder in stationären Montagesystemen für das Radialclinchen erschlossen werden. Vorhandene Radialfügesysteme können durch das Radialclinchen in der Einsatzflexibilität erweitert werden.
- Optimierung des Ablaufs durch Minimierung der Nebenzeiten und Fehlerhäufigkeiten bei der Handhabung der Bauteile.
- Durch Kombination des Radialclinchens mit den Konstruktionsprinzipien gewichtsreduzierter Fügezangen kann das Zangengewicht weiter reduziert werden.
- Zukünftig kann der Radialclinchprozess simulativ erfasst werden.

Durch die Verbesserungen können die Voraussetzungen für den industriellen Einsatz geschaffen werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

In der Blech verarbeitenden Industrie ist das umformtechnische Fügen von Bauteilen durch Clinchen verbreitet. Das umformtechnische Fügen erfolgt heute noch weitgehend mit linearer Fügebewegung der Werkzeuge. Die hohen Prozesskräfte erfordern schwere Werkzeuge. Große Ausladungen der Werkzeuge sind mit robotergeführten oder mobilen Einrichtungen schlecht zu realisieren.

Für das kraftreduzierte Fügen gibt es Ansätze, weiteres Anwendungspotenzial für das Clinchen zu erschließen. So kann die Kraftreduzierung durch eine hämmernde Stempelbewegung, partielle Werkstoff erwärmung oder durch eine Bewegung auf dem Kegelmantel erreicht werden. Diese Verfahren haben spezifische Nachteile wie Lärmentwicklung, hohe Investitionskosten oder mangelnde Flexibilität in Kombination mit dem Halbhohlstanzen. In Anlehnung an die vorhandenen Werkzeuge war die Motivation für die vorliegende Arbeit die Entwicklung eines kraftreduzierten umformtechnischen Fügeverfahrens mit radial überlagerter Bewegung. Für dieses Verfahren fehlten bisher jedoch grundlegende Untersuchungen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es daher, wissenschaftliche Erkenntnisse über das Radialclinchen zu erarbeiten, eine Versuchsanlage zu konzipieren und zu realisieren sowie die technische Umsetzbarkeit nachzuweisen.

Im Stand der Technik wurden gewichtsreduzierte Fügezangenkonzepte und Ansätze zur Kraftreduzierung dargestellt. Für den vielversprechenden Ansatz der Stempelbewegung auf der Rosettenbahn wurde der Stand der Technik bei den Radialclincheinrichtungen mit Möglichkeiten der Prozessüberwachung aufgezeigt. Neuronale Netze sind hierbei zur Prozessüberwachung und zur Fehlerklassifikation geeignet. Im Rahmen der Anforderungsanalyse wurde mit einer Umfrage und umfangreichen Expertengesprächen der Istzustand beim automatisierten umformtechnischen Fügen aufgearbeitet. Die auftretenden Prozessfehler und die neuronalen Netze wurden analysiert. Technische und organisatorische Automatisierungshemmnisse sind die hohe Fügekraft und die schlechte Zugänglichkeit zur Fügestelle sowie hohe Typen- und Variantenvielfalt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Analyse wurden Anforderungen an das Gesamt- und die Teilsysteme abgeleitet. Es wurden Lösungsalternativen für Werkzeuggestaltung, Zangenkonzeption, Prozessdatenerfassung und Prozessüberwachung erarbeitet. Basierend auf der Durchführung experimenteller Untersuchungen wurde der Nachweis erbracht, dass beim

Radialclinchen gleiche Verbindungsfestigkeiten wie beim konventionellen Clinchen bei statischen Scher-, Kopf- und Schälzugfestigkeitsuntersuchungen erreicht werden. Die Untersuchungen belegen die Einsetzbarkeit von standardmäßigen Matrizen für das Radialclinchen. Durch die Beschreibung von Wirkzusammenhängen konnten produktionstechnisch relevante Prozesszusammenhänge zwischen Fügezeit, -kraft und -drehzahl ermittelt und dargestellt werden.

Das komplexe Werkstoffverhalten beim Radialclinchen wurde ausgehend von der Phasenteilung des Fügeprozesses in eine Durchsetzphase und in eine Stauchphase beschrieben und die Fügekraft des Radialclinchens berechnet. Bei der Modellierung wurden Ansätze zur Kontaktflächenberechnung aus dem Taumelpressen übertragen. Das Modell ist die Grundlage für ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Fügekraft unter Berücksichtigung der partiell eingeleiteten Fügekraft. Das Berechnungsmodell wurde durch Experimente mit verschiedenen Blechwerkstoffen und Fügegeschwindigkeiten verifiziert.

