

Viktor Holstein

Grundlagen des inkrementellen Biegens im Gesenk



Grundlagen des inkrementellen Biegens im Gesenk

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Viktor Holstein

aus

Werchnije Sergi

Dortmund, 2025

Vorsitzender der Prüfungskommission:	Prof. Dr. Ulrich Handge
Berichter:	Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Sebastian Härtel
	Prof. Dr.-Ing. Marcel Bartz
Tag der mündlichen Prüfung:	04. November 2025

Dortmunder Umformtechnik

Band 127

Viktor Holstein

Grundlagen des inkrementellen Biegens im Gesenk

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Düren 2026

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2025

Copyright Shaker Verlag 2026

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

Print-ISBN 978-3-8191-0566-1
PDF-ISBN 978-3-8191-0616-3
ISSN 1619-6317
eISSN 3052-5381
<https://doi.org/10.2370/9783819106163>

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand als externe Forschungsarbeit am Institut für Umformtechnik der Technischen Universität Dortmund. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Grundlagen für das neuartige Verfahren „Inkrementelles Biegen im Gesenk“ erarbeitet, das eine kostengünstige Herstellung gebogener Profilbauteile ermöglicht, deren Geometrien sich teilweise mit den bisher bekannten Verfahren nicht fertigen lassen.

Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Betreuer Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Erman Tekkaya, der die Durchführung dieser Arbeit erst ermöglicht und maßgeblich unterstützt hat. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Sebastian Härtel für die Übernahme des Korreferats und Herrn Prof. Dr. Ulrich Handge sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Marcel Bartz für ihre Mitwirkung in der Prüfungskommission.

Für die Betreuung der Arbeit an der Fachhochschule Südwestfalen danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Hermes. Am Fachgebiet für Umformtechnik und Füge­technik am Standort Meschede wurde ein Großteil der Inhalte erarbeitet.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Haupt danke ich für die vielen anregenden und lehrreichen Diskussionen im Hinblick auf die theoretische Prozessbeschreibung.

Mein Dank gilt außerdem den aktuellen und ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern insbesondere Dr.-Ing. Daniel Staupendahl, Frau B. Eng. Aynur Keskin, Herrn B. Eng. Christoph Berlinger, Dipl.-Ing. Dirk Brune sowie Dipl.-Ing. Rainer Hofmann für die kollegiale Zusammenarbeit und die anregenden Diskussionen.

Ebenso danke ich den Studentinnen und Studenten, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt haben.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Familie und meinen Freunden. Durch ihre stetige Unterstützung, ihr Verständnis und ihren Zuspruch haben sie maßgeblich dazu beigetragen, dass diese Arbeit entstehen konnte.

Abstract

In the field of forming technology, the production of complex geometries that surpass the capabilities of traditional bending processes is a recurring challenge. Incremental bending in a die is a promising solution, as it enables the production of even difficult geometries thanks to special kinematics and tool design. In comparison with conventional methodologies, which involve the manipulation of the profile through a bending head that offers minimal degrees of freedom of movement, incremental bending in a die facilitates enhanced degrees of freedom of movement by virtue of the freely movable bending head. This enables profile sections to approach or overlap each other. The process is initiated by the movement of the bending head along the geometry, with the profile being placed within a mould or around support points. This facilitates adaptability to diverse forming conditions, ensuring precise outcomes.

In this study, the process was analysed using a combination of experimental methods and finite element models. This approach facilitated the identification of the most significant process mechanisms that play a central role in path planning and formation, and enabled their elucidation through the utilisation of the following categories: The following movements are to be considered: 1D, 2D and 3D. As the degree of freedom of movement of the bending head increases, so too does the complexity and influence of the forming zone on the component. Special parameters were defined and explained for each of these degrees of freedom of movement. The relationship between the selected process parameters and the resulting effects on the forming zone and the finished result was presented.

Analytical models were developed to calculate the forces and moments that occur during forming in order to determine the optimum process parameters. The employment of these models facilitates the determination of drive power and the optimisation of kinematics. A VBA-based software solution has been developed for the practical application of incremental bending in the die. This software is integrated into Excel in order to automate the path planning and kinematics of the bending head. The process under discussion facilitates the efficient calculation and adjustment of the kinematics, thereby ensuring that deviations from the target geometry are avoided. In the domain of three-dimensional path planning, the primary objective is to mitigate the risk of collisions while optimising geometric parameters. This approach is undertaken to minimise the time required for calculations, whilst maintaining the precision of the forming process.

The subsequent presentation comprised the establishment of process limits, and the introduction of strategies for the enhancement of component quality.

A particularly salient aspect of the work is the distinction between the formation of circular and non-circular profiles. Whilst the formation of circular profiles is not problematic, measures must be implemented to prevent twisting in non-circular cross-sections in order to ensure precise geometry. In order to address this issue, a number of strategies for preventing twisting were presented.

In conclusion, a practical implementation of the process was outlined, and an extended bending head was presented, which, with its powered height adjustment, offers a flexible solution for different drive concepts.

Kurzzusammenfassung

In der Umformtechnik steht man regelmäßig vor der Herausforderung, komplexe Geometrien zu fertigen, die die Grenzen herkömmlicher Biegeverfahren überschreiten. Das inkrementelle Biegen im Gesenk stellt eine vielversprechende Lösung dar, da es durch eine besondere Kinematik und Werkzeuggestaltung ermöglicht auch schwierige Geometrien zu erzeugen. Im Vergleich zu den klassischen Verfahren, bei denen das Profil durch einen Biegekopf geführt wird, der nur begrenzte Bewegungsfreiheit hat, erlaubt das inkrementelle Biegen im Gesenk durch den frei beweglichen Biegekopf eine größere Bewegungsfreiheit so dass Profilabschnitte sich nahekommen oder überschneiden können. Das Verfahren funktioniert, indem der Biegekopf die Geometrie schrittweise abfährt, während das Profil in eine Form oder um Stützstellen abgelegt wird. Dies ermöglicht eine flexible Anpassung an unterschiedliche Umformsituationen und führt zu präzisen Ergebnissen.

In dieser Arbeit wurde das Verfahren anhand von Experimenten und Finite-Elemente-Modellen analysiert. Dadurch konnten die wichtigsten Prozessmechanismen die eine zentrale Rolle bei der Bahnplanung und der Umformung spielen, identifiziert und auf Basis der Kategorien: 1D-, 2D- und 3D-Bewegungen erläutert werden. Dabei nimmt mit steigender Bewegungsfreiheit des Biegekopfes die Komplexität und der Einflussbereich der Umformzone auf das Bauteil zu. Für jeder dieser Bewegungsfreiheitsgrade wurden spezielle Kenngrößen definiert und erläutert. Es wurde der Zusammenhang zwischen gewählten Prozessparametern und den resultierenden Auswirkungen auf die Umformzone sowie das fertige Ergebnis dargestellt.

Zur Berechnung der optimalen Prozessparameter wurden analytische Modelle entwickelt um Kräfte und Momenten zu berechnen, die während der Umformung auftreten. Diese Modelle ermöglichen es, die Antriebsleistungen zu bestimmen und die Kinematik zu optimieren. Für die praxisnahe Anwendung des inkrementellen Biegens im Gesenk wurde eine VBA-basierte Softwarelösung entwickelt, die in Excel integriert ist, um die Bahnplanung und Kinematik des Biegekopfes zu automatisieren. Dies ermöglicht eine effiziente Berechnung und Anpassung der Kinematik, um Abweichungen von der Sollgeometrie zu vermeiden. Bei der 3D-Bahnplanung liegt der Fokus auf der Vermeidung von Kollisionen und der Optimierung der Geometrie, um die Berechnungszeit zu reduzieren und gleichzeitig die Genauigkeit der Umformung zu gewährleisten.

Anschließend wurden Prozessgrenzen dargestellt und Strategien vorgestellt um die Bauteilqualität zu verbessern.

Besonders wichtiger Aspekt der Arbeit ist die Unterscheidung zwischen der Umformung von kreisrunden und nicht kreisrunden Profilen. Während bei kreisrunden Profilen die Umformung unproblematisch ist, müssen bei nicht kreisrunden Querschnitten Maßnahmen zur Vermeidung von Verdrillung getroffen werden, um eine präzise Geometrie zu gewährleisten. Dazu wurden Strategien vorgestellt, um das Verdrillen zu verhindern.

Abschließend wurde ein Ausblick auf die praktische Umsetzung des Verfahrens gegeben, sowie ein erweiterter Biegekopf vorgestellt der mit angetriebener Höhenverstellung eine flexible Lösung für unterschiedliche Antriebskonzepte bietet.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Danksagung	v
Abstract	vii
Kurzzusammenfassung	ix
Inhaltsverzeichnis	xi
Vorabveröffentlichungen von Inhalten	xiii
Formelzeichen und Abkürzungen	xv
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	3
2.1 Grundlagen des Profilbiegens	3
2.1.1 Analytik beim Biegen.....	3
2.1.2 Rückfederung beim Biegen.....	6
2.1.3 Beschreibung des Verfestigungsverhalten	8
2.1.4 Biegen von Profilen.....	8
2.1.5 Finite-Elemente-Methode in der Profilbiegetechnik.....	11
2.2 Profilbiegeverfahren.....	12
2.2.1 Biegeverfahren mit formgebundener Biegekontur.....	12
2.2.2 Biegeverfahren mit kinematischer Definition der Biegekontur	17
2.2.3 Zusammenfassung Biegeverfahren	21
2.3 Darstellung des Patents für das Inkrementelle Biegen im Gesenk.....	22
3 Ziel der Arbeit	25
4 Prozessablauf und Versuchsaufbau	27
4.1 Prozessablauf.....	27
4.1.1 Gestaltung der Kinematik.....	28
4.1.2 Anpassung der Werkzeugform.....	30
4.2 Einordnung des Inkrementellen Biegens im Gesenk	32
4.3 Versuchsaufbau und Variationen	33
4.3.1 Biegekopf und Profilführungseinheit.....	33
4.3.2 Werkzeugform.....	35
4.3.3 Eingesetzte Werkstückgeometrien und Werkstoffe	37
4.4 FE-Modell	37
4.5 Definition Verdrillung und Verdrehung.....	39
5 Untersuchung der Umformmechanismen	41
5.1 Mechanismen in 1D	42
5.1.1 Beschreibung des Umformprozesses/Umformzone	42
5.1.2 Einflussparameter	43
5.2 Mechanismen in 2D	47

5.2.1	Beschreibung des Umformprozesses/Umformzone	47
5.2.2	Einflussparameter	51
5.2.3	Zusammenfassung	58
5.3	Mechanismen in 3D	59
5.3.1	Beschreibung des Umformprozesses/Umformzone	60
5.3.2	Einflussparameter	60
5.4	Analytische Ansätze zum Auslegen des Verfahrens	64
5.4.1	Berechnung des Versatzes	64
5.4.2	Berechnung der Biegemomente und der Vorschubkraft	65
5.4.3	Berechnung der Vorschubkraft mit Spannungsüberlagerung	70
6	Entwicklung der Kinematik, Variationen und Prozessgrenzen	75
6.1	Bahnplanung 2D	75
6.2	Bahnplanung 3D	78
6.3	Weiterführende kinematische Optimierungsmöglichkeiten	82
6.3.1	Optimierung des Biegekopfs	82
6.3.2	Zweistufige-Kreisbahn-Kinematik	83
6.3.3	Z-Offset Feinanpassung 3D	84
6.4	Prozessvariationen	86
6.4.1	Variationen 2D	86
6.4.2	Variationen 3D	87
6.4.3	Überbiegen/Rückfederung	88
6.5	Prozessgrenzen	89
6.5.1	Allgemeine Prozessgrenzen	89
6.5.2	Prozessgrenzen durch Biegekopf	89
6.5.3	Prozessgrenzen durch Kinematik	90
6.5.4	Prozessgrenzen durch Stützstelle	92
6.5.5	Prozessgrenzen durch Reibung	92
6.6	Entwurf eines erweiterten Biegekopfes mit antriebener Höhenverstellung	93
7	Zusammenfassung und Ausblick	95
	Literaturverzeichnis	99
	Lebenslauf	107

Vorabveröffentlichungen von Inhalten

Publikationen

Die nachfolgend aufgeführte Veröffentlichung ist im Rahmen dieser Dissertation entstanden und wurden vorab publiziert:

Holstein, V., Hermes, M., Tekkaya, A. E., 2020. Analysis of incremental die bending of wires and tubes, *Production Engineering* 14, S. 265-274.

Studentische Arbeiten

Die Erkenntnisse der folgendem, von mir definierten und betreuten, studentischen Arbeiten werden ergänzend in dieser Dissertation verwendet:

Helwig, M., 2021. Entwurf und Ausarbeitung eines Konzepts bezüglich einer Vorrichtung zum Inkrementellen Biegen im Gesenk, Projektarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.

Nölke, T., 2016. Konstruktion eines Drahtvorschubes für ein Biegewerkzeug zum Inkrementellen-Drahtbiegen im Gesenk, Projektarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.

Rosenkranz, D., 2018. Entwicklung eines Prozessplanungssystems für 2D IGB von Profilen, Projektarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.

Rosenkranz, D., 2019. Entwicklung eines 3D Prozessplanungssystems für einen neuartigen Profilbiegeprozess, Bachelorarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.

Schenk, H., 2023. Erweiterung des Versuchsaufbaus und Durchführung von Untersuchungen zum inkrementellen 3D-Biegen in gestützten Konturen, Bachelorarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.

Schenk, H., 2023. Inkrementelles Biegen von Vierkantprofilen, Projektarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung
A	mm	Querschnittsfläche
b	mm	Breite
D	mm	Durchmesser
D_f	mm	Durchmesser Profilverführung
D_p	mm	Profildurchmesser
E	MPa	E-Modul
F	N	Kraft
F_b	N	Biegekraft
F_r	N	Reibkraft
F_v	N	Vorschubkraft
h_{BQ}	mm	mittlere Faltenhöhe nach DIN EN 13480-4 (2024)
I	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment
K_f	N·mm ⁻²	Fließgrenze
L	mm	Länge
l_0	mm	Länge neutrale Phase
M	N·m	Drehmoment
M_b	N·m	Biegemoment
M_r	N·m	Reibmoment
$M_{sü}$	N·m	Biegemoment Spannungsüberlagerung
n		Verfestigungsexponent

Zeichen	Einheit	Beschreibung
P	°	Translatorische Achse der Anstellrolle
r_a	mm	Außenradius
r_{BK}	mm	Radius Biegekopf
r_{KB}	mm	Radius Kreisbahn
r_{SA}	mm	Sicherheitsabstand
r_{ST}	mm	Außenradius Stützstelle
r_i	mm	Innenradius
r_m	mm	Mittlerer Radius Biegebogen
r	mm	Radius
R_m	N·mm ⁻²	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N·mm ⁻²	0,2 % Dehngrenze
R_t	µm	Gesamthöhe des Profils (Rautiefe)
s_0	mm	Wandstärke
T	°C	Temperatur
v_f	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
X_v	mm	Gesamtversatz
X_c	mm	Mindestversatz
X_o	mm	zusätzlicher Versatz (Offset)
X, Y, Z	-	Kartesisches Koordinatensystem
y	mm	Abstand zur Profilmittelachse
α	°	Winkel Kreisbogen
β	°	Winkel Verdrehung
γ	°	Winkel Verdrillung
ε	-	Technische Dehnung

Zeichen	Einheit	Beschreibung
μ	-	Reibbeiwert
ρ	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	Dichte
σ	MPa	Spannung
τ	MPa	Schubspannung
φ	-	Umformgrad

Indizes

Index	Beschreibung
a	außen
e	elastisch
gl	gleichmaß
i	innen
p	plastisch
sü	Spannungsüberlagerung
t	total

Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
1D	eindimensional
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
ASCII	American Standard Code for Information Interchange (Zeichenkodierung)
B1	Biegezone 1
B2	Biegezone 2
B3	Biegezone 3

BQ	Biegequalitätsklasse
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computerized Numerical Control
DRSB	Drei-Rollen-Schubbiegen
FEM	Finite-Elemente-Methode
IBG	Inkrementelles Biegen im Gesenk
STL	Standard Tessellation Language (Dateiformat)
VBA	Visual Basic for Applications

1 Einleitung

Gebogene Drähte, Rohre und Profile finden einen breiten Anwendungsbereich in der Industrie. Dies basiert auf den zahlreichen Einsatzmöglichkeiten dieser Bauteile. Sowohl Strukturen mit hohem Leichtbaupotential (He et al., 2011), (Chatti, 2006), (Lafou, 2016) als auch funktionale und ästhetische Geometrien lassen sich hiermit zweckmäßig realisieren. Betrachtet man den Trend in der Biegetechnik, so kann festgestellt werden, dass sich diese immer mehr Richtung flexibler und kundenorientierter Fertigung ändert (Yang, 2018), (Schiller, 2021). Dieses Umdenken, weg von großen Stückzahlen hin zu kundenorientierten Produkten, hat einen erheblichen Einfluss auf die Wahl des Fertigungsverfahrens. Statt werkzeuggebundener Prozesse kommen dadurch vermehrt Verfahren mit kinematischer Geometrierzeugung zum Einsatz (Chatti, 1998), die im direkten Vergleich eine etwas geringere Qualität, aber deutlich höhere Flexibilität bieten. Ein weiterer Grund für diese Entwicklung sind die geringeren Werkzeugkosten der Verfahren, der Fortschritt bei der Berechnung der Geometrierzeugung und die zunehmende Biegequalität der kinematischen Verfahren in den letzten Jahren. Außerdem bieten mittlerweile die Biegeverfahren mit kinematischer Definition der Biegekontur die nötige Flexibilität, um den aktuellen Anforderungen des Leichtbaus und der individuellen Gestaltung gerecht zu werden (Staupendahl und Tekkaya, 2018).