Zur Überwachung des Verbindungsprozesses und zur Klassifikation von Fehlern wurde ein System auf der Basis neuronaler Netze entwickelt. Hierbei wurden aussagekräftige Merkmale aus den Prozesssignalen Weg, Kraft, Drehzahl und Drehmoment extrahiert. Für die besonders geeigneten Backpropagation Netze wurde ein Verfahren zur Parametrisierung und Festlegung der Topologie und Lernregeln aufgezeigt. Das entwickelte Netz wurde in einer Standard-Softwareumgebung realisiert. Durch Versuche konnte gezeigt werden, dass unzulässige Prozesszustände mit einer hohen Genauigkeit erkannt werden. Die Prozessfehler konnten gut klassifiziert werden. Abschließend erfolgte die Erprobung des Gesamtsystems in einer Versuchsanlage zum flexibel automatisierten Radialclinchen. Mit der Erprobung an repräsentativen Bauteilen aus dem Nutzfahrzeugbereich konnte die Umsetzbarkeit des Radialclinchens in einer automatisierten Fertigungszelle nachgewiesen werden. Die Versuchsanlage zum flexibel automatisierten Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe erfüllt die gestellten Anforderungen. Nach der Analyse der Fehler und der Berücksichtigung der aufgezeigten Verbesserungspotenziale können die Voraussetzungen für den industriellen Einsatz des automatisierten Radialclinchens geschaffen werden. Durch die Entwicklung des flexibel automatisierten Radialclinchens wurden neue Einsatzmöglichkeiten für die umformtechnische Fügetechnik erschlossen.

Automated and process monitored radial spot clinching of higher strength sheet metal**Introduction**

Spot clinching is an innovative mechanical joining method with a high potential for the joining of sheet metal. The advantages of the spot clinching process are the little introduction of heat into the material, high joint strengths and a simple process. However the widespread application of mechanical joining methods suffer from the high joining forces which are required to produce a joining element. These joining forces can reach up to 100 kN depending on the strength of the material and the thickness of the sheet metal to be joined. This results in heavy process equipment which is difficult to handle especially in automated robot applications. Flexible combinations with other cold joining methods like semi-tubular riveting are not possible. Additionally up to now process monitoring systems are not able to give a detailed answer to the reason of process problems. This would be beneficial for the integration in production systems to allow a predefined strategy in case of malfunctions.

Thus the goal of the work presented is the development of a new and flexible spot clinching method for reducing the joining force dramatically and optimising the strength of the joining elements. It is based on the development of a theoretical approach for the calculation of the joining forces, allowing the dimensioning of joining equipment and additionally a process monitoring system with a failure classification for the safe production was developed.

Analysis of the current situation

For the introduction into the current situation of spot clinching basic clinching methods are shown and an exemplary joining process is depicted. The challenges of high joining forces in spot clinching are widely known in industry and there have been various approaches to tackle the problem. One approach is to use light weight tooling equipment. Three designs of light weight tooling equipment are shown. However the core problem of high joining forces due to the process are not addressed by this concept. Another, more promising approach is the reduction of joining forces by using an alternative joining process. Different joining methods are ex-

amined and evaluated. Joining processes with a superimposed movement have a high potential for force reduction, generate low noise and are widely known in industry for riveting applications. Especially the punch path on a hypocycloid path allows a flexible combination with semi-tubular riveting and is therefore selected for further developments.

To meet the industrial requirements for the new joining process a survey in relevant industries was carried out. The following systems and parameters were examined: the machines for radial riveting, current process monitoring systems and methods, product range, the main boundary conditions with respect to production technique, the main obstacles for automation and possible problems in the joining process. Questions in respect to strengths and properties of the sheet metal used, surface conditions, number of joints per product, main diameter of the clinching elements, number of variants and remaining production time for a spot clinch element and existing automation problems were raised and answered.

Based on the survey and a technical literature review the main areas of development and the boundary conditions for the further development of radial clinching were deducted.

Design of subsystems for radial clinching

Based on the first process knowledge alternative approaches were developed in a morphologic procedure and optimal concepts for the set up of a demonstrator of a radial clinching system were selected. The following subsystems were considered:

- Basic tool geometry
- Allocation of the radial motor
- Relevant information for the process monitoring system
- Procedure for evaluating the information

Experimental verification of the joint strength and concepts for industrial applications

A prerequisite for the acceptance in industry is the high strength of the joining elements. The joining elements have to have the same characteristics particularly to common clinch joints produced by a conventional punch movement. Therefore a joining system was set up and experiments with various punch diameters and geometries were carried out with standard industrial cavities. The results show that the joining elements with radial clinching achieve the same strength as conventional joining elements. Furthermore a model for the interrelation of the parameter joining force, revolution and joining time in two approaches was introduced and verified. The model allows the calculation of production parameters based on this basic knowledge.