Dem gegenüber ist eine Spezialisierung der Verfahren hinsichtlich ihrer Biegegeometrie, Profilquerschnitt oder Wirtschaftlichkeit festzustellen (Wang, 1998). Dies hat dazu geführt, dass zu den allgemein bekannten Verfahren immer wieder neue hinzukommen. Im Bereich Profilibiegen zählen dazu Methoden wie das MOS-Bending nach Murata und Aoki (1996), das Hexabend-Verfahren nach Neugebauer et al. (2002), das TSS-Bending nach Hermes et al. (2008) und das dreidimensionale Heißbiegen und direkte Abschrecken (3DQ) nach Shimada (2014).

Die kinematischen Verfahren haben auch ihre Nachteile. Bei dünnen Wandstärken und engen Biegeradien erreichen werkzeuggebundene Verfahren ein deutlich besseres Biegeergebnis. Dies basiert auf der besseren Abstützung des Bauteils in der Biegezone während des Umformprozesses. Dadurch lassen sich Profile mit deutlich höherem Durchmesser/Wandstärkeverhältnis umformen und auch kleinere Biegeradien herstellen, was mit höheren Werkzeugkosten und geringerer Flexibilität einhergeht.

Das „inkrementelle Biegen im Gesenk“ (IBG) ist ein neues Biegeverfahren und stellt eine Art Hybrid aus den beiden Verfahrensvarianten dar. Je nach Geometrie kann der Werkzeugaufwand angepasst und sogar wiederverwendet werden. Es lassen sich Biegeradien erreichen, die mit den bekannten kinematischen Verfahren nicht möglich sind, und dass bei einem vergleichbaren geringen Werkzeugaufwand. Des Weiteren ermöglicht der neuartige Prozessablauf auch Bauteilgeometrien, die sich mit den bekannten Verfahren gar nicht oder nur mit einem sehr großen Aufwand herstellen lassen. Damit bietet dieses Verfahren eine gute Ergänzung zu den bereits bekannten Methoden. In dieser Arbeit soll daher eine Basis für das grundlegende Verständnis dieses Verfahrens geschaffen werden. Dazu zählen unter anderem die Beschreibung der Umformmechanismen, der unterschiedlichen Umformstrategien und das dazu notwendige Wissen für die Bahnplanung und die Gestaltung der Kinematik. Auch die Prozessvariationen und Prozessgrenzen sollen dargestellt werden.

2 Stand der Technik

Das Biegen von Profilen ist eine Branche, die sich über die Zeit kontinuierlich weiterentwickelt. Der große Leichtbautrend der vergangenen Jahre forderte komplexere Bauteilgeometrien und den Einsatz höherfester Werkstoffe, die sich naturbedingt schlechter umformen lassen. Hierbei treten besondere Herausforderungen auf, da verschiedenen Bereiche des Werkstücks unterschiedliche Biegebeanspruchungen ausgesetzt sind. Zudem kann nicht jede Biegegeometrie mit jedem Verfahren hergestellt werden. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, werden bestehende Biegeverfahren kontinuierlich weiterentwickelt. Parallel entstehen immer wieder neue Verfahren. Um diesen Trend besser zu verstehen, sollen nachfolgend die Grundlagen des Profilbiegens und relevante Profilbiegeverfahren dargestellt werden.

2.1 Grundlagen des Profilbiegens

Fertigungsverfahren werden nach DIN 8580 (2003) in mehrere Gruppen eingeteilt, darunter ist das Biegen der Hauptgruppe Umformen (DIN 8582, 2003) und der Gruppe Biegeumformen (DIN 8586, 2003) zuzuordnen. Weiterhin werden Verfahren in Biegeumformen mit geradliniger Werkzeugbewegung und mit drehender Werkzeugbewegung unterschieden.

Das Profilbiegen ist eine wichtige Technik in der Fertigungsindustrie, die eine breite Anwendung findet. Dieser Prozess ist in verschiedenen Branchen, von der Automobilindustrie bis hin zur Luft- und Raumfahrt, von entscheidender Bedeutung. Die elementare Biegetheorie liefert hierbei das grundlegende Verständnis für die Mechanik hinter dem Prozess. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ermöglicht präzise Simulationen und Analysen des Biegeprozesses. Die Beherrschung der Rückfederung ist entscheidend für die Herstellung genauer und qualitativ hochwertig gebogener Bauteile. Die Kombination aus theoretischem Wissen, praktischer Erfahrung und modernen Simulationstechniken trägt dazu bei, den Biegeprozess kontinuierlich zu verbessern. In diesem Abschnitt soll daher auf die einzelnen Elemente näher eingegangen werden.

2.1.1 Analytik beim Biegen

Die Analytik beim Profilbiegen basiert auf der elementaren Biegetheorie. Dabei beschäftigt sich diese mit den mechanischen Grundlagen des Biegeprozesses. Sie beruht auf dem Verständnis von Kräften, Momenten und Spannungen, die das Werkstück während des Biegens erfährt. Der Biegeprozess kann sich je nach Biegegeometrie, Werkstoff und Vorgeschichte des Werkstücks unterschiedlich auf die Umformung auswirken. Häufig wird für die analytische Berechnung der Biegung und des Biegemoments der Ansatz von Ludwik (1903) unter folgenden Einschränkungen verwendet (Lange, 1990):

- Beanspruchung durch reines Biegemoment.
- Ebener Formänderungszustand.
- Ebener Querschnitt, bleibt eben und senkrecht zur Oberfläche.

- Es werden nur Spannungen in Achsrichtung berücksichtigt, Spannungen in Breiten- und Dickenrichtung werden vernachlässigt.
- Es wird von einem homogenen und isotropen Werkstoffverhalten ausgegangen.
- Der Querschnitt bleibt konstant während des Biegens.

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen kann die Dehnung ε in der Umformzone als eine Funktion des Abstandes y von der neutralen Phase r_m (**Bild 2.1**) wie folgt berechnet werden:

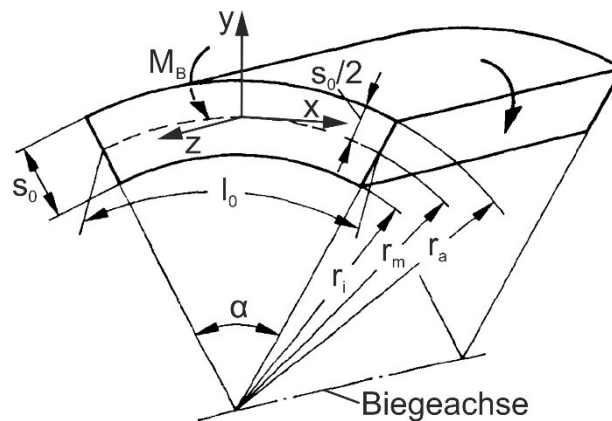


Bild 2.1: Bezeichnungen am Biegebogen nach Lange (1990)

$$\varepsilon = \frac{y}{r_m}. \quad (2.1)$$

Damit kann bei einer elastischen Biegung die Spannung σ im Querschnitt mit

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.2)$$

bestimmt werden. Durch die Integration über den Querschnitt kann das resultierende Biegemoment errechnet werden mit

$$M_b = 2 \int_0^{s_0/2} \sigma(y) b y dy, \quad (2.3)$$

$$M_b = \frac{E b s_0^3}{12 r_m} = \frac{E I_z}{r_m}. \quad (2.4)$$

Durch die Annahme der ebenen Formänderung wird E durch den Platten-E-Modul (E') ersetzt

$$E' = \frac{E}{(1-\vartheta^2)}. \quad (2.5)$$

Neben der elastischen Biegung sind in der Literatur auch teilplastische und vollplastische Biegezustände bekannt (**Bild 2.2**).

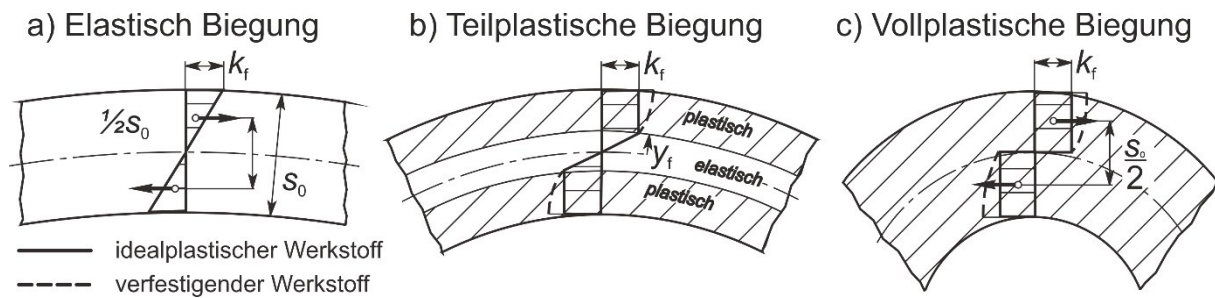


Bild 2.2: Spannungen im Blechstreifen nach elementarer Biegetheorie (Oehler, 1963)

Von einer teilplastischen Biegung (**Bild 2.2b**) spricht man, wenn das Biegemoment sich aus einem elastischen (M_{el}) und einem plastischen (M_{pl}) Anteil zusammensetzt:

$$M_b = M_{el} + M_{pl}, \quad (2.6)$$

$$M_b = 2 \int_0^{y_{f0}} \sigma(y) b y dy + 2 \int_{y_{f0}}^{s_0/2} \sigma(y) b y dy, \quad (2.7)$$

$$M_b = \frac{2}{3} k_{f0} b y_{f0}^2 + k_{f0} b \left(\frac{s_0^2}{4} - y_{f0}^2 \right). \quad (2.8)$$

Als Grenzwert für den Übergangsbereich y_{f0} zwischen elastischer und plastischer Dehnung gilt:

$$y_{f0} = \frac{k_{f0} r_m}{E}. \quad (2.9)$$

Dabei gilt, je größer die Krümmung k , desto kleiner der elastische Anteil,

$$k = \frac{1}{r_m}. \quad (2.10)$$

Ab einer bestimmten Krümmung wird der elastische Anteil so klein, dass er vernachlässigt werden kann. In diesem Fall spricht man von einer vollplastischen Biegung (**Bild 2.2c**). Dadurch vereinfacht sich die Gleichung nach Oehler (1963) und Lange (1990) zu:

$$M_b = M_{pl}, \quad (2.11)$$

$$M_b = \frac{1}{4} k_{f0} b s_0^2. \quad (2.12)$$

2.1.2 Rückfederung beim Biegen

Rückfederung ist ein häufig auftretendes Phänomen im Biegeprozess, bei dem das Werkstück nach dem Entfernen der Biegekraft sich teilweise zurückbiegt. Dies geschieht aufgrund des elastischen Anteiles der überwiegend plastischen Umformung des Materials während des Biegens. Die analytische Berechnung der Rückfederung erfolgt oft nach Lange (1990). Dabei wird angenommen, dass die Rückfederung vollständig elastisch erfolgt und das Rückfederungsmoment M_b^* gleich groß ist wie das Biegemoment M_b , (**Bild 2.3**). Durch die Addition der beiden Biegemomente wird die Bedingung für die Entlastung erfüllt: $M_R = 0$. Nach dem Entlasten bleibt im Bauteil eine Restspannung, die in Summe 0 ergibt.

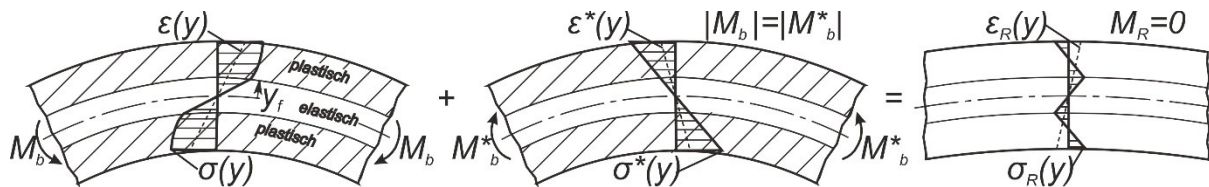


Bild 2.3: Entstehung der Restspannung beim Biegen nach Lange (1990)

Durch die Rückfederung wird der Biegeradius größer und der Biegewinkel federt zurück. Berechnet werden können diese Werte wie folgt. Der Biegeradius nach Lange (1990) mit:

$$\frac{1}{r_{m2}} = \frac{1}{r_{m1}} - \frac{M_b}{EI_z} \quad (2.13)$$

und der Biegewinkel nach Oehler und Kaiser (1966) mit:

$$\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2 = \alpha_1 \frac{12M_b r_m}{E' s_0^3}. \quad (2.14)$$

Der klassische Weg, die Rückfederung zu kompensieren, ist das Überbiegen. Dabei wird ein Winkel errechnet, um den das Bauteil zu überbiegen ist, sodass das Bauteil nach dem Biegen auf den gewünschten Winkel zurückfedert. Eine weitere Möglichkeit ist z. B. das Bauteil während des Biegeprozesses in der Umformzone durch eine gezielte Spannungsüberlagerung oder einen anderen Umformprozess in den plastischen Bereich zu bringen und so die Rückfederung beim Biegeprozess nahezu komplett zu kompensieren (Gu et al., 2016), (Becker, 2014). Für komplexe und asymmetrische Querschnitte oder komplexen Biegeverläufe können FEM-Analysen genutzt werden um, z. B. bei einer optimierten Werkzeuggeometrie oder Werkzeugbahnen zu ermitteln. Das Ausmaß der Rückfederung wird dabei entscheidend von den werkstofftechnischen Parametern bestimmt. Ein guter Überblick der werkstofftechnischen Einflüsse auf das Rückfederungsverhalten ist in **Bild 2.4** dargestellt. So führen eine größere Dehnung oder der

Einsatz eines höherfesten Werkstoffes (bei vergleichbarem E-Modul) zu einer größeren Rückfederung. Dagegen wird mit zunehmendem E-Modul die Rückfederung geringer. Werkstoffe mit höherem Verfestigungsexponent (bei vergleichbarem E-Modul) federn stärker zurück als mit einem geringen.

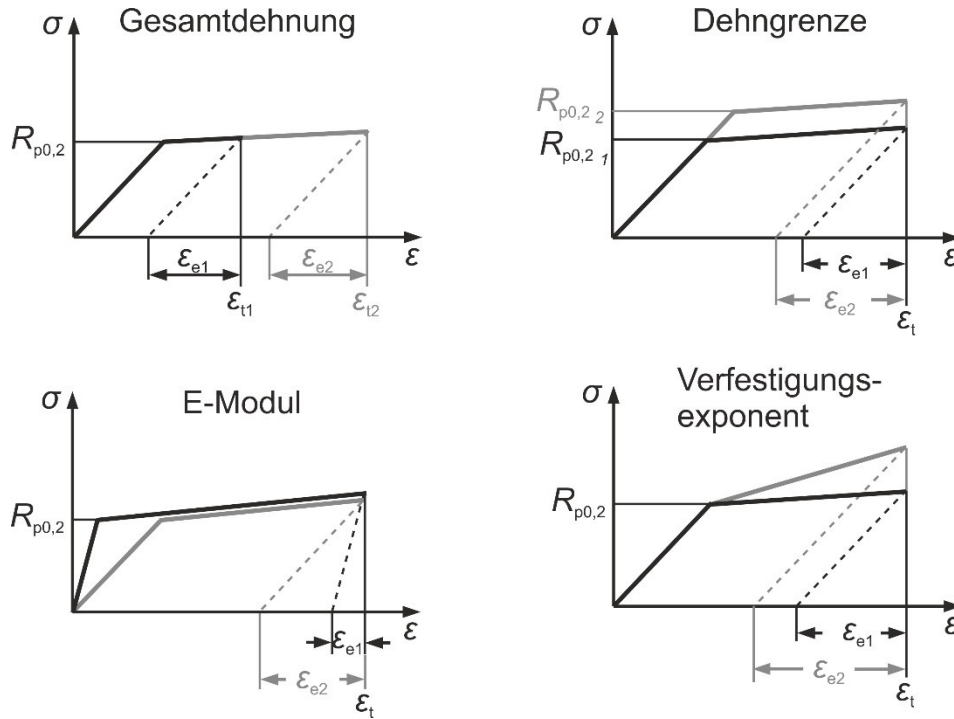


Bild 2.4: Einfluss von unterschiedlichen Werkstoffparametern auf die elastische Rückfederung (Kahl, 1982)

Eine besondere Herausforderung stellt dabei das Biegen von nicht rotationssymmetrischen Profilen dar. Bei diesen Profilen stimmen in der Regel die Lage des Schubmittelpunktes und der Schwerpunkt des Querschnitts nicht überein, was dazu führt, dass diese Querschnitte selbst nach einer ebenen Biegung eine dreidimensionale Rückfederung erfahren. Diese lässt sich durch das Überbiegen allein nicht kompensieren. Auch deswegen hat die korrekte Voraussage oder Kompensation der Rückfederung immer noch einen erheblichen Anteil an der aktuellen Forschung. So sind z. B. mehrere unterschiedliche analytische Modelle und Ansätze zur Bestimmung und Kompensation der Rückfederung von verschiedenen Querschnitten und Werkstoffen beim Streckbiegen entstanden (Cheng-long und Xiao-qiang, 2011), (Zhao et al., 2013), (Liu et al., 2015), (Zhan et al., 2016), (Lv et al., 2023). Durch Erweiterung des jeweiligen Modells oder die Berücksichtigung weiterer Merkmale konnten die Modelle verbessert und deren Aussage für den jeweiligen Fall optimiert werden. Des Weiteren stellten Li et al. (2012), Zhu et al. (2013), Shiqiang et al. (2016) und Zhan et al. (2016) eigene analytische Ansätze für das Biegen von Rohren und anderen Querschnitten vor. Dabei wurden oft vernachlässigte Phänomene wie die Verschiebung der neutralen Phase und die Wandstärkenänderung berücksichtigt, wodurch das Modell verbessert werden konnte. Das Kernziel der Arbeiten war eine korrekte Bestimmung der Rückfederung für eine genaue Auslegung des Prozesses.

Ghiotti et al. (2017) gingen dagegen einen anderen Weg und stellten ein Inline-Messkonzept für Hohlprofile zur Echtzeitbewertung der Rückfederung für das Drei-Rollen-Schubbiegen vor.

2.1.3 Beschreibung des Verfestigungsverhalten

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der analytischen Beschreibung des Werkstoffes ist das Verfestigungsverhalten des Werkstoffes. Dazu sind bereits unterschiedliche Ansätze entwickelt worden, die das Fließverhalten beschreiben. Darunter wird allgemein das Verfestigungsverhalten eines Werkstoffes, das abhängig von der bereits erfolgten Umformung ist, verstanden. Das Fließverhalten ist weiterhin auch noch von der Temperatur und der Umformgeschwindigkeit abhängig, diese sind bei den meisten Biegeverfahren in einem Bereich, wo diese Einflüsse vernachlässigt werden können. Ein einfaches und recht verbreitetes Modell ist das elastisch-linear verfestigende Modell (Ludwik, 1903). Dabei werden das elastische und das plastische Verhalten berücksichtigt. Beide Bereiche werden dabei durch eine Gerade mit unterschiedlicher Steigung approximiert. Weitere mögliche Modelle sind Potenzansätze nach Ludwik (1909) und Zener (1944):

$$k_f = A + B\varphi^n, \quad (2.15)$$

sowie nach Swift (1952):

$$k_f = C(\varphi_0 + \varphi)^n. \quad (2.16)$$

Dabei sind A , B und C jeweils werkstoffspezifische Größen und n der Verfestigungsexponent. Mit dem Ansatz nach Ludwik lassen sich vor allem niedriglegierte Stähle bis zur Gleichmaßdehnung gut abbilden, mit steigendem Umformgrad nimmt aber die Übereinstimmung zunehmend ab (Birkert et al., 2013). Der Ansatz von Swift baut zum Teil auf dem von Ludwik auf. Mit φ_0 kann die Kurve dabei auf der Abszisse verschoben und angepasst werden. Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle zu erwähnen, dass weitere Ansätze in der Literatur zu finden sind, die z. B. auf einem Exponentialansatz beruhen (z. B. Hockett und Sherby, 1975) oder eine Kombination aus den beiden Ansätzen bilden (z. B. Birkert et al., 2013).

Beim Biegen von Profilen befindet man sich häufig bei einem Umformgrad von etwa 0,2 bis 0,3, daher ist für eine möglichst genaue analytische Berechnung der Übergangsbereich vom elastischen in den plastischen Bereich von großer Bedeutung. Durch die Wahl eines passenderen Ansatzes und die Anpassung der werkstoffspezifischen Größen lässt sich die Genauigkeit der analytischen Berechnung verbessern (Fechler, 2012). Daher sollte die Wahl der Ansatzfunktion je nach Werkstoff und Umformgrad neu bewertet werden (Chatti, 1998). Dies konnte auch in dieser Arbeit beobachtet werden.

2.1.4 Biegen von Profilen

Nach Finkenstein und Kleiner (1995) lassen sich Profile in vier grundsätzliche Querschnittsformen unterteilen: offene, geschlossene und volle Querschnittsformen sowie Sonderprofile.

Weiterhin lassen sich diese in symmetrische und unsymmetrische Querschnittsformen unterteilen. Auch werden Profile nach deren Fertigungsverfahren unterschieden, da sich je nach Verfahren unterschiedliche mechanische Eigenschaften ergeben (Chatti, 1998). So werden Drähte (voller, kreisrunder Querschnitt) durch Drahtziehen (Schuler, 1996) hergestellt. Ausgehend von einer Standardgröße werden die Drähte, je nach gewünschtem Durchmesser, durch mehrere Ziehsteine gezogen, bis der gewünschte Durchmesser erreicht ist.

Bei Rohren (geschlossener, hohler, rotationssymmetrischer Querschnitt) wird nochmals zwischen geschweißten und nahtlosen Rohren unterschieden (Becker, 2014). Die Herstellung geschweißter Rohre erfolgt meistens, indem ein Blechstreifen durch ein Walzgerüst in mehreren Schritten zu einem Rohr umgeformt wird (Horlacher, 2016). Die beiden Enden werden dann durch Schweißen miteinander gefügt. Der Vorteil ist eine konstante Wandstärke und eine preisgünstige Herstellung. Dabei spielt die Lage der Schweißnaht beim Biegen eine wichtige Rolle und sollte nach Möglichkeit in der neutralen Phase liegen.

Die Herstellung nahtloser Rohre erfolgt meist nach dem sogenannten Mannesmann-Verfahren (Kyriakides und Corona, 2007). Dabei wird eine Stange durch schrägstehende Walzen in Rotation versetzt, sodass sie in der Mitte aufreißt. Anschließend wird sie über einen Dorn geschoben. Dies erfolgt meist bei höheren Temperaturen. Im Anschluss wird sie z. B. durch das Pilgerschrittverfahren auf Fertigmaß gewalzt. Nahtlose Rohre haben fertigungsbedingt eine ungleichmäßigere Wandstärke als geschweißte Rohre und werden bevorzugt für Hochdruck und Sicherheitskritische Anwendungen bevorzugt. Es muss auch nicht auf die Lage der Schweißnaht beim Biegen geachtet werden.

Profile werden je nach Querschnitt und Länge z. B. durch Walzen, Gesenkbiegen (Kanten) oder Strangpressen hergestellt (Oehler, 1963). Geschlossene Profile werden, ähnlich wie geschweißte Rohre, am Ende durch Schweißen gefügt. Der Querschnitt spielt für die Wahl des passenden Biegeverfahrens eine wichtige Rolle, da Verfahren wie Rotationszugbiegen, Rundbiegen Freiformbiegen mit bewegter Matrizie auf das Umformen von kreisrunden Profilen ausgerichtet sind.

Aufgrund der unterschiedlicher Querschnittsformen ist eine Anpassung der in Kapitel 2.1.1 dargestellten Analytik an den gegebenen Querschnittsverlauf notwendig. Diese gehen in der Grundform von einem rechteckigen Querschnitt aus, was für viele Profile nicht zutrifft. Nadai (1927), Geleji (1967) und Engel et al. (2008) stellen Beispiele für die Anpassung an verschiedene Querschnitte dar. Dies betrifft vorwiegend den Spannungsverlauf entlang der Profilhöhe und die Verschiebung der neutralen Phase bei unsymmetrischen Querschnitten.

Der Einsatz von gebogenen Bauteilen findet in nahezu allen Branchen statt (He et al., 2011), (Chatti, 2006), (Lafou, 2016) und unterscheidet sich je nach Anwendung deutlich. So können es Bauteile mit einer Länge von mehreren Metern sein, wie z. B. für den Bau, über wenige Meter wie z. B. Karosserie von Fahrzeugen aller Art (Automobile/Nutzfahrzeuge), bis hin zu wenigen Zentimetern wie z. B. Fluid- und Druckleitungen, die ebenfalls in sämtlichen Fahrzeugen zu finden sind (**Bild 2.5**).

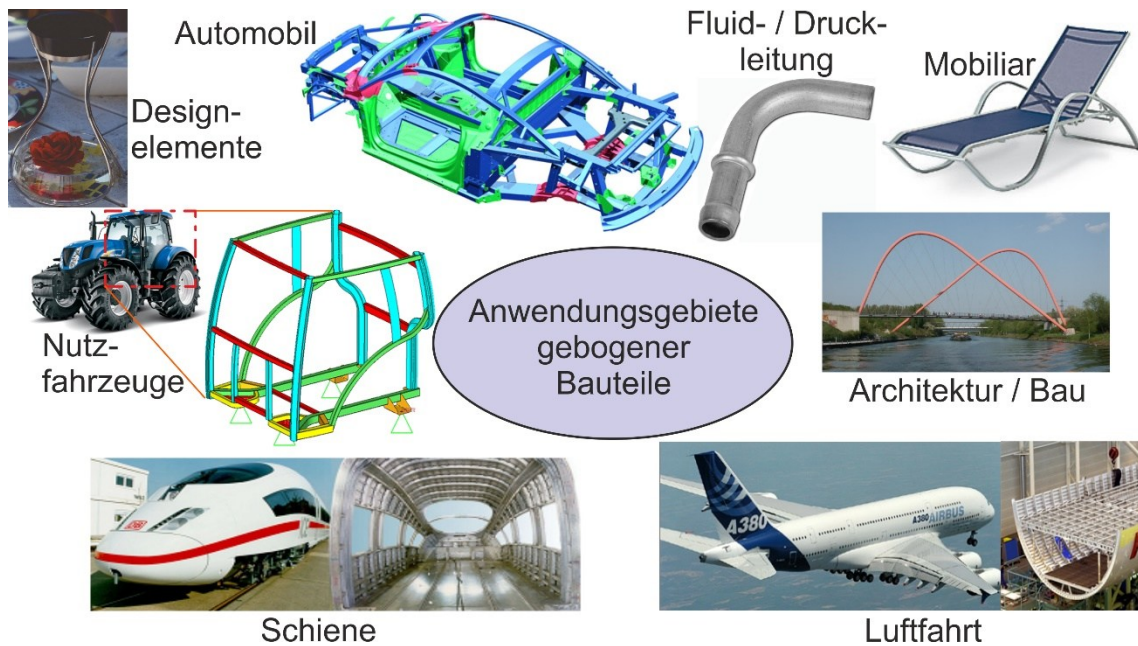


Bild 2.5: Anwendungsgebiete beim Profilbiegen nach Hoffmann et al. (2012)

Durch die unterschiedlichen Anforderungen der Industrie und die verschiedenen Einflussfaktoren ist eine Vielzahl an Biegeverfahren entstanden. So zählt z. B. die VDI 3430 (2014) bereits 27 Biegeverfahren auf. Diese große Auswahl kann dazu führen, dass der Anwender von gebogenen Profilen vor einem Entscheidungsproblem steht. Um hier den Überblick nicht zu verlieren und das passende Verfahren für die konkrete Anwendung zu finden wurde von Kuhnen et al. (2013) eine Matrix entwickelt, die auf Basis der Biegegeometrie und des Halbzeugquerschnitts eine Empfehlung für das wirksamste und wirtschaftlichste Biegeverfahren vorschlägt.

Einen weiteren Schritt in eine ähnliche Richtung gingen Holstein und Hermes (2018), indem sie einen Normvorschlag für Biegebauteile vorstellten. Der Hintergrund ist, dass gebogene Bauteile nicht immer, wie z. B. zerspante Bauteile, nach der DIN ISO 2768 (1991) bemaßt und abgenommen werden können, auch sind die Toleranzen branchenspezifisch recht weit auseinander. Daher erfordern Biegebauteile in der Regel eine fertigungs- und einsetzgerechtere Bemaßung, die in dem Normvorschlag widerspiegelt wird (**Tabelle 2.1**). Dabei werden Bauteile in vier Biegequalitätsklassen (BQ) eingeteilt, die an die Anforderung der unterschiedlichen Branchen angelehnt sind. Auch die VDI 3431 (2016) stellt einen guten Überblick zu den auftretenden Abweichungen inklusive einer klaren Definition dar.

Tabelle 2.1: Vorschlag für eine Einteilung der Biegequalitäten in BQ-Klassen (Holstein und Hermes, 2017)

		Qualitätsklasse					
		Qualitätsmerkmal	BQ1	BQ2	BQ3	BQ4	
Biegekontur	1	Konturabweichung [mm] bei einer Biegegrundfläche	< 0,1 [m ²]	0,3	0,75	1,5	2
			0,1 - 1,5 [m ²]	0,4	1	3	7
			1,5 - 5 [m ²]	0,6	1,5	7	10
			> 5 [m ²]	1	2	10	15
Querschnitt	2	Querschnittsdeformation	< 1 %	< 2 %	< 5 %	nicht relevant	
	3	Wanddickenänderung Innenbogen	< 5 %	< 10 %	< 15 %	nicht relevant	
	4	Wanddickenänderung Außenbogen	< 5 %	< 10 %	< 15 %	nicht relevant	
Oberfläche	5	Schäden an Oberfläche / Beschichtung	nicht zulässig	nur optisch	$R_t < 0,1$; keine Funktionale beeinträchtigung	keine Funktionale beeinträchtigung	
	6	Risse	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig	nicht zulässig	
	7	Falten	$h_{BQ} < 0,015$	$h_{BQ} < 0,03$	keine Funktionale beeinträchtigung	nicht relevant	

2.1.5 Finite-Elemente-Methode in der Profilbiegetechnik

Die Finite-Elemente-Methode hat sich in der Profilbiegetechnik etabliert. Überall wo analytische Ansätze an ihre Grenzen stoßen, wird die FEM als Hilfsmittel eingesetzt. Die wichtigsten Ziele bei der Simulation von Biegeprozessen ist die korrekte Vorhersage von Biegefehlern wie z. B. Faltenbildung, Wandstärkeänderung, Querschnittsänderung, Querschnittsdeformation sowie eine genaue Vorhersage zur Kompensation der Rückfederung (He et al., 2012). Dazu sind bereits Fortschritte gemacht worden. So stellten He et al. (2009) und Heng und He (2011) jeweils ein FE-Modell und eine Strategie für das Rotationszugbiegen vor, um die Faltenbildung vorauszusagen.

Heng et al. (2006) untersuchten die Umformeigenschaften beim Biegen dünnwandiger Rohre mit kleinem Biegeradius und zeigten die Vorteile der „stepped balls retraction“ Strategie auf. Dabei wird der gesamte Biegeprozess in mehrere kleine Schritte (Biegewinkel von 5°) zerlegt, bei denen jeweils der Dornrückzug eingesetzt wird.

Durch die Verwendung eines angepassten expliziten FE-Modells konnte Heng et al. (2007) den Einfluss des Biegedorns und seiner Gestaltung für das Biegen von dünnwandigen Rohren darstellen. Es konnte gezeigt werden wie sich durch Variation des Dornradius, der Dornlänge und die Anzahl der Dornglieder die biaxialen Druckspannungen ändern und damit das Biegeergebnis beeinflusst wird. Li et al. (2010) konnten mit Hilfe der FEM den Einfluss der Schubkraft auf die Faltenbildung und der Querschnittsdeformation beim Rotationszugbiegen von dünnwandigen Rohren aufzeigen. Heng et al. (2013) zeigten unter anderem, dass die Bedeutung der Wandstärke mit steigendem Durchmesser stärker wächst als die des Durchmessers und diese für eine genaue Abschätzung nicht einfach nur mit dem Durchmesser skaliert werden kann.

Durch den Einsatz der Finite-Elemente-Methode und speziell angepassten Modelle konnte die Anzahl tatsächlicher Biegeversuche reduziert werden und durch die Auswertung der FEM-Ergebnisse an relevanten Stellen, an denen eine Anbringung von Sensoren nicht möglich ist,

konnte ein tieferes Prozessverständnis generiert werden, dass zu einer deutlichen Weiterentwicklung beiträgt.

Auch in der intelligenten Fertigung kann die FEM in Form eines virtuellen Gegenstücks (digitaler Zwilling) eingesetzt werden, um z. B. Prozessschwankungen vorherzusagen (Hinchy et al., 2020) oder Algorithmen (auch Künstliche Intelligenz) zu trainieren.