Theoretical approach

In order to determine and quantify the parameters for radial clinching theoretical and extensive experimental investigations were carried out on the joining force for radial clinching, i. e. strength of material, sheet metal thickness, punch diameter, work hardening exponent, factor of superimposition and process speed. For this purpose, the influencing parameters were identified. The wide variety of parameters was focused and a process description for radial clinching was illustrated. The parameters can be categorised in parameters belonging to the material, to the tooling, to the process and parameters of the clinching element.

Derived from the analysis of the whole radial clinching process two main process phases were identified and drawn in a force time diagram. The first phase is the phase which can be compared to deep drawing. The second phase can be described as a compression of the material. Due to the complex material behaviour in metal forming processes an approach known from massive forming was transferred to the radial clinching in order to be able to describe the rolling effect on the contact area. The process parameters for stroke in feed and radial constant were calculated. Based on the process parameters the relationship of contact area for each process phase the joining force was calculated. These figures were the basis for the calculation of the first and the second phase. The force calculation was based on deformation resistance and the deformation coefficient was intergraded to calculate

the shaping force for the first phase. The force development was depicted in a load-displacement diagram. For the second phase the shape force for plastic deformation was introduced and the mean compression stress with the mean shaping factor was calculated using the upper boundary method based on the calculation of the specific shape performance. With integration of the calculation of the yield stress the joining force for the second phase can be calculated and shown in a load-displacement diagram. To complete the force calculation and to extract the bending of the die holder the die holder bending factor was calculated and allowed for the model. The three parts of the calculation were integrated and used to compare the real forces with the calculated for two different materials. The comparison shows a good compliance with the calculated force and is thus a valid verification of the model.

Process control

For means of statistical process control neuronal networks offer a variety of advantages. Therefore neuronal networks are used to realise the process surveillance with the aim to classify process problems and to apply a failure strategy. The software for the neuronal network was developed based on the neuronal networks tool box of Matlab's Simulink software. So it is possible to develop a tailored software for process monitoring even with limited software capacities.

The development of a failure classification starts with the selection and measurement of relevant signals. In a second step useful methods to analyse the signals are determined and significant characteristics are extracted. Based on the preparatory work models of neuronal networks are developed and selected.

The developed neuronal networks are based on back propagation and a certain number of neurons in the hidden layer. The developed network were validated by using new sample data. The results show a good respond to failure detection.

Conclusion

As proof of the technical feasibility and for verification of the theoretical results a pilot system for an automatic radial clinching system was realised and tested on an exemplary product. The potential for the force reduction and the strength of the joined elements were shown. A force reduction from up to 80 percent is possible

without any compromises in the strength of the joining elements. Furthermore the developed process monitoring system was implemented and tested. 6 percent of wrongly clinched elements were not detected, whereas the accuracy of the correct classification laid by 84,8 percent. A mal clinching detected was allocated to the right class in most of the times. Compared to conventional clinching tooling the weight of the prototype system was reduced from 180 kg to 137 kg.

With the realisation of the developed radial spot clinching system and the control system based on neuronal network the technical feasibility of a force reduced clinching technology was proven.

Outlook

For an industrial application of the radial spot clinching system the following further developments will allow a wide spread application:

- Development of radial clinching tools with a higher number of revolutions per minute,
- Reduction of the number of experiments for training the process monitoring system based on neuronal networks,
- Reduction of the clinching systems accelerated mass to reduce the dynamic behavior of the system,
- Integration of a riveting system to enlarge the application areas of the radial spot clinching system.

The work shows the technical feasibility of the approach to use radial clinching as a method for force reduced clinching.