2.2 Profilbiegeverfahren

In der Biegetechnik sind vor allem zwei große Schwerpunkte zu beobachten. Das eine ist die Flexibilität in der Fertigung (Chatti, 2006) und das andere die Biegequalität, die meistens mit möglichst engen Biegeradien und dünnen Wandstärken (Burkhard, 2008) einher geht. Dabei sind die Bestrebungen klar Kategorien zuzuordnen. So setzt man auf der einen Seite bei der flexiblen Fertigung verstärkt auf Verfahren mit kinematischer Erzeugung der Biegekontur, da hier mit einem Werkzeugsatz unterschiedliche Geometrien und Biegeradien herstellbar sind. Auf der anderen Seite ermöglichen Verfahren mit formgebender Konturgebung durch die deutlich bessere Stützung des Halbzeugs in der Biegezone ein qualitativ höherwertigeres Ergebnis, vor allem bei dünner werdenden Wandstärken und engeren Biegeradien. Nachfolgend soll der aktuelle Stand relevanter Biegeverfahren in Bezug auf ihre Geometrierzeugung dargestellt werden.

2.2.1 Biegeverfahren mit formgebundener Biegekontur

Zu formgebundenen Biegeverfahren zählen Verfahren, bei denen die Biegegeometrierzeugung durch das Anlehnen des Halbzeugs an eine Biegeform oder Ähnliches hergestellt wird. Dadurch erfordern diese Verfahren für jeden Biegeradius bzw. jede Biegegeometrie eine neue Werkzeugform. Diese können z. B. bei Verfahren wie Rotationszugbiegen übereinander angeordnet werden, um das Biegen von Geometrien mit unterschiedlichen Biegeradien zu ermöglichen, dies erfordert aber eine deutlich aufwändigere und teurere Maschine. Durch die gute Abstützung der Biegekontur in der Umformzone während des Biegeprozesses sind damit Biegeradien von kleiner als $1 \times D$ herstellbar. Dadurch sind diese Biegeverfahren nicht so flexibel wie kinematische, da Chargenschwankungen oder Werkstoffwechsel teilweise neue Werkzeuge oder das Nacharbeiten der aktuellen Werkzeuge erfordern können. Des Weiteren ist ein klarer Zusammenhang zwischen Kinematik und Ergebnis vorhanden. Ein guter Überblick der formgebundenen Verfahren ist in der VDI 3430 (2014) zu finden (**Bild 2.6**). Nachfolgend soll auf die gängigsten Verfahren näher eingegangen werden.

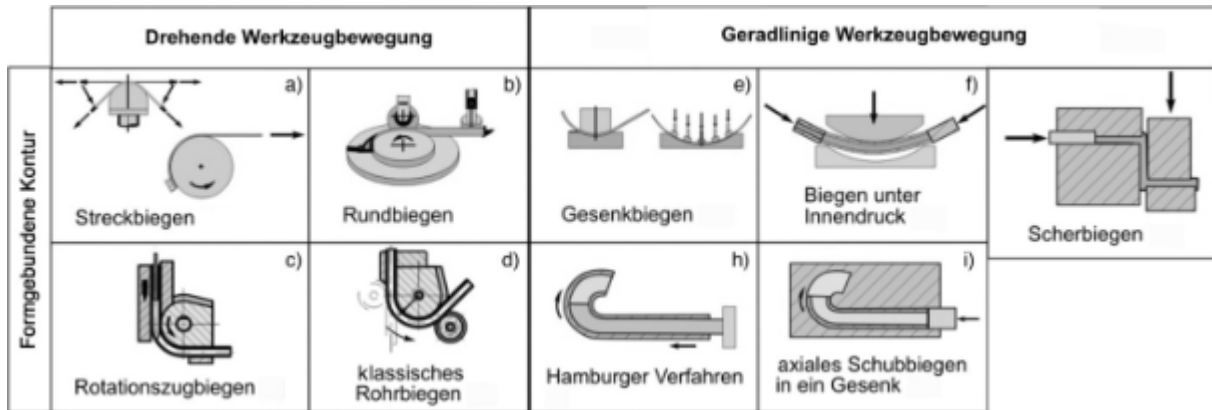


Bild 2.6: Biegeverfahren mit formgebundener Biegekantur (VDI 3430, 2014)

Rotationszugbiegen

Ein weit verbreitetes Biegeverfahren ist das Rotationszugbiegen (Becker, 2014). Es ermöglicht eine sehr gute Biegequalität auch bei engen Biegeradien und dünnen Wandstärken. Dabei wird der Querschnitt des Werkstücks beim Biegen in der Umformzone durch den Biegedorn, den es in unterschiedlichsten Ausführungen gibt, gestützt. In Kombination mit dem Faltenglätter werden so Faltenbildung und Querschnittsänderungen unterdrückt (**Bild 2.7**).

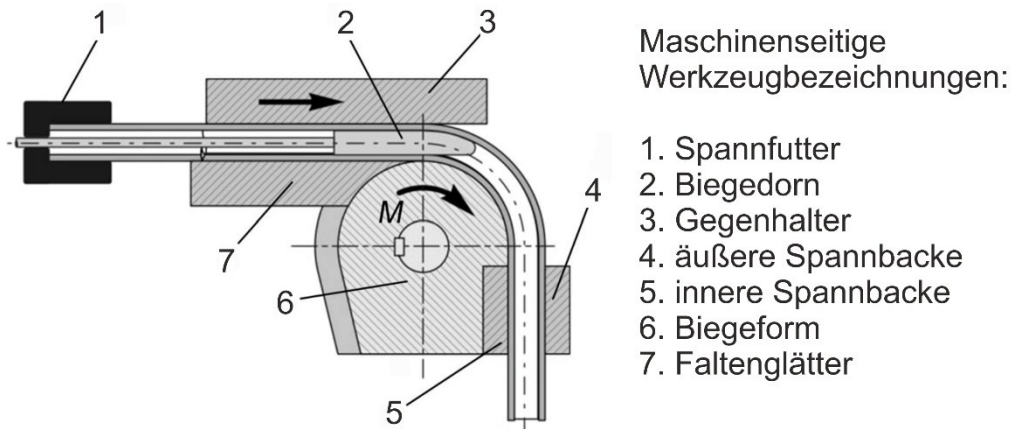


Bild 2.7: Prinzip des Rotationszugbiegens (VDI 3430, 2014)

Eine Besonderheit dieses Verfahrens ist, dass es auf der gleichen Maschine umgesetzt werden kann wie das Drei-Rollen-Schubbiegen. Durch den Einsatz von Mehrebenen-CNC-Biegemaschinen kann dann das benötigte Werkzeug situationsbedingt ohne Umrüstung hin und her gewechselt werden. Dadurch kann je nach Geometrieabschnitt das passendere Verfahren eingesetzt werden.

Aus den genannten Gründen wird auch stark am Verfahren geforscht, sodass z. B. die Bedeutung und der Einfluss einzelner Elemente analysiert und immer bessere Modelle entwickelt werden. So untersuchten Heng et al. (2007) die Rolle des Dorns im NC-Biegeprozess und zeigten unter anderem, dass mit einem größeren Dorn die neutrale Phase nach außen wandert und

auch die Fähigkeit zur Faltenvermeidung steigt. Xue et al. (2014) stellten ein numerisches Modell für die Analyse des Rückfederungsverhaltens von asymmetrischen dünnwandigen Rohren beim Rotationsziehbiegen mit Dorn vor.

Neben den klassischen Analysen wurden auch neue Ansätze und Konzepte zur Prozessüberwachung entwickelt (Simonetto et al., 2017 und Borchmann et al., 2020). Dabei wurde zum Teil auf zusätzliche Sensoren und zum Teil auf die in der Maschine vorhandene Sensorik zurückgegriffen, um eine Bewertung des Biegeergebnisses durchführen zu können. Dadurch sind diese Ansätze gut für den industriellen Einsatz umsetzbar. Beide Untersuchungen haben gezeigt, dass der Dorn das empfindlichste Element zur Erkennung von Falten ist.

Das Rotationszugbiegen gehört zu den wenigen Profilbiegeverfahren, das sich in eine Prozessfolge integrieren lässt. So stellten Hermes et al. (2019) ein Konzept vor, bei dem das Grundverfahren um eine Profilereinheit erweitert wird, um so z. B. dünnwandige gebogene Profile ausgehend vom Coil direkt in einem Durchgang herzustellen. Dabei wurde das Blech in einer Aufspannung gewalzt, gebogen und auf Endmaß zugeschnitten (**Bild 2.8**). Ein wesentlicher Aspekt dabei war die Spannungsüberlagerung. Auch konnten Hermes und Holstein (2021) zeigen, dass das Verfahren dazu verwendet werden kann, doppelwandige Profile mithilfe eines plastischen Wirkmediums umzuformen.

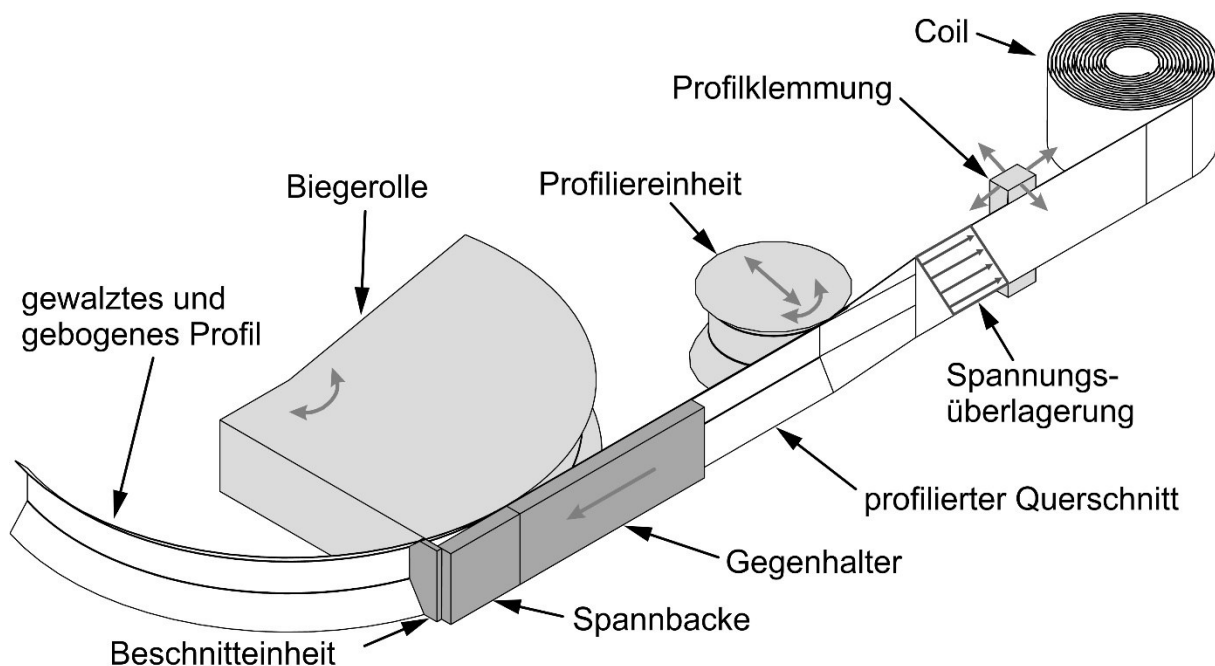


Bild 2.8: Prinzip Rotationszugbiegen mit Walzprofilier- und Biegeeinrichtung (Hermes und Holstein, 2021)

Klassisches Rohrbiegen

Das klassische Rohrbiegen ist ein Verfahren, das dem Rotationszugbiegen/Drei-Rollen-Schubbiegen sehr ähnlich ist. Bei diesem Verfahren bewegt sich während des Biegeprozesses das Rohr in Achsrichtung nicht mit, sondern wird durch das Spannfutter positioniert und während des Umformprozesses auf Position gehalten. Dabei kreist die Biegerolle um die Biegeform und

biegt dadurch das freie Profilende um die Biegeform (**Bild 2.9**). Durch diese Art des Umformprozesses wandert die Biegezone mit der Rolle mit, daher wird hierbei in der Regel kein Biegedorn verwendet.

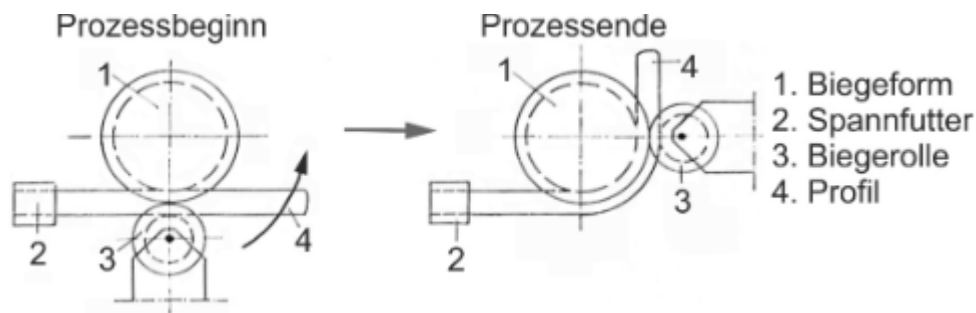


Bild 2.9: Rundbiegen Verfahrensprinzip nach Kursetz (1970)

Während die meisten aufgezählte Verfahren überwiegend für Rohre und Profile eingesetzt werden und auch sehr stark in der Forschung vertreten sind, wird das klassische Rohrbiegen in der wissenschaftlichen Literatur kaum betrachtet (Elsing, 2014).

Das Verfahren wird vermehrt für das Biegen von dünneren Drähten eingesetzt. So zeigte Bhundiya und Cordero (2023), wie mit Hilfe dieses Verfahrens Drahtgitterstrukturen hergestellt werden können. Dazu wurde ein Bahnplanungssystem entwickelt, das mit Hilfe von Eulerschen Bahnen die Grundgeometrie in mehrere einzelnen Bahnabschnitte zerlegt und im Anschluss zu einer Gesamtstruktur zusammensetzt. Diese Strukturen werden zum Teil in der Raumfahrt eingesetzt, wo sie z. B. als Leichtbau-Stützstrukturen im „In-Space Manufacturing“ von Reflektoren zum Einsatz kommen (Zhang, 2024).

Das klassische Rohrbiegen hat Ähnlichkeit zum Drei-Rollen-Schubbiegen, daher werden in der praktischen Umsetzung gelegentlich beide Verfahren werkzeugtechnisch miteinander kombiniert, z. B. durch den Einsatz unterschiedlicher Biegeköpfe, um so die Herstellung verschiedener Biegeradien und auch 3D-Geometrien zu ermöglichen (Christofilis und Grapsas, 2010).

Streckbiegen

Das Streckbiegen ist ein Verfahren, das vor allen für das Biegen von hochfesten Aluminiumprofilen in der Automobilindustrie häufig eingesetzt wird (Hoffman et al., 2012). Mit einer Festigkeit von bis zu 700 N/mm ist Aluminium gut für den Karosseriebau in der Automobilindustrie geeignet (Schmidt-Offhaus, 1993), (Wehner, 1997), (Sprenger, 1998). Das Besondere an dem Verfahren ist, dass das Profil vor dem Biegeprozess mit einer Zugkraft entlang der Längsachse überlagert wird und anschließend erst der Biegeprozess erfolgt (**Bild 2.10**). Die Überlagerung wird während des Biegens weiterhin aufrechterhalten und wird erst nach dem der Biegeprozess abgeschlossen ist vollständig abgebaut. Dies sorgt dafür, dass der Werkstoff bereits vor dem Biegen in den plastischen Bereich gebracht wird. Dadurch federt das Bauteil nahezu vollständig in Achsrichtung zurück und kaum bis gar nicht in der Biegeebene.

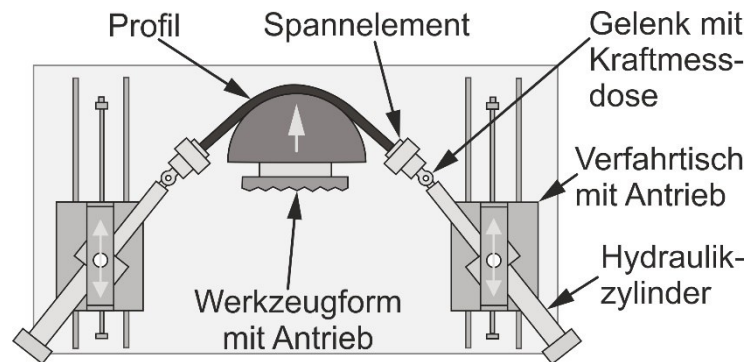


Bild 2.10: Verfahrensvariante Tangentialstreckbiegen nach Geiger und Sprenger (1998)

Durch die Spannungsüberlagerung wandert die neutrale Faser während des Biegens Richtung Innenbogen, wodurch die Druckspannungen im Innenbogen reduziert werden. Dadurch können eine geringere Querschnittsdeformation (Neugebauer, 2007) und eine deutlich geringere Rückfederung erreicht werden (Weippert, 1997), (Sprenger, 1998).

Wie bereits aus dem Ablauf ersichtlich wird, erfordert das Verfahren eine genaue Prozessführung und dadurch auch eine aufwendige Maschine mit mehreren aktiven Achsen. Durch die hohen Ansprüche der Automobilindustrie entstehen hohe Qualitätsanforderungen an die Bauteile. Daher wird kontinuierlich an der Weiterentwicklung des Verfahrens gearbeitet. So entwickelte z. B. Sprenger (1998) eine Adaptierung für den 2D-Profilbiegeprozess, um die Prozessparameter an die unterschiedlichen Herstellungsladungen im Prozess anpassen zu können. So konnte er durch eine individuelle Anpassung der axialen Zugspannung Verbesserung des Rückfederungsverhältnisses erreichen. Welo et al. (2020) untersuchten den Prozess für das Biegen von 3D-Bauteilen und zeigten, dass durch die Erhöhung der Anzahl der Achsen in Kombination mit einem verbesserten Werkzeugkonzept, das teilespezifische Einsätze verwendet, die Herstellung verschiedener geometrischer Konfigurationen mit geringeren Werkzeuginvestitionen ermöglicht werden kann. Darüber hinaus konnte durch den Einsatz von multifunktionalen Sensoren im Maschinen- und Werkzeugsystem, die in Echtzeit- und In-Prozess-Kontrolle des Umformprozesses ermöglicht, eine weitere Steigerung der Biegequalität erreicht werden. Des Weiteren zeigten Ma et al. (2023), dass durch einen angepassten Prozessverlauf die Qualität der Biegebauteile verbessert werden kann.

Durch einen modifizierten Prozess lassen sich durch Streckbiegen auch schwer umformbare Profile umformen. So zeigten Deng et al. (2014), dass es möglich ist, damit gebogene Profile aus einer Titanlegierung für die Luft- und Raumfahrtindustrie herzustellen. Normalerweise sind Titanlegierungen bei Raumtemperatur nur schwer umformbar. Daher erfolgt der Umformprozess bei höheren Temperaturen und dem sogenannten Warmstreckbiege- und Kriechformverfahren ($T = 500\text{-}700^\circ\text{C}$, Dehnungsrate von $0,0025$ bis $0,01\text{ s}^{-1}$). Dies ermöglichte außerdem eine bessere Umformbarkeit und geringere Rückfederung beim Umformen der Profile.

Abschließend ist zu erwähnen, dass noch eine weitere Variation des Verfahrens existiert, das sogenannte Abrollstreckbiegen. Dabei wird das Profil auf einer Seite auf einer Rolle fixiert und auf der anderen Seite mit einer Zugspannung in Achsrichtung überlagert. Während des nachfolgenden Biegeprozesses wird das Profil auf der Rolle aufgewickelt.

2.2.2 Biegeverfahren mit kinematischer Definition der Biegekontur

Verfahren mit kinematischer Definition der Biegekontur zählen zu den flexibelsten ihrer Art. Hierbei entsteht die Biegegeometrie durch das Verstellen einer Biegeeinheit meist im Zusammenhang mit einer Vorschubbewegung des Profils. Eine Sonderrolle nehmen thermisch induzierte Verfahren ein. Dadurch sind nicht nur unterschiedliche Biegeradien mit nur einem einzigen Werkzeugsatz möglich, es sind sogar komplexe Geometrieverläufe mit diesen Verfahren herstellbar. Ein guter Überblick dieser Verfahren ist in der VDI 3430 (2014) zu finden (**Bild 2.11**).

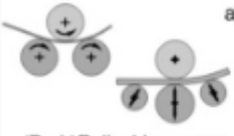



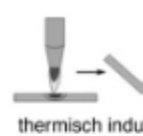













		Drehende Werkzeugbewegung		Geradlinige Werkzeugbewegung	Thermisch induzierte Verfahren					
Kinematische Definition der Biegekontur		a) (Drei-)Rollenbiegen		b) Schweißen, partielles Auswalzen		i) Walzprofilieren mit überlagerter Biegung		j) 3-Punkt-Biegen		q) thermisch induziertes Flammbiegen
		c) (Drei-)Rollen-Schubbiegen		d) Biegen mit überlagertem Längswalzen		j) querkräftfreies Biegen		m) Freiformbiegen mit beweglicher Matrize		r) Laserstrahlbiegen
		e) Mehrrollenbiegen mit Torsionsüberlagerung		f) inkrementelles Rohrumformen		k) endengesteuertes Biegen		n) Biegen in Kombination mit Durchdrücken [19]		
		g) Biegen mit geregelterm Moment		h) Biegen mit induktiver Erwärmung		o) Biegen mit Aufweiten		p) Profilbiegen in einer elastischen Matrize		

Bild 2.11: Biegeverfahren mit kinematischer Definition der Biegekontur (VDI 3430, 2014)

Durch die Art der Geometrieerzeugung entfällt die großflächige Abstützung des Profils in der Umformzone durch die Biegeform, dadurch steigt der Mindestbiegeradius auf meist $>5 \times$ Profildurchmesser. Auch dünne Wandstärken wie bei formgebundenen Verfahren sind damit nicht mehr möglich. Erschwerend kommt hinzu, dass es oft keinen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Position der Biegerolle bzw. Biegeeinheit und der tatsächlichen Geometrie gibt. Vor allem komplexe Verläufe sind hier eine Herausforderung, da diese Trial-and-Error-Versuche erfordern. Hier sind in den letzten Jahren Fortschritte erzielt worden, sodass Modelle entstanden sind, die eine kinematische Planung auf Basis der Sollgeometrie ermöglichen. Nachfolgend soll auf diese Verfahren näher eingegangen werden.

Drei-Rollen-Schubbiegen

Das Drei-Rollen-Schubbiegen zählt zu den Verfahren mit kinematischer Geometrierzeugung und kann in der Regel auf der gleichen Fertigungsmaschine eingesetzt werden wie das Rotationszugbiegen. Dabei wird die Biegegeometrie durch die Vorschubbewegung der C-Achse und der Verstellung der Anstellrolle erzeugt. In **Bild 2.12** ist grafisch der Prozessablauf des Verfahrens dargestellt, inklusive eines typischen Bewegungsfelds der Anstellrolle. Durch die zusätzliche Rotation der C-Achse sind damit auch 3D-Geometrieverläufe möglich. Der Einsatz von Biegedornen, wie beim Rotationszugbiegen (**Bild 2.7**), ist ebenfalls möglich.

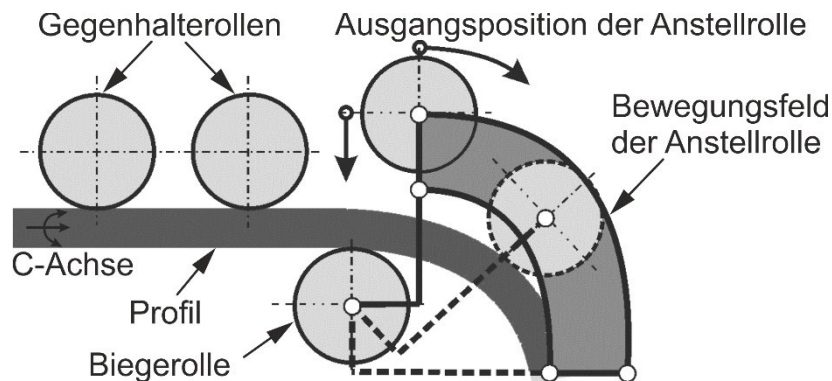


Bild 2.12: Verfahrensprinzip des Drei-Rollen-Schubbiegens (Vipavc, 2018)

Durch die punktuelle Abstützung des Profils entstehen auch einige Nachteile, so sind enge Biegegraden und dünne Wandstärken nicht möglich und müssen für das Verfahren deutlich größer gewählt werden. Des Weiteren ist eine Rückführung der Biegegeometrie auf die konkrete Position der Anstellrolle nicht ohne weiteres möglich. Daher sind bereits Berechnungsmodelle entwickelt worden, wie z. B. Gerlach (2010) und Groth et al. (2019), mit denen auf Basis der Sollgeometrie die Position der Anstellrollen berechnet werden kann und so viele Trial-and-Error-Versuche vermieden werden können. Dagegen entwickelte Vipavc (2018) eine numerische Methode für die (zeit-)effiziente und genaue Ermittlung der Biegekemmlinien, bei der sogar die Störgröße „Maschinennachgiebigkeit“ eine besonders wichtige Rolle spielt. Die Maschinennachgiebigkeit wird dabei in Form eines analytischen Ansatzes in das Modell integriert und kann so an beliebige Biegemaschinen angepasst werden.

Auch die Einflussgrößen des Verfahrens wurden untersucht, so konnte Vatter und Plettke (2013) und Vatter (2015) zeigen, dass für die Ausbildung der Krümmung drei Wirkmechanismen verantwortlich sind. Diese sind die tatsächliche Rollenposition nach der Rückfederung des Biegewerkzeugs, der Verlauf des Halbzeugs zwischen den Werkzeugrollen sowie die Rückfederung des Halbzeugs bei Entlastung. Dadurch konnte eine Verbesserung der Prozessrobustheit durch beispielsweise steuerungstechnische Ansätze erreicht werden.

Neben der Planung sind auch Konzepte zur Prozessüberwachung entwickelt worden. So erarbeiteten Simonetto et al. (2017) einen Ansatz für die Echtzeit-Identifizierung von Falten im Prozess, der auf der Erfassung von Vibrationen und Winkelgeschwindigkeiten mit Hilfe eines innovativen intelligenten Dorns basiert. Speziell entwickelte Algorithmen ermöglichen die Zeit- und Frequenzanalyse der Signale in Echtzeit, wodurch genaue Informationen über das

Auftreten von Defekten wie z. B. Falten und deren Position entlang des Rohrs gewonnen und zur aktiven Nachsteuerung der Achsen genutzt werden konnten.

Inkrementelles Rohrumformen

Eine Plastifizierung der Umformzone kann nicht nur durch Spannungsüberlagerung erzeugt, sondern auch durch einen überlagerten Prozess erreicht werden. Durch eine sinnvolle Kombination der Verfahren Drückwalzen und einem Biegeprozess ist das sogenannte inkrementelle Rohrumformen entstanden (Hermes und Kurze, 2008). Das Verfahrensprinzip des Prozesses ist in **Bild 2.13** dargestellt.

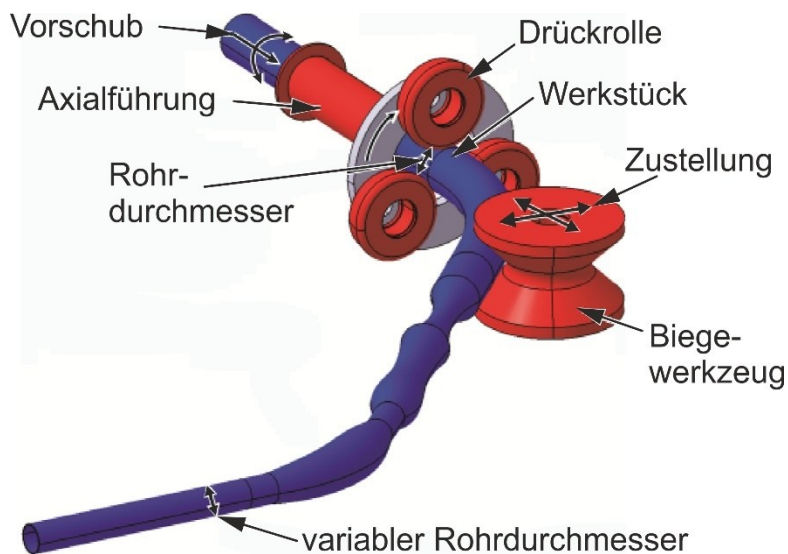


Bild 2.13: Verfahrensprinzip des inkrementellen Rohrumformens (Hermes et al., 2011)

Bei diesem Verfahren wird durch die Drückrollen der Querschnitt des Rohres abschnittsweise auf den gewünschten Durchmesser gebracht und gleichzeitig durch das Biegewerkzeug umgeformt. Damit ist es möglich, gebogene Rohre mit Querschnittsverläufen entlang der Mittelachse herzustellen, was bei den meisten Biegeverfahren nicht durchführbar ist. Durch das Drückwalzen wird das Rohr in den plastischen Bereich gebracht, ähnlich wie beim Streckbiegen, wodurch sich das notwendige Biegemoment sowie die Rückfederung stark verringern. Durch eine Erhöhung der Prozessgeschwindigkeit kann dieser Effekt gesteigert werden (Becker et al., 2014). Durch einen analytischen Ansatz (Becker et al., 2013) ist es möglich, die Rauheit des Rohres nach dem Drückwalzen abzuschätzen sowie das für das Biegen benötigte Biegemoment (Nazari et al., 2019) zu berechnen.

Freiformbiegen mit bewegter Matrize

Das Freiformbiegen mit bewegter Matrize nach Murata und Aoki (1996) ist ein Verfahren, das hauptsächlich für das Umformen von Rohren eingesetzt wird (**Bild 2.14**). Dabei wird das Rohr von einer Vorschubeinheit durch die Biegeeinheit geschoben, die sich frei bewegen und verdrehen kann. Durch eine definierte Anstellung der Biegeeinheit in Kombination mit der Lage

des Schiebers entsteht so die Biegegeometrie. Das Verfahren ist besonders für Rohre mit komplexen Geometrieverläufen geeignet. Der Einsatz von Biegedornen ist ebenfalls möglich.

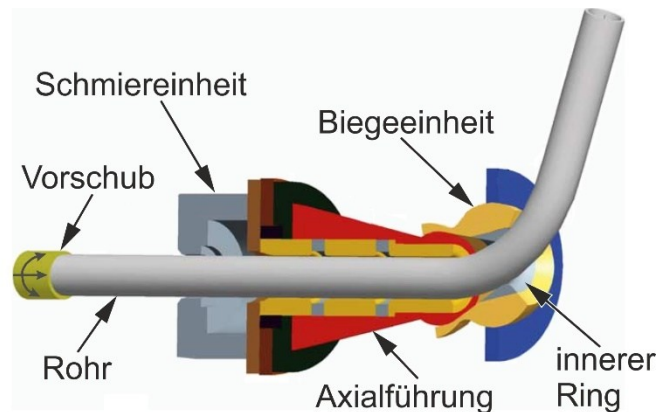


Bild 2.14: Verfahrensprinzip des Freiformbiegens mit bewegter Matrize nach Gantner et al. (2005)

Ähnlich wie beim Drei-Rollen-Schubbiegen ist der Zusammenhang zwischen der Lage der Matrize und der daraus resultierenden Geometrie sehr komplex. Daher sind unabhängige Ansätze und Modelle entstanden, um diese zu bestimmen (Guo et al., 2018), (Wu und Zhang, 2021), (Beulich, 2022). Eine wichtige Rolle bei diesem Verfahren spielt auch die Ausgestaltung des Innenrings. So konnten Chen et al. (2021) einen Zusammenhang zwischen der Biegequalität und der Gestaltung des inneren Rings zeigen.

Mehrrollenbiegen mit Torsionsüberlagerung

Ein recht ähnliches Verfahren ist das sogenannte Mehrrollenbiegen mit Torsionsüberlagerung, nach Hermes und Kleiner (2008) (**Bild 2.15**). Es unterscheidet sich im Wesentlichen durch das Antriebskonzept. Das innovative Antriebskonzept (Verwendung von Vorschubrollen und einer schwenkbaren Vorschubeinheit) ermöglicht das Umformen nicht kreisförmiger Querschnitte (Hermes et al., 2008), (Chatti et al., 2010). Weiterhin ist es möglich, zwischen der Vorschubeinheit und der Biegeeinheit eine induktive Erwärmungseinrichtung zu integrieren, um so z. B. hochfeste Stahlwerkstoffe (Hermes, 2011) oder andere Legierungen, die sich bei Raumtemperatur nur schwer bearbeiten lassen, umzuformen. Es sind bereits ein erweitertes analytisches Modell, um die Geometrie solcher Biegebauteile zu beschreiben (Staupendahl und Tekkaya, 2017), und ein Prozessmodell, um eine Übersetzung der Geometriedaten in Maschinenparameter zu ermöglichen (Hermes, 2011), (Staupendahl, 2021), entwickelt worden.

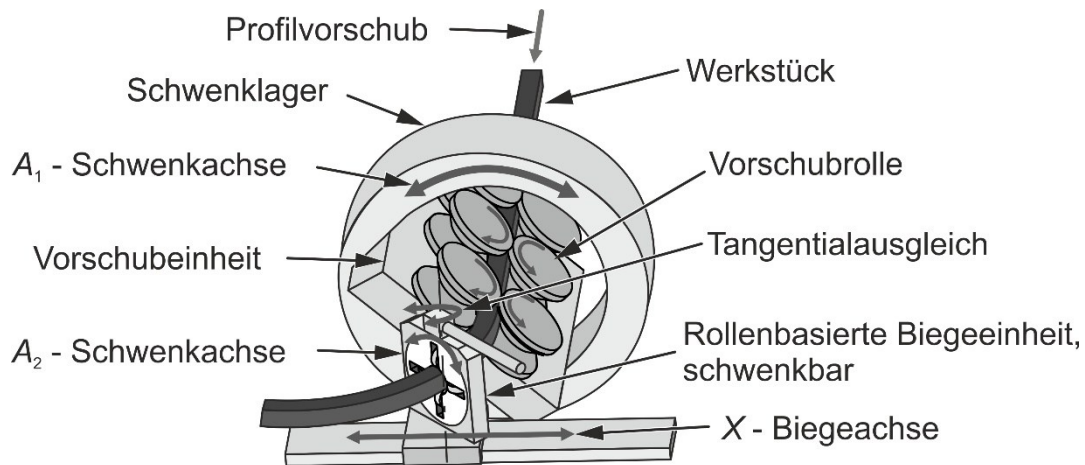


Bild 2.15: Verfahrensprinzip des Mehrrollenbiegens mit Torsionsüberlagerung nach Hermes (2011)

2.2.3 Zusammenfassung Biegeverfahren

Mit der Zeit sind viele verschiedene Verfahren entstanden, die für unterschiedliche Biegeaufgaben das bessere Biegeergebnis oder die bessere Wirtschaftlichkeit bietet. Unter den Formgebundenen Verfahren ist dabei das Rotationszugbiegen für Rohre das Streckbiegen für Profile und das Rundbiegen für Drähte zu erwähnen. Das Rotationszugbiegen zeichnet sich durch die hohe Präzision und Biegequalität insbesondere bei engen Biegeradien und dünnen Wandstärken aus, da das Halbzeug während des Biegens optimal gestützt wird. Das Streckbiegen sorgt durch die Überlagerung mit Zugkräften während des Biegeprozesses für eine Minimierung der Rückfederung und eine Reduktion von Querschnittsdeformationen und ist für das Biegen von komplexen Profilquerschnitten hervorzuheben. Das klassische Rohrbiegen, ist ein weiteres formgebundenes Verfahren, das insbesondere für dünne Drähte eingesetzt wird. Auch wenn es in der Forschung selten zu finden ist, so sind in der Industrie viele Maschinen vorhanden die das Biegeverfahren einsetzen.