11 Literaturverzeichnis

- [Allw00] Allweins, K.; v. Kreutzbruck, M.; Rühl, T.; Heiden, C.:
Wirbelstrom-Mehrfrequenztechnik zur Fehlercharakterisierung von
genieteten Aluminium-Mehrlagenstrukturen.
In: ZfP im Übergang zum 3. Jahrtausend. Jahrestagung, Innsbruck,
29.-31. Mai 2000. Band 2.
Berlin, DGzFP, 2000, S. 911 - 922
- [Ande97] Anders, U.:
Statistische neuronale Netze.
München: Vahlen, 1997
Karlsruhe, Uni., Diss. 1997
- [Ahre05] Ahrend, M. T.:
Grenzen und Möglichkeiten Neuronaler Netze zur Qualitätssiche-
rung beim Widerstandspunktschweißen unter fertigungsgerechten
Bedingungen.
Aachen, Shaker Verlag, 2005
Aachen, Techn. Hochschule, Diss. 2004
- [Bamb05] Bambach, M.; Hirt, G.; Ames, J.: Quantitative validation of FEM Si-
mulations for Incremental Sheet Forming Using Optical Deformation
Measurement.
In: Advanced Materials Research, Proceedings of the 11th Int. Con-
ference on Sheet Metal SHEMET 05.-08. April, Nürnberg. Uetikon-
Zuerich, Schweiz: Trans Tech Publications Ltd, 2005, S. 509 - 516
- [Beye90] Beyer, R.:
Druckfügen im modernen Karosseriebau.
In: Tendenzen im modernen Karosseriebau, Tagung 1990, 25.-
26.04., Hamburg
Düsseldorf: VDI-Verlag, 1990 (VDI-Bericht 818), S. 351 - 367
- [Böhm04] Böhm, S.:
Einsatz der Ultraschall- und Impuls-Thermografie zur zerstörungs-
freien Prüfung von Clinchverbindungen.
In: Tagungsunterlagen des Arbeitskreises Fügen von Feinblechen
der Europäischen Blechforschungsgesellschaft e. V.,
Braunschweig, 2004, Tischvorlage
- [Bonf95] Bonfig, K. W.:
Neuro-Fuzzy.
Renningen-Malmsheim: expert-Verlag, 1995 (Sensorik, 7)
- [Bräu05] Bräunling, S.:
Clinchen von Stahl-und Aluminiumwerkstoffen unter Einwirkung von
Ultraschall.
In: Tagungsunterlagen des Arbeitskreises Fügen von Feinblechen
der Europäischen Blechforschungsgesellschaft e. V.,
Rostock, 2005, Tischvorlage

- [Brau91] Brause, R.:
Neuronale Netze.
Stuttgart: Teubner, 1991
(Leitfäden und Monographien der Informatik)
- [Brec03] Breckweg, A.:
Zwei in einem.
In: MM-Das Industriemagazin 109 (2003), Nr. 49, S. 26 - 28
- [Brec04] Breckweg, A.; Schmidberger, E.; Neher, J.; Schraft, R. D.:
Inline-Qualitätskontrolle beim Radialclinchen.
In: Automatisierungstechnische Praxis 46 (2004), Nr. 2, S. 68 - 71
- [Brüd03] Brüdgam, S.; Meschut, G.:
Mechanisches Fügen und Kleben – Schlüsseltechnologie für die Mischbauweise.
In: Mechanisches Fügen und Kleben - Tagungsband zum 10. Paderborner Symposium Fügetechnik, 11.-12. September 2003, Paderborn, 2003, S. 1 - 9
- [Brüd04] Brüdgam, S.; Hahn, O.; Ruther, M.:
Fügesystemoptimierung für Mischbauweisen im Karosseriebau.
In: ATZ, 12/2004, S. 1132 - 1141
- [Budd89] Budde, L.:
Untersuchungen zur Kombination quasi-formschlüssiger und stoffschlüssiger Verbindungsverfahren.
Paderborn, Univ., Diss. 1989
- [Cape03] Capelle, D.:
Tücken des Aluminiums.
In: Scope (2003), Nr. 2
- [Cram95] Cramer, R.:
Flexibel automatisierte Montage hochpoliger Rundkabel.
Berlin: Springer, 1995
(IPA-IAO Forschung und Praxis, 211)
Stuttgart, Univ., Diss. 1994
- [Cron05] Cronauer, D.; Kutz, W.:
Rechnerunterstütztes, hochgenaues Fügen mit Pressen und statistischer Prozesskontrolle zur Verfahrensoptimierung.
In: Mechanisches Fügen und Kleben - Tagungsband zum 12. Paderborner Symposium Fügetechnik, 23.-24. November 2005, Paderborn, 2005, S. 195 - 207
- [Dick98] Dickersbach, J. T.:
Einsatz Neuronaler Netze zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen.
Aachen: Shaker, 1998
(Aachener Berichte Fügetechnik; Band 98,5)
Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 1998