Kinematische Verfahren hingegen bieten eine deutlich höhere Flexibilität, da sie nur mit einem Werkzeugsatz mehrere Geometrien erzeugen können. Besonders hervorzuheben ist hier das inkrementelle Rohrumformen, das Drückwalzen mit Biegen kombiniert und so die Herstellung von Rohren mit variierendem Querschnitt ermöglicht. Durch die Plastifizierung der Umformzone kann die Rückfederung und das notwendige Biegemoment reduziert werden. Weiterhin ist das Freiformbiegen mit bewegter Matrize für das Biegen von Rohren und das Mehrrollenbiegen mit Torsionsüberlagerung für das Biegen von Profilen zu erwähnen. Beide Verfahren ermöglichen es, komplexen Geometrieverläufen herzustellen.

Formgebundene Verfahren bieten eine herausragende Präzision und Qualität, insbesondere bei Anwendungen mit hohen Anforderungen an die Biegegeometrie, sie sind jedoch kostenintensiver und weniger flexibel. Kinematische Verfahren hingegen ermöglichen größere Vielseitigkeit und eignen sich besonders für Prototypen oder Kleinserien, bei denen unterschiedliche Geometrien gefragt sind. Die Wahl des geeigneten Verfahrens hängt somit stark von den spezifischen Anforderungen an Geometrie, Material und Stückzahl ab.

2.3 Darstellung des Patents für das Inkrementelle Biegen im Gesenk

Das inkrementelle Biegen im Gesenk wurde 2014 unter dem Namen „Verfahren und Vorrichtung zur inkrementellen Herstellung von gebogenen Drähten, Rohren, Profilen oder dgl. aus stangenförmigen metallischen Materialien“ von der technischen Universität Dortmund international zum Patent angemeldet (Staupendahl et al., 2014). Der Grundaufbau des Verfahrens ist in **Bild 2.16** dargestellt.

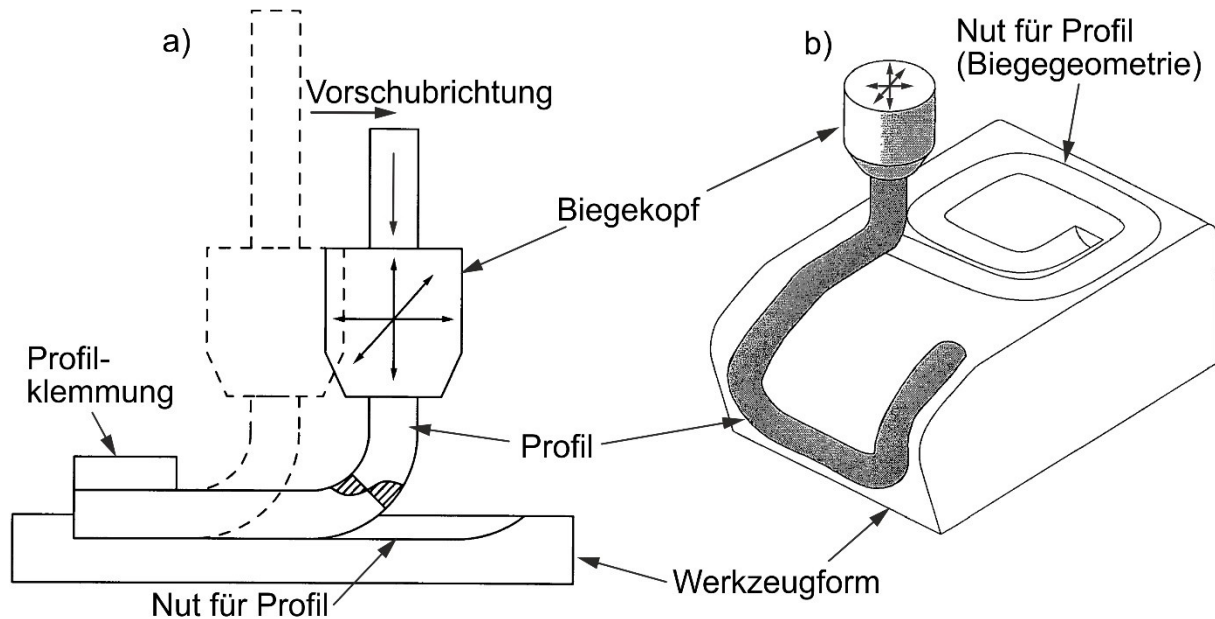


Bild 2.16: Grundaufbau des Inkrementellen Biegens im Gesenk (Staupendahl et al., 2014):
a) Vorschubbewegung 2D-Seitenansicht, b) Vorschubbewegung 3D-Isoansicht

Beim Inkrementellen Biegen im Gesenk wird, anders als bei den meisten herkömmlichen Biegeverfahren, die Biegegeometrie durch das Abfahren der Biegekontur mit einem Biegekopf erzeugt. Dabei wird das Profil in der Werkzeugform abgelegt. Das Profil wird dabei senkrecht zur Werkzeugebene von oben zugeführt. Durch diese Art der Zuführung kann das Grundprofil quasi endlos sein und muss nur zwischen den einzelnen Bauteilen getrennt werden. Um ein Mitziehen des Profils beim Start zu vermeiden, kann es durch eine Profilklemmung fixiert werden. Die erzeugte Geometrie entsteht durch das Ablegen des Profils in eine vorgefräste Nut in der Werkzeugform. Das Bauteil kann sowohl eine 2D- als auch eine 3D-Geometrie besitzen. Die Vorschubbewegung kann entweder durch den Biegekopf, die Werkzeugform oder eine Kombination aus beiden erzeugt werden.

Neben dem beschriebenen Aufbau gibt es Variationen des Verfahrens, die im Patent erwähnt werden. So ist es z. B. denkbar, den Biegekopf durch eine zusätzliche Profilvorschubeinheit zu ergänzen (**Bild 2.17a**). Dadurch wird das Profil nicht mehr nur durch den Vorschub des Biegekopfes gezogen, sondern kann aktiv gefördert werden. Dadurch ist z. B. das gezielte Aufbringen von Spannungsüberlagerungen möglich, was einen erheblichen Einfluss auf den Prozessablauf und das Ergebnis haben kann.

Durch das Ergänzen um eine Erwärmungseinheit vor der Umformung kann das Profil vorgewärmt werden, um das Umformverhalten des Drahtes zu beeinflussen. Durch eine mitfahrende

Kühleinheit kann das Profil nach der Umformung wieder abgekühlt werden. Das Abheben des Profils aus der Form soll durch das Anbringen von Niederhaltern verhindert werden (**Bild 2.17b**).

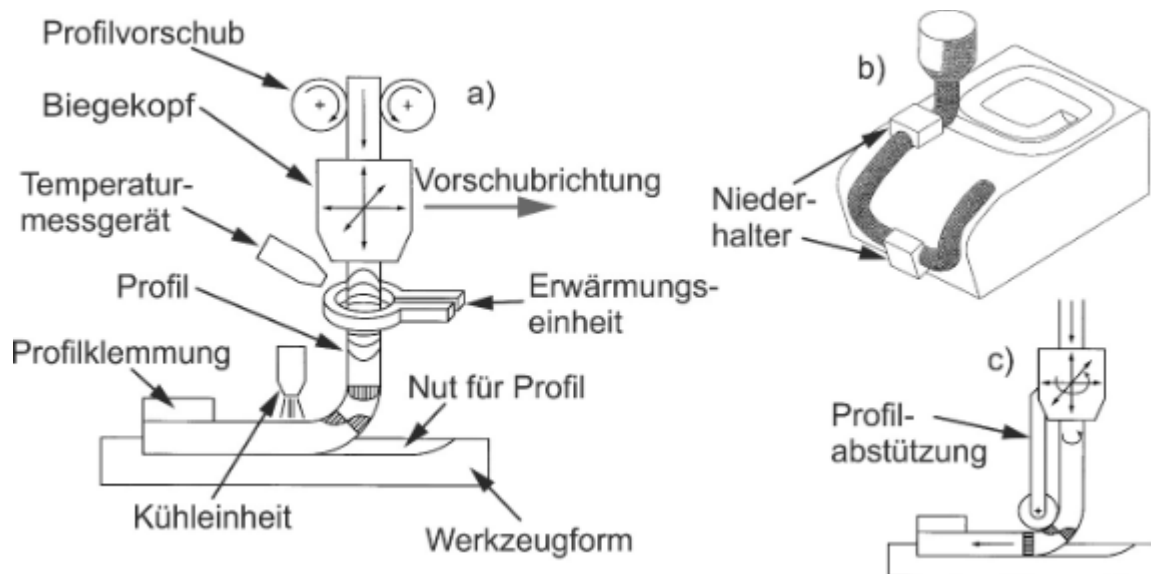


Bild 2.17: Variationen des Inkrementellen Biegens im Gesenk (Staupendahl et al., 2014):

- a) mögliche Ergänzungen, b) zusätzliche Niederhalter, c) zusätzliche Profilabstützung

Eine weitere Variation des Verfahrens ist die Verwendung von segmentiellen Stützstellen (**Bild 2.18c**). Dazu kann eine flache Werkzeugform verwendet werden, auf der nur an den relevanten Stellen Stützelemente angebracht werden, um die das Profil beim Abfahren der Geometrie drumherum gebogen wird. Auf geraden Abschnitten kann darauf in der Regel verzichtet werden. Dadurch kann der Grundaufbau für mehrere Geometrien verwendet werden, da je nach Bauteil nur die Stützstellen versetzt und die Bahn angepasst werden müssen. Dies senkt auf Dauer die Werkzeugkosten.

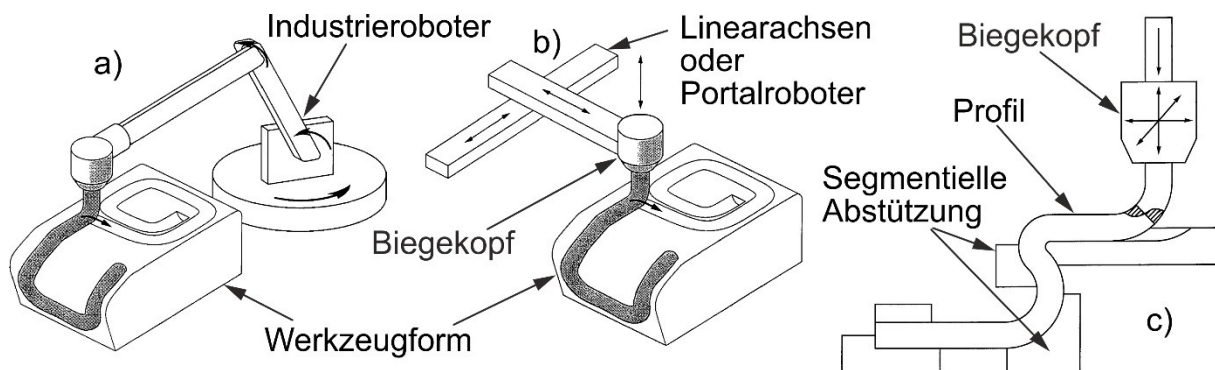


Bild 2.18: Antriebsarten und Abstützung (Staupendahl et al., 2014): a) Industrieroboter, b) Linearachsen, c) segmentielle Stützstellen

Das Verfahren braucht nicht immer eine speziell dafür entwickelte Maschine. Solange die Biegekräfte nicht zu hoch sind, was bei kleineren Querschnitten und/oder weicherem Werkstoff der Fall ist, ist es möglich, z. B. eine CNC-Fräsmaschine zu verwenden, die eine hohe Positio-

niergenauigkeit mitbringt. Des Weiteren ist es denkbar, den Biegekopf an einem Industrieroboter anzubringen, der anschließend die Biegekontur abfährt (**Bild 2.18a**). Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Portalrobotern oder Linearantrieben wie z. B. Lineartisch (**Bild 2.18b**). Dabei ermöglicht das letztgenannte höhere Vorschubkräfte und eine höhere Positioniergenauigkeit.

Ein Vorteil des Verfahrens ist die hohe Geometrievielfalt der herstellbaren Geometrien und der einfache und kostengünstige Aufbau. Besonders hervorzuheben sind dabei schleifenähnliche Geometrien oder solche, die sich selbst wieder berühren oder sich sehr nahekommen. Diese komplexen Geometrien können hergestellt werden, weil sich der Biegekopf entlang der Biegegeometrie frei bewegen kann und sich damit nicht selbst im Weg steht. Gerade dieser Aspekt ermöglicht eine Überkreuzung der Geometrien, und dass sogar im Bogenbereich. Durch den simplen Aufbau des Werkzeugs kann das Verfahren auch für kleinere Stückzahlen effizient und wirtschaftlich eingesetzt werden.

Als Einschränkung gilt hier die Kollision zwischen Biegekopf und Werkzeug/Stützstelle. Dies muss bei der Bahnplanung berücksichtigt und angepasst werden.

3 Ziel der Arbeit

Das Inkrementelle Biegen im Gesenk ist ein Biegeverfahren mit einer neuartigen Kinematik bei der Biegekonturerzeugung. Die Flexibilität und die Vorteile entstehen vorwiegend aus dem frei beweglichen Biegekopf und der flexiblen Gestaltung der Werkzeugform. Damit sind Geometrien herstellbar, die mit anderen Verfahren gar nicht oder nur sehr aufwendig produziert werden können. Ein Beispiel dafür sind Geometrien, die sich sehr nahe kommen oder sich überkreuzen. Ziel dieser Arbeit ist es eine Grundlage für das neuartige Verfahren zu erarbeiten und die Mechanismen zu untersuchen (**Bild 3.1**). Dadurch soll eine Basis für das Prozessverständnis und die Prozessgestaltung geschaffen werden. Dies erfolgt anhand von Experimenten, FEM-Simulationen und analytischen Beschreibungen.



Bild 3.1: Zielsetzung der Dissertation

Zuerst soll anhand eines vereinfachten Versuchsaufbaus der grundlegende Prozessablauf erläutert werden. Dabei sollen die wesentlichen und notwendigen Prozessparameter und Kennwerte eingeführt und beschrieben werden, die für das Prozessverständnis erforderlich sind. Gleichzeitig sollen der verwendete Versuchsaufbau und das FE-Modell dargestellt und beschrieben werden.

Anschließend sollen die grundlegenden Mechanismen des Verfahrens anhand von Experimenten und FE-Untersuchungen erörtert und dargelegt werden. Es sollen analytische Ansätze erarbeitet werden, anhand deren wichtige Prozessparameter beschrieben und ausgelegt werden können. Diese sollen sowohl anhand von Experimenten als auch numerischen Versuchen validiert werden.

Ein wichtiger Punkt bei der Gestaltung des Prozesses sind die Berechnung und Auslegung der Kinematik. Dies ist nicht nur notwendig für eine erfolgreiche Herstellung eines Bauteils, sondern hat auch einen erheblichen Einfluss auf die Bauteilqualität. Daher soll in einem weiteren Schritt die Gestaltung der Kinematik analysiert und beschrieben werden. Dabei soll der Prozess, aufgrund dessen Komplexität, aufbauend von 1D- über 2D- bis zur Erzeugung von 3D-Geometrien beschrieben werden.

Das Inkrementelle Biegen im Gesenk ist in erster Linie für kreisrunde Profile entwickelt worden und bietet hier die größte Flexibilität. So ist auch die Herstellung von Bauteilen mit nicht kreisrunden Querschnitten möglich. Daher soll auf die Unterschiede bei der Umformung von Bauteilen mit verschiedenen Querschnitten eingegangen werden.

Auch sollen die Prozessgrenzen des Inkrementelle Biegen im Gesenk untersucht und dargestellt werden. Es sollen Strategien erarbeitet werden, wie diese möglichst zu vermeiden oder zu umgehen sind.

Abschließend soll ein Ausblick für das Verfahren gegeben werden und eine Möglichkeit aufgezeigt, wie es sich in der industriellen Praxis einsetzen ließe.