- [Dech82] Decheng, Z.; Xinghua, P.; Zhongren, W.:
Some basic problems of the rotary forging and its applications.
In: Proceedings of 2nd International Conference on Rotary Metal-
working Process. 06.-08.October 1982.
Stratford upon Avon, 1982, S. 91 - 100
- [EFB05] Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e. V.:
<http://www.efb.de>,
Stand: 2005-11-30
- [Frie99] Frieß, E.:
Anwendung neuronaler Netze zur Werkzeugverschleißerkennung
beim Fräsen.
Berlin: PTZ, 1999
(Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin)
Berlin, Techn. Univ., Diss. 1998
- [Gras04] Grass, W. u. a.:
Technische Anwendungen von mehrlagigen Perzeptren. Online-
script, Verbundprojekt im Rahmen des bmb+f-Programms „Neue
Medien in der Hochschullehre“
http://lrs2.fmi.uni-passau.de/online/MLP/index2.html?group=student&intensity=expert&form=script&page=1&toc=yes&head=yes&anc=_11:&tocanc=1, (2004-10-29)
- [Grot05] Grothaus, R.; Kroll, S.; Gigengack, T.:
Hochleistungs-Fügezange in Hybridbauweise für den Robotereinsatz.
In: Mechanisches Fügen und Kleben - Tagungsband zum 12.
Paderborner Symposium Fügetechnik, 23.-24.11.2005, S.183 - 194
- [Hafn96] Hafner, S.:
Neuronale Netze in der Automatisierungstechnik.
München, Wien: R. Oldenbourg Verlag, 1994
- [Hahn00] Hahn, O.; Schulte, A.; Herter, H.:
Eignung des Durchsetzfügens und des Stanznietens zum Fügen
höherfester Stahlbleche.
Düsseldorf, Verlag und Vertriebsges.m.b.H., 2000
(Forschung für die Praxis; P283)
- [Hahn04] Hahn, O.; Philipskötter, A.:
Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der mechanischen Fügetechnik.
In: Mechanisches Fügen und Kleben - Tagungsband zum 10. Paderborner Symposium Fügetechnik, 11.-12. September 2003, Paderborn, 2003, S. 203 - 213
- [Hall05] Haller, J.:
Setzen von mechanischen Fügeverbindungen mit reduzierter Kraft.
In: Fügen mit minimaler Grundwerkstoffbeeinflussung: 2. Kongress Join-Tec, 22.-23.02.2005, Halle an der Saale
Halle: Schweißtechn. Lehr- und Versuchsanstalt, 2005 S. 58 - 68

- [Hein96] Heinze, R.:
Taumelpressen geradverzahnter Zylinderräder.
Aachen: Techn. Hochsch., Diss., 1996
- [Hüb05] Hübner, S.:
Clinchen moderner Blechwerkstoffe.
Garbsen: PTZ, 2005
(Berichte aus dem IFUM, 2005, Bd. 4)
Hannover: Univ., Diss. 2005
- [Huf00] Hufenbach, W.:
Leichtbau mit höherfesten Stahlblechen und Tailored Blanks für eine innovative PKW-Fertigung.
In: Einladungskolloquium Stahl für moderne Automobile,
16.03.2000, Frankfurt am Main.
Frankfurt am Main: Studiengesellschaft Stahlanwendung, 2000,
(Tagungsband / Studiengesellschaft Stahlanwendung; 733)
- [Jimm63] Jimma, T.:
The Theoretical Research on the Blanking of Sheet Material.
In: Bulletin of JSME 6 (1963) Nr. 23, S. 568 - 576
- [Klas94] Klasfauseweh, U.:
Beitrag zur Simulation nichtschneidender Durchsetzfügevorgänge.
Paderborn: Univ. Gesamth., Diss. 1994
- [Krau00] Krause, S. D.; Baginski, S. M.; Kochs, H-D.; Koch, M.; Esser, G.:
Fehlerdetektion durch neuronale Netze bei der Schweißnahtüberwachung laserstrahlgeschweißter Tailored Blanks.
In: atp 42 (2000) Nr. 7, S. 43 - 49
- [Kuhl05] Kuhlenkötter, B.:
ePro: Verfahren zur effizienten Optimierung von robotergestützten Schleif- und Polierprozessen.
In: Fraunhofer IPA (Hrsg.): Tagungsband Robotik und Handhabungstechnik in der Produktion, Fraunhofer IPA Technologieforum, 08. und 09. Dezember 2005, Stuttgart, S. 50 – 66
(Fraunhofer IPA – Technologie Forum F124)
- [Kühn01] Kühn, T.:
FE-Simulation und Modellbildung von punktförmigen Blechverbindungen, insbesondere von Stanzniet- und Durchsetzfügeverbindungen.
Kassel: Univ., Diss. 2001
- [Lag04] Lagler, K.; Mauermann, R.:
Robotergestütztes Impulsnieten im Fahrzeug-Rohbau.
In: Tagungsband IIR Fachforum Fügetechnologien im Fahrzeugrohbau, Dresden 2004
- [Lang84] Lange, K.:
Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft-Studienausgabe.