4 Prozessablauf und Versuchsaufbau

Das Inkrementelle Biegen im Gesenk unterscheidet sich durch einen frei beweglichen Biegekopf und eine neuartige Kinematik deutlich von den bekannten Biegeverfahren. Um eine Basis für das Verständnis der Grundlagen zu schaffen, soll im Vorfeld auf folgende Punkte eingegangen werden:

- Ablauf des neuartigen Prozesses,
- grundlegende Gestaltung der Kinematik und der Werkzeugelemente,
- Einordnung des Verfahrens nach VDI 3430 (2014),
- Darstellung des verwendeten Versuchsaufbaus,
- Darstellung des verwendeten FE-Modells,
- Erläuterung verwendeter Begriffe.

Dabei sollen Elemente angesprochen und Begriffe eingeführt werden, um die Eigenheiten des Prozesses verstehen zu können, allerdings soll erst im späteren Verlauf näher auf diese eingegangen werden. Auch spezielle Sonderlösungen sollen ebenfalls später dargestellt werden.

4.1 Prozessablauf

Das Inkrementelle Biegen im Gesenk unterscheidet sich deutlich von den aktuell bekannten Biegeverfahren. Beim Inkrementellen Biegen im Gesenk bewegt sich der Biegekopf entlang einer vorher definierten Bahn und legt dabei das Profil in der Werkzeugform ab. Für dieses Beispiel wurde ein Aluminiumdraht (Al 99,5) mit einem Durchmesser von 5 mm und eine 3D-Geometrie verwendet (**Bild 4.1**). Die Sollgeometrie wurde mit Hilfe eines Schafffräasers in eine Werkzeugform in Form einer Nut eingebracht. Für den Versuch wurde ein einfacher Biegekopf verwendet (**Bild 4.1c**). Der Biegekopf hat einen umlaufenden Innenradius von 7,5 mm und wird in dem Spannzangenfutter einer CNC-Fräsmaschine eingespannt, mit der auch die Nut gefertigt wurde. Um ein Mitziehen des Drahtes zu verhindern, wurde dieser mit einer Klemmschraube in der Startposition fixiert.

Der Ablauf des Prozesses ist wie folgt:

- Das Werkstück wird auf Länge zugeschnitten, mit Öl benetzt und in den Biegekopf eingeführt. Dabei bleiben etwa 20 mm unten überstehen, um ihn im Werkzeug klemmen zu können.
- Die Maschine fährt auf Startposition, sodass der überstehende Draht in die Werkzeugform eintaucht. Anschließend wird der Draht über die Klemmschraube fixiert.
- Nun fährt die Maschine mit dem Biegekopf dicht über der Werkzeugform die programmierte Bahn ab, die sich stellenweise von der Mittelachse der Sollgeometrie unterscheidet. Dabei wird der Draht in der Werkzeugform abgelegt (**Bild 4.1**).
- Anschließend fährt die Maschine an die Entnahmeposition, die Schraube wird gelöst und das fertig gebogene Bauteil kann entnommen werden.

Ab hier kann der Prozess mit einem neuen Halbzeug von vorne beginnen.

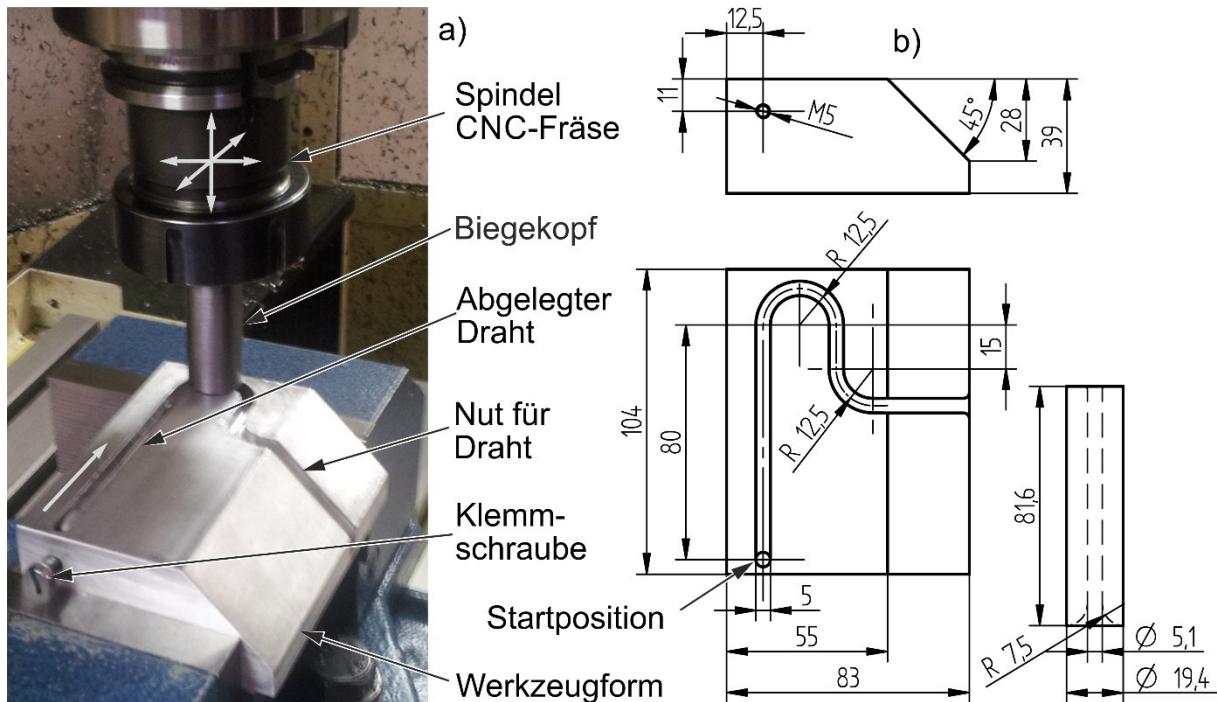


Bild 4.1: Aufbau Vorversuche: a) experimenteller Aufbau, b) Werkzeugabmaße

Der beschriebene Ablauf stellt den grundlegenden Ablauf dar. Bei komplexen Geometrien kann dieser etwas abweichen. Nachfolgend sollen spezifische Aspekte und Parameter dargestellt werden, die beim Ablauf des Umformprozesses zu beachten sind. Auf den genauen Zusammenhang und die Mechanismen wird in einem späteren Kapitel detaillierter eingegangen.

4.1.1 Gestaltung der Kinematik

Die Gestaltung der Kinematik ist ein zentraler Punkt des Inkrementelle Biegen im Gesenk. Durch den Radius am Biegekopf kommt es zu einem Versatz zwischen der Mittelachse der Profilverführungseinheit (Biegekopf) und der Einlegezone des Drahtes (**Bild 4.2**). Dieser wird in dieser Arbeit als Versatz (X_v) bezeichnet, der je nach Biegekopfmaßen und Profildurchmesser um einen festen Wert hinter der Mittelachse des Biegekopfs liegt. Da die Bahngeometrie für die Mittelachse des Biegekopfes programmiert wird, muss dieser Versatz bei der Planung der Bahn immer mitberücksichtigt werden. Dazu wird die Mittelachse der Sollgeometrie als Basis genutzt. Diese wird zuerst in feste Abschnitte und Punkte zerlegt. Anschließend werden die Elemente um den Versatz (X_v) tangential in Fahrtrichtung verschoben und unter Umständen durch Verbindungselemente aufgefüllt (**Bild 4.3**).

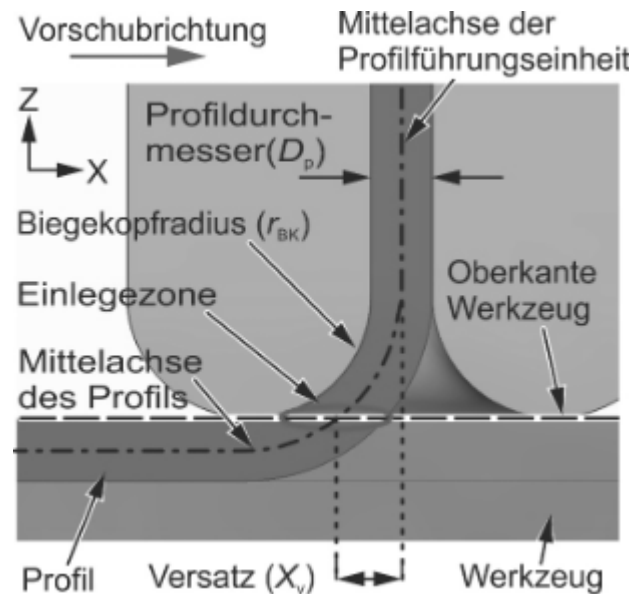


Bild 4.2: Versatz zwischen Umformzone und Mittelachse

Auf geraden Abschnitten ist der Versatz nicht erkennbar. Ersichtlich wird dieser erst bei einem Richtungswechsel oder in einer Kreisbahn, wie in **Bild 4.3** dargestellt. Wird dieser nicht berücksichtigt, kann das Profil an den betroffenen Stellen nicht korrekt in die Nut abgelegt werden, sondern kann über die Innenkante der Werkzeugform geschabt werden. Dies kann zu einer starken Deformation des Drahtes und einer möglichen Beschädigung der Werkzeugform führen (**Bild 4.3**). Der Unterschied zwischen der Mittelachse der Sollgeometrie und der programmierten Bahn des Werkzeugs ist ebenfalls in **Bild 4.3** dargestellt. Die rote Linie zeigt dabei den Fahrweg der Maschine (Bahn Mittelachse Biegekopf) und die blaue die Mittelachse der Sollgeometrie. Dies betrifft auch 3D-Geometrien, sodass diese in allen drei Richtungen kompensiert werden müssen, dies wird später noch detaillierter erläutert.

Der vertikale Abstand zwischen Werkzeugform und Biegekopf sollte möglichst klein gehalten werden, aber so groß, dass der Kontakt zwischen Biegekopf und Werkzeugform ausgeschlossen werden kann. In den dargestellten Versuchen lag dieser bei ca. 0,1 mm. Dies ist besonders im Bogenbereich wichtig, da hier der Draht durch die Rückfederung und die Verdrillung im Bogenbereich sich über die Nut winden kann. Dieses Verhalten nimmt mit zunehmender Werkstofffestigkeit zu, da diese aufgrund ihrer höheren Festigkeit eine größere Rückfederung vorweist.



Bild 4.3: Experimentelle Ergebnisse vor und nach Bahnanpassung und Optimierung

4.1.2 Anpassung der Werkzeugform

Aufgrund der Anpassung der Kinematik ist auch eine Anpassung der Nut in der Werkzeugform erforderlich. So muss diese im Bogenbereich in Fahrtrichtung nach außen vergrößert werden (**Bild 4.4**), grau markierter Bereich. Die gestrichelte Linie zeigt dabei die Originalkante mit einer konstanten Breite entlang der Mittelachse der Sollgeometrie. Der grau markierte Bereich deutet die erforderliche Anpassung der Nut an. Die Vergrößerung der Nut im Bogenbereich ist vor allem bei größeren Biegeköpfen notwendig, da der Versatz mit dem Biegekopfradius (r_{BK}) ansteigt. Als Anhaltspunkt für die Form und das Ausmaß dieser Nachbearbeitung kann die kompensierte Bahn des Biegekopfes verwendet werden (**Bild 4.3**), Bahn des Werkzeugs.

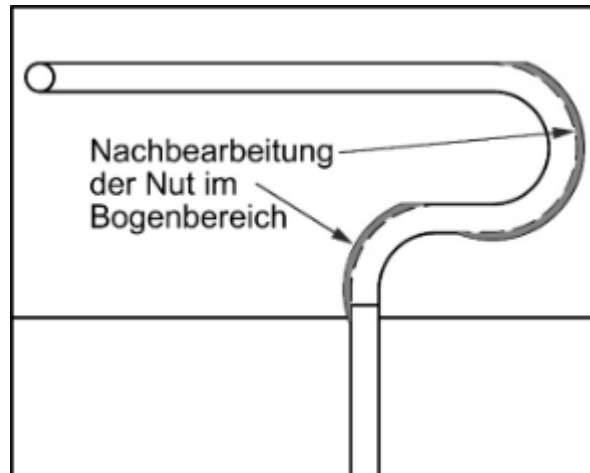


Bild 4.4: Anpassung der Nut in Kreisbogen

Unter der Berücksichtigung der genannten Punkte konnte in den Vorversuchen die in **Bild 4.3** dargestellte Geometrie erfolgreich hergestellt werden. Für die Versuche wurden ein Aluminiumdraht (Al 99,5, Durchmesser 5 mm) und ein Rohr aus 2.0872 (CuNi10Fe1Mn nach DIN EN 12449 (2019), Durchmesser 4,75 mm, Wandstärke 0,75 mm) verwendet. Die gebogenen Teile wurden vermessen und ausgewertet. Dabei konnte bereits in diesem frühen Stadium bei einer Querschnittsreduktion von 0,2 mm beim Draht und 0,25 mm beim Rohr eine Geometriegenauigkeit von 0,5 mm erreicht werden. Diese Versuche haben gezeigt, dass das Verfahren bereits in diesem Stadium ein hohes Potenzial besitzt und es sinnvoll ist, es eingehend zu untersuchen, vor allem weil es sich grundlegend von den anderen Biegeverfahren unterscheidet.

Der Biegekopfradius

Während des Ablegens in die Form erfährt das Profil eine doppelte Biegung. Der größte Einflussfaktor ist dabei der Radius am Biegekopf (**Bild 4.1**). Der für die Vorversuche gewählte Biegefaktor von 2 (Mittlerer – Radius – Biegebogen/Profildurchmesser) stellt ein recht kleines Verhältnis für das Verfahren dar. Ein noch kleinerer Wert ist nicht zu empfehlen, da sonst auch die Biegekräfte zunehmen und der Draht sich zu stark plastisch verformt, was sich durch deutliche Querschnittsreduktion und Deformationen vor allem im Bogenbereich äußert. Allerdings reduziert ein kleiner Biegeradius die Rückfederung und verbessert die Geometriegenauigkeit. Aus diesem Grunde ist für jede Geometrie ein Optimum zu bestimmen. Details dazu werden in Kapitel 5 erläutert.

4.2 Einordnung des Inkrementellen Biegens im Gesenk

Das Inkrementelle Biegen im Gesenk unterscheidet sich deutlich von den aktuell bekannten Verfahren. Es basiert auf einem Biegekopf, der sich entlang einer Werkzeugform bewegt und dabei das Halbzeug in der Werkzeugform ablegt. Die Geometrie entsteht in der Regel durch die Form der Nut oder die Form der Stützstelle. Daher ist das Inkrementelle Biegen im Gesenk den Verfahren mit „formgebundener Kontur“ zuzuordnen. Die Anpassungen der Bahn sind dabei eher als Prozessparameter zu sehen, um die Eigenschaften des Biegeergebnisses zu beeinflussen (z. B. Geometriegenauigkeit).

Des Weiteren erfolgt eine Einteilung nach der Art der Werkzeugbewegung. Hierbei ist weder eine drehende noch gradlinige Werkzeugbewegung passend. Daher wird an dieser Stelle eine neue Kategorie vorgeschlagen: „3D Werkzeugbewegung“ (**Bild 4.5j**). An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass es hierbei keine Rolle spielt ob sich der Biegekopf oder das Werkzeug bewegt oder eine Mischung aus den beiden.

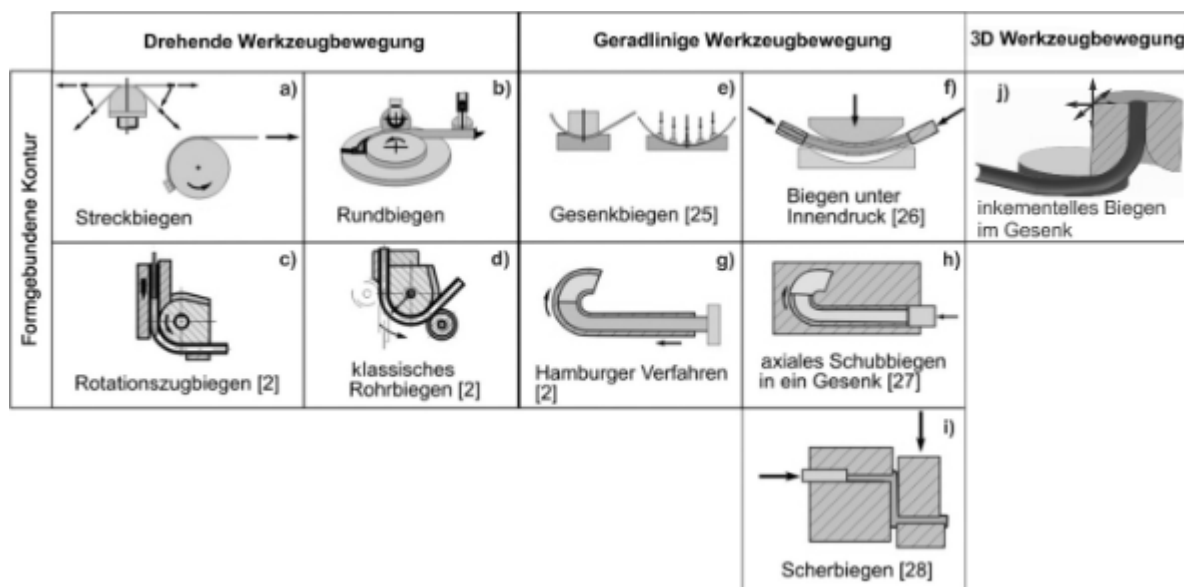


Bild 4.5: Einordnung des Inkrementelle Biegen im Gesenk

Abschnittsweise kann das Verfahren auch als “Verfahren mit kinematischer Definition der Biegekontur“ eingestuft werden. Ein gutes Beispiel dafür sind federartige Geometrien. Beim 3D-Formen um eine glatte und runde Stützstelle ohne Einkerbungen kann über die Anpassung der Kinematik die Steigung der Windungen vollkommen frei gestaltet werden. Dies wird jedoch als Sonderform gesehen, da der Durchmesser der Geometrie durch die Stützstelle bestimmt wird.