Band 1: Grundlagen, 2. Aufl., Nachdruck
Berlin u. a.: Springer, 2002

- [Lieb95] Liebig, H. P.; Bober, J.; Jacobsen, J.:
Neue Wege beim umformtechnischen Fügen austenitischer Stahl-
bleche.
In: Bänder Bleche Rohre, (1997), Nr. 6
- [Matt05] Matthes, K.; Todtermuschke, M.; Thoms V.; Bräunling, S.:
Entwicklung einer einseitig ebenen Verbindung durch Radialfügen.
Hannover, EFB, 2005
(EFB-Forschungsbericht, Nr. 243)
- [Mayr83] Mayrhofer, K.:
Kaltfließpressen von Stahl und Nichteisenmetallen: Stand der
Technik in Theorie und Anwendung.
Berlin u. a.: Springer, 1983
- [Mend03] Mende, T.:
Innovative Verfahren zum Fügen von bandbeschichtetem Blech in
der Automobilindustrie.
In: Fügen mit minimaler Grundwerkstoffbeeinflussung. Join-Tec,
18.-19.02.2003, Dresden, 2003, o. Z.
- [Mess00] Messler, R. W.:
Trends in key joining technologies for the twenty-first century.
In: Assembly Automation 20 (2000) Nr. 2, S. 118 - 128
- [Meye05] Meyer, O.:
Produkthaftung und Rückruf in der Zulieferindustrie.
In: ISGATEC: Dichtungstechnik-Jahrbuch 2005
Heidelberg: Hüthig, 2004, S. 405 - 411
- [Mich02] Michels, K.; Klanwonn, F.; Kruse, R.; u. a.:
Fuzzy-Regelung.
Berlin u. a.: Springer, 2002
- [Möss79] Mössle, E.:
Kaltmassivumformung durch Taumelpressen.
In: Industrie-Anzeiger 101 (1979), S. 66 - 69
- [Muss05] Mussbach-Winter, U.; Wiendahl, H.-H.; Kipp, R.:
MES-Systeme - Tipps zu Einsatz und Auswahl.
In: Expertenwissen & Anwendererfahrungen ERP-PPS-CRM-MES-
SCM, München, 2005, getr. Z.
- [Muts94] Mutschler, J.:
Über die Sicherung der Erzeugnisqualität in der Durchsetzfüge-
technik insbesondere bei Einsatz flexibler Fertigungseinrichtungen.
Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss. 1994

- [Patt96] Patterson, D. W.:
Künstliche Neuronale Netze: Das Lehrbuch.
München u. a.: Prentice Hall, 1996
- [Rich97] Richter, A.:
Möglichkeiten und Grenzen der Prozessüberwachung zur Qualitätssicherung beim Fügen durch Umformen.
Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss. 1997
- [Röhr99] Röhrle, M.:
Clinchen hat Zukunft.
In: WB Werkstatt und Betrieb 132 (1999) Nr. 10, S. 53 - 54
- [Ruth05] Ruther, M.; Eckstein, J.; Busse, S.:
Prozesssimulation Clinchen und Stanznieten.
In: Mechanisches Fügen und Kleben - Tagungsband zum 12. Paderborner Symposium Fügetechnik, 23.-24.11.2005, S. 111 - 119
- [Sack96] Sack, P.:
Beitrag zum umformtechnischen Verbinden von Blechteilen durch Fügeelemente geringer Erhabenheit.
Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Diss. 1996
- [Saue80] Sauer, R.:
Untersuchung zur Mechanik des Kaltscherens.
Aachen, Techn. Hochsch., Diss. 1980
- [Schm93] Schmid, G.; Singh, S.:
Dünnblechkonstruktionen und ihre Eigenschaften - Prüfverfahren und ihre Aussagekraft.
In: DVS Sondertagung „Fügen von Aluminium im Dünnblechbereich“, Ingolstadt, 11.-12. Nov. 1993, S. 17 - 27
- [Schm04] Schmid, E.:
Numerische Analyse des Clinchprozesses mit dreigeteilter Matrize.
Aachen: Shaker, 2004
(Berichte aus d. Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, 55)
Paderborn, Univ., Diss., 2004
- [Schn96] Schneider, W. D.:
Flexibel automatisiertes Taumelnieten.
Berlin u. a.: Springer, 1997
(IPA-IAO Forschung und Praxis, Band 244)
Stuttgart, Univ., Diss. 1996
- [Scho92] Schondelmaier, J.:
Grundlagenuntersuchung über das Taumelpressen.
Berlin u. a.: Springer, 1992
(Berichte aus dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, 117)
Stuttgart, Univ., Diss. 1992

- [Schr99] Schraft, R. D.; Kaun, R.:
Automatisierung: Stand der Technik, Defizite und Trends in der Automatisierungstechnik.
Düsseldorf: Handelsblatt, 1999
- [Schr76] Schraft, R. D.:
Systematisches Auswählen und Konzipieren von programmierbaren Handhabungsgeräten.
Mainz: Krausskopf, 1976
(IPA Forschung und Praxis Stuttgart, Univ., Diss. 1976)
- [Schr05] Schröder, M.:
Clinchen von Dualphasenstahl mit leichten Fügezangen großer Ausladung.
Aachen: Shaker, 2005
(Berichte aus d. Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, 66)
Paderborn, Univ. , Diss. 2005
- [Schu96] Schuler GmbH:
Handbuch der Umformtechnik.
Berlin u. a.: Springer, 1996
- [Schu97] Schulz, E.:
Leichtbau von Fahrzeugen mit innovativen Stählen.
In: Neuartige Fahrzeugleichtbaukonzepte durch Stahlinnovation.
Dresdener Leichtbausymposium, 23. und 24. Juni 1997, Dresden.
Düsseldorf: Verlag und Vertriebsges., 1997
- [Schu98] Schulte, V.:
Mechanisches Fügen und Kleben – Fügetechniken für den eigenschaftsoptimierten Leichtbau.
In: Mechanisches Fügen und Kleben - Tagungsband zum 6. Paderborner Symposium Fügetechnik, 05.-06.11.1998
- [Schu00] Schulte, V.:
Entwicklung und Untersuchung eines Verfahrens mit dynamischen Werkzeugbewegungen zur Reaktionskraftreduzierung beim umformtechnischen Fügen.
Aachen: Shaker, 2000
(Berichte aus d. Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, 45)
Paderborn, Univ., Diss. 2000
- [Schu00a] Schumann, S.:
Repräsentative Umfrage.
3., überarb. Aufl.
München u. a.: Oldenbourg, 2000
- [Schw78] Schweizer, M.:
Taktile Sensoren für programmierbare Handhabungsgeräte.
Mainz: Krausskopf, 1978
(IPA Forschung und Praxis)
Stuttgart, Univ., Diss. 1978

- [Spur84] Spur, G. (Hrsg.); Schmoeckel, D. (Hrsg.):
Handbuch der Fertigungstechnik. Band 2: Umformen und Zerteilen.
Teil 2: Umformen.
München u. a.: Hanser, 1984
- [Stati04] Statistisches Bundesamt:
Datenreport 2004, 2. aktual. Auflage
Bonn: Bundeszentrale für Politische Bildung, 2004
- [Tan04] Tan, Y.:
Beurteilung des Tragverhaltens von Clinchverbindungen mittels des
Einsatzes künstlicher neuronaler Netze.
Aachen: Shaker, 2004
(Berichte aus d. Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik, 57),
Paderborn, Univ., Diss. 2004
- [Thom02a] Thoms, V.; Timm, M.:
Thermisch unterstütztes Stanznieten (Abschlussbericht zum AiF-
Forschungsvorhaben Nr. 12241 BG)
Hannover: EFB, 2002
(EFB-Forschungsbericht, Nr. 191)
- [Thom03] Thoms, V.; Westkämper, E.; Kalich, J.; Breckweg, A.:
Entwicklung von Verfahren und Einrichtungen zum Radialclinchen.
(Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 27ZBG),
Hannover: EFB, 2003
(EFB-Forschungsbericht Nr. 197)
- [Thom03a] Thoms, V., Westkämper, E., Six, S., Breckweg, A.:
Stanznieten mit überlagerter Bewegung (Abschlussbericht zum AiF-
Forschungsvorhaben 12795 BG)
Hannover: EFB, 2002
(EFB-Forschungsbericht Nr. 179)
- [Thom04] Thoms, V:
Elektromagnetisches Fügen
In: Tagungsunterlagen des Arbeitskreises Fügen von Feinblechen
der Europäischen Blechforschungsgesellschaft e. V.,
Braunschweig, 2004, Tischvorlage
- [Voig05] Voigt, H.-M.; Hahn, O.:
Einsatz maschineller Lernverfahren zur Vorhersage des Tragverhal-
tens von Clinchverbindungen.
(Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 13441BG/1),
Berlin: GfAI, 2005
- [Wegs04] Wegst, C.; Wegst, M.:
Stahlschlüssel. 20. Auflage.
Marbach: Verlag Stahlschlüssel, 2004
- [Wenz04] Wenzel, A.:
Mechanische Fügetechniken mit Potenzial.
In: Fraunhofer IPA: Trendforum Montage, Fraunhofer IPA-Forum,

18. November 2004, Stuttgart
Stuttgart, 2004, S. 83 - 99
(Fraunhofer IPA-Forum F111)

- [West03] Westkämper, E.:
Quo Vadis Fertigungstechnik?
In: Ambos, E. (Hrsg.) u. a.: Magdeburger Fertigungstechnisches
Kolloquium MFK2003
Aachen: Shaker Verlag, 2003, S. 41 - 98
(Berichte aus der Fertigungstechnik)
- [Wohl03] Wohlmuth, B.; Brußen, S.:
Mathematik-Numerik, Modellierung, Simulation.
In: http://www.web-spline.de/publications/unibroschuere2003_mathematik.pdf (2006-01-30)
- [Zade65] Zadeh, L. A.:
Fussy Sets.
In: Information and Control, 8 (1965), Nr. 3, S. 338-353
- [Zell94] Zell, A.:
Simulation neuronaler Netze.
4., unveränderter Nachdruck
München: Oldenbourg, 2003
- [Zhan84] Zhang, M.:
Calculation of force and energy during rotary forging.
In: Kobayshi, M. (Ed.): Proceedings of the 3rd International Conference on Rotary Metalworking Processes. 08.-10.- September 1984, Kyoto, Japan.
Bedford: IFS Pub. 16, 1984, S. 115 – 124

Normen und Richtlinien

- [Arbe75] Verordnung über Arbeitsstätten vom 20.03.75. BGB1.IS.729, 1982
S. 1; 1983 S. 1057; 1996 S. 1841
- [DIN 14272] DIN EN ISO 14272 2002-04:
Probenmaße und Verfahren für die Kopfzugprüfung an Widerstandspunkt- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln
- [DIN 14273] DIN EN ISO 14273 2002-03:
Probenmaß und Durchführung für die Scherzugprüfung an Widerstandspunkt-, Rollennaht- und Buckelschweißungen mit geprägten Buckeln
- [DIN 8593] DIN 8593 Teil 5 2003-09:
Fertigungsverfahren Fügen. Fügen durch Umformen. Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [DVS 3420] DVS/EFB 3420 2002-08:
Clinchen - Überblick

- [VDI 2860] VDI-Richtlinie 2860 1990-05
Montage und Handhabungstechnik - Handhabungsfunktionen,
Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole
- [VDI 2880] VDI-Richtlinie 2880 BLE1E 1982
Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, De-
finitionen, Symbole
- [VDI 2221] Richtlinie VDI 2221 1993-05:
Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme
und Produkte.
- [VDI 2222] Richtlinie VDI 2222 Blatt 1 1997-06:
Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungs-
prinzipien.

Firmenschriften

- [Avde02] Avdel Verbindungselemente GmbH: Aviclinch
Langenhagen, 2002 - Firmenschrift
- [Bal04] Einsparpotenzial durch Nietprozess-Überwachung.
In: Bleche Rohre Profile (2004) Nr. 7, S. 40 - 41
- [Dunk05] Programmiertes Nieten.
In: VDI-Z 147(2005), Nr. 5
- [Ecko99] Eckold GmbH & Co. KG: Eckold-Clinchen: Informationen und Ent-
scheidungshilfen; ein Leitfaden zur Anwendung der Eckold-
Clinchtechnik.
St. Andreasberg, 1999 - Firmenschrift
- [Tox04] Tox-Blechverbindungssystem: Nieten ohne Niet.
Tox Pressotechnik GmbH & Co. KG: Tox-Werkzeugauswahlliste
Weingarten, 2003 - Firmenschrift

Schutzrechte

- [DE19840780] Schutzrecht DE 19840780 A1 (1998-09-07)
Fraunhofer-Gesellschaft. Pr.: DE000019840780A1
- [DE10140989] Schutzrecht DE 10140989 C2 (2003-11-20)
Fraunhofer-Gesellschaft. Pr.: DE2001010140989
- [DE19747267] Schutzrecht DE19747267 C2 (1999-08-05)
Eckold AG. Pr.: DE1997019747267
- [DE19701088] Schutzrecht DE19701088A1 (1997-01-15)
BMW AG. Pr. DE000019701088A1
- [EP890397] Schutzrecht EP890397B1: (1998-07-06)
Hahn, Ortwin Pr.: EP000000890397B1