4.3 Versuchsaufbau und Variationen

Nachfolgend soll der für die weitere Arbeit verwendete Versuchsaufbau inklusive Variationen dargestellt werden. Für ein besseres Verständnis wird dieser in zwei Kernkomponenten aufgeteilt: Biegekopf und Profilführungseinheit sowie Werkzeugform.

4.3.1 Biegekopf und Profilführungseinheit

Die Profilführungseinheit ist das erste Element, welches das Profil durchläuft. Da diese für das Verständnis der Mechanismen keine große Rolle spielt, wird diese Einheit später der Übersicht halber verkürzt als Biegekopf dargestellt und bezeichnet. Der Vollständigkeit halber soll daher an dieser Stelle auf den Aufbau, die Funktionalität und die Variationen der verwendeten Komponenten eingegangen werden.

Bei den Führungseinheiten werden insgesamt zwei unterschiedliche Konzepte verwendet, eine mit einem Profilvorschub (**Bild 4.6a**) und eine ohne einen Profilvorschub (**Bild 4.6b**). Die Führungseinheit ist dafür da, das Profil in die Umformzone zu fördern oder die auf Länge gekürzten Abschnitte aufzunehmen. Am Auslauf des Biegekopfs erfolgt bereits die erste Umformung des Profils. Beide Vorrichtungen sind drehbar gelagert, so dass sie sich frei um die eigene Achse drehen können, und der Biegekopf kann je nach Anforderung getauscht werden.

Spindel

CNC-Fräsmaschine

Aluminiumdraht

Führungsrollen

Antriebsmotor

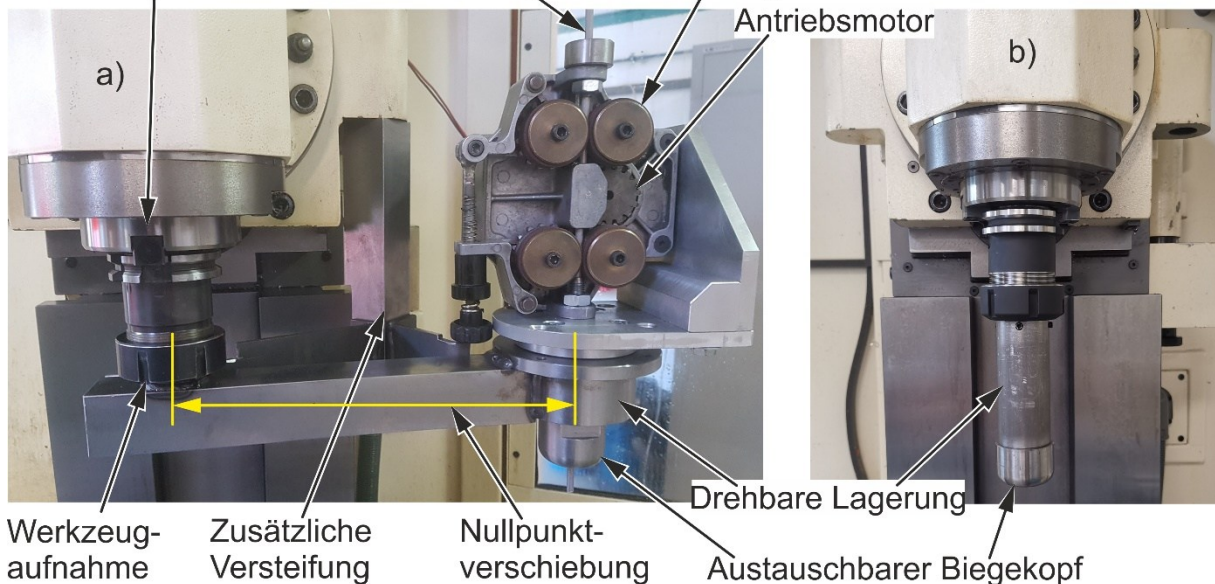


Bild 4.6: Unterschiedliche Variationen der Profilführungseinheiten: a) mit Profilvorschub, b) ohne Profilvorschub

Die Version ohne Vorschub wird in der Spindelaufnahme der CNC-Fräsmaschine eingesetzt. Für diese Führungseinheit muss das Profil auf Länge zugeschnitten und in die Führungseinheit eingesetzt werden. Die maximale Länge beträgt, je nach verwendetem Biegekopf, ca. 270 bis 290 mm. Der Vorteil dieser Ausführung ist, dass keine Nullpunktverschiebung der X- und Y-Achse zwischen Biegekopfachse und der Spindelachse erforderlich ist und damit auch kein

erneutes Antasten und kein zusätzlicher Umbau notwendig sind. Auch eine Synchronisation zwischen Profil- und Achsenvorschub ist nicht notwendig, da das Profil in der Werkzeugform fixiert und durch die Relativbewegung in der Werkzeugform abgelegt wird.

Als weitere Variation wurde eine angetriebene Führungseinheit angefertigt und eingesetzt. Diese ist mit der Werkzeugaufnahme der CNC-Fräsmaschine verbunden, hier läuft das Profil nicht zentrisch durch die Spindelachse der Maschine, sondern ist um einen konstanten Wert dazu versetzt (**Bild 4.6a**) (Nullpunktverschiebung). Dadurch ist die Verwendung eines quasi Endlosprofils möglich. Die Verschiebung der Mittelachse muss nicht ermittelt werden, da die Möglichkeit besteht, mit einem Kantentaster, der statt des Biegekopfs eingesetzt werden kann, die Position des Biegekopfes zu bestimmen, sodass keine Umrechnung notwendig ist. Eine zusätzliche Versteifung erhöht die Steifigkeit der Vorrichtung. Angetrieben wird der Vorschub durch einen modifizierten Schweißdrahtvorschub mit vier Führungsrollen und einem Antriebsmotor. Die Ansteuerung des Motors erfolgt über ein programmierbares Labornetzteil. Das Labornetzteil wird durch einen nicht im Bild dargestellten Rechner, auf dem ein LabVIEW-Programm läuft, angesteuert, der gleichzeitig auch zur Datenaufnahme verwendet wird. Der Vorschub kann auch dazu verwendet werden, um Zug-/Druckkräfte axial zum Profil zu überlagern, er kann aber auch komplett abgekoppelt werden.

Die Führungseinheiten ermöglichen es, unterschiedliche Biegeköpfe zu verwenden. Für diese Arbeit kamen Biegeköpfe verschiedener Ausführung und Abmessung zum Einsatz. Diese Variationen wurden je nach Anforderung miteinander kombiniert. Die untersuchten Parameter waren der Biegekopfradius, die Führungs- und die Reibungsart. In **Bild 4.7** sind einige Varianten der verwendeten Biegeköpfe dargestellt.

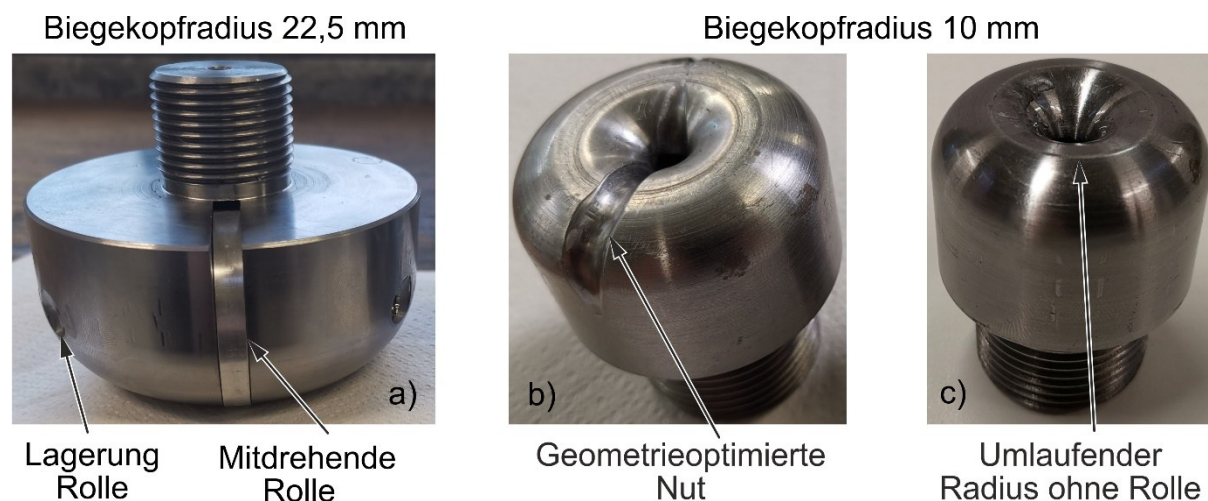


Bild 4.7: Unterschiedliche Durchmesser und Ausführungen des Biegekopfes: a) mitdrehende Rolle, b) geometrieoptimierte Nut, c) umlaufender Radius

Einen offensichtlichen Parameter stellt der Biegekopfradius dar. Durch diesen verändern sich die Abmaße des Biegekopfs. Während die Länge sich linear mit dem Radius verändert, wächst der Außendurchmesser um den Faktor vier. Der Einflüsse auf die Mechanismen werden im Kapitel 5 beschrieben.

Die nächsten beiden Parameter überlagern sich gegenseitig. So wurden unterschiedliche Führungsarten am Auslauf des Biegekopfs untersucht. Dazu zählt als Erstes ein umlaufender Radius ohne etwaige Geometrieanpassung (**Bild 4.7c**). Dieses Konzept bietet hohe Flexibilität und im Verhältnis eine mittelgroße Reibung. Durch das Fehlen der seitlichen Führung (Nut) können sich vor allem Rohre und Drähte passend zur aktuellen Biegeposition seitlich verbiegen. Dies ist besonders beim Biegen enger Radien um eine Stützstelle von Vorteil.

Die geometrieoptimierte Nut (**Bild 4.7b**) stellt eine Möglichkeit dar, das Profil beim Biegen im Biegekopf zu stützen. Dadurch werden Querschnittsdeformationen an der Kontaktstelle zum Biegekopf reduziert. Diese Version bietet die geringste Flexibilität z. B. beim Biegen um eine Stützstelle, da es seitlich zu stark geführt wird. Zusätzlich entsteht durch diese Führungsart die größte Reibung.

Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung einer mitdrehenden Rolle dar (**Bild 4.7a**). Durch diese erfährt das Profil beim Durchlaufen der Biegezone am Biegekopf keine Relativbewegung zwischen Profil und der Anlegefläche am Biegekopf. Dadurch entsteht bei dieser Variante die geringste Reibung. Allerdings wird durch die seitliche Führung des Profils im Innenradius die Anpassung des Profils an die Biegesituation eingeschränkt. Des Weiteren ist es auch möglich, die Form der Rolle anzupassen, sodass diese ebenfalls eine geometrieoptimierte Nut erhält.

4.3.2 Werkzeugform

Für die Versuche wurden unterschiedlichsten Arten von Werkzeugformen eingesetzt, dazu zählen Formen mit Nuten als auch mit segmentiellen Stützstellen für kreisrunde und rechteckige Querschnitte (**Bild 4.8**). Der Basisaufbau der Werkzeugform besteht aus einer Grundplatte mit einer Breite von 100 mm und einer dicken von 20 bis 25 mm. Für kreisrunde Querschnitte wurde eine Startbohrung mit einer seitlichen Bohrung zum klemmen des Profils angefertigt. Für rechteckige Querschnitte wurde eine frei verstellbare Profil-Klemmvorrichtung entwickelt, die seitlich an das Werkzeug angebracht werden kann und in der Lage ist, das Profil zu klemmen. Als Stütze für das zu biegende Profil wurde entweder eine Nut in die Grundplatte eingefräst oder es wurden Stützstellen an den entsprechenden Positionen angebracht. Werkzeuge mit Nuten wurden je nach Komplexität mit Auswerfern versehen, um das Bauteil aus der Form zu entnehmen. Die Stützstellen wurden in mehreren Variationen untersucht. Es wurden flache Stützstellen ohne Querschnittsanpassung hergestellt sowie solche, die eine dem Querschnitt entsprechende Einkerbung besitzen. In **Bild 4.8b** oben ist eine 3D-Stützstelle mit einer Einkerbung für ein Rechteckprofil dargestellt. Die Tiefe der Einkerbung wurde ebenfalls variiert.

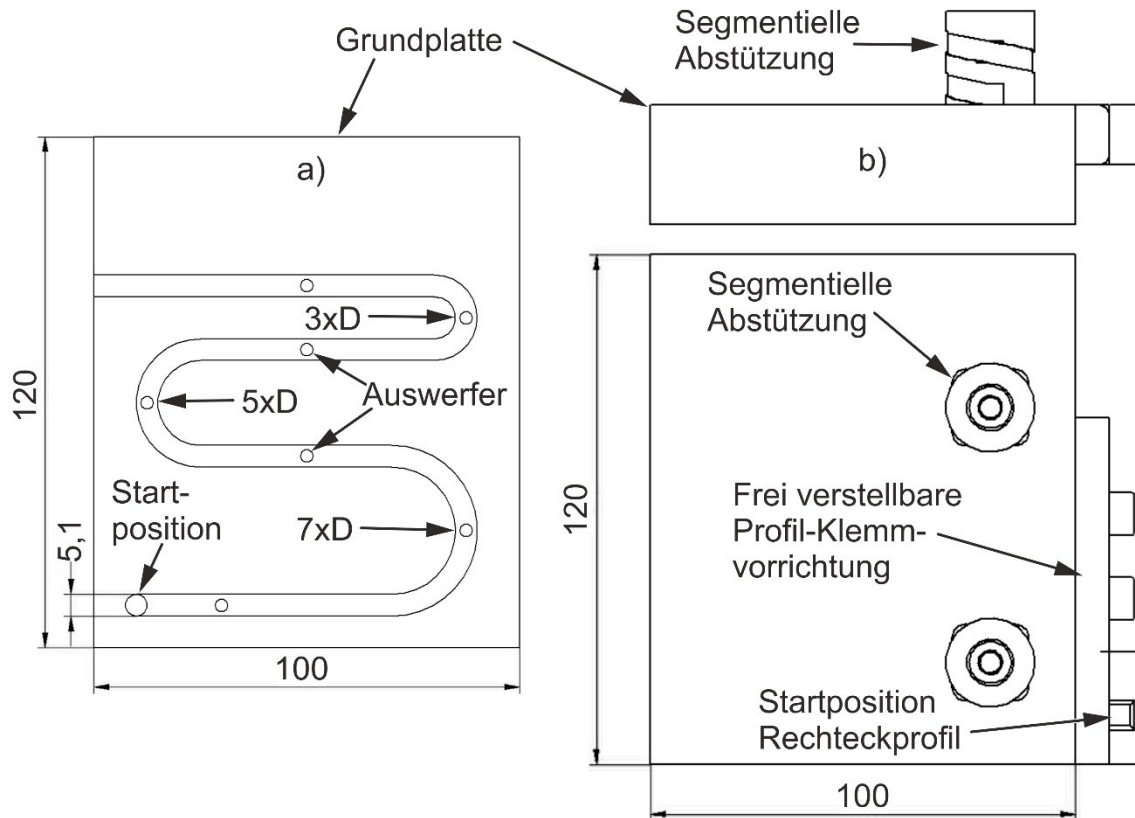


Bild 4.8: Werkzeugformarten und -aufnahme: a) Werkzeugform mit Nut, b) Werkzeugform mit segmentieller Abstützung

Die Werkzeugformen wurden entweder im Schraubstock eingespannt oder über eine speziell angefertigte Werkzeugaufnahme auf einem 3-Achsen-Dynamometer verschraubt (**Bild 4.9**). Das Dynamometer kann entweder mit Spannklemmen auf einem Nutentisch oder z. B. in einem Schraubstock der CNC-Fräsmaschine aufgenommen werden. Das Dynamometer ist über einen Ladungsverstärker mit einem Messrechner verbunden. Über das Programm LabVIEW wurden die Kräfte in allen drei Achsen aus dem Dynamometer ausgelesen und abgespeichert. Weiterhin wird damit auch der Antrieb der Profilführungseinheit gesteuert. In **Bild 4.9** ist der Signalfluss als Blockdiagramm dargestellt.

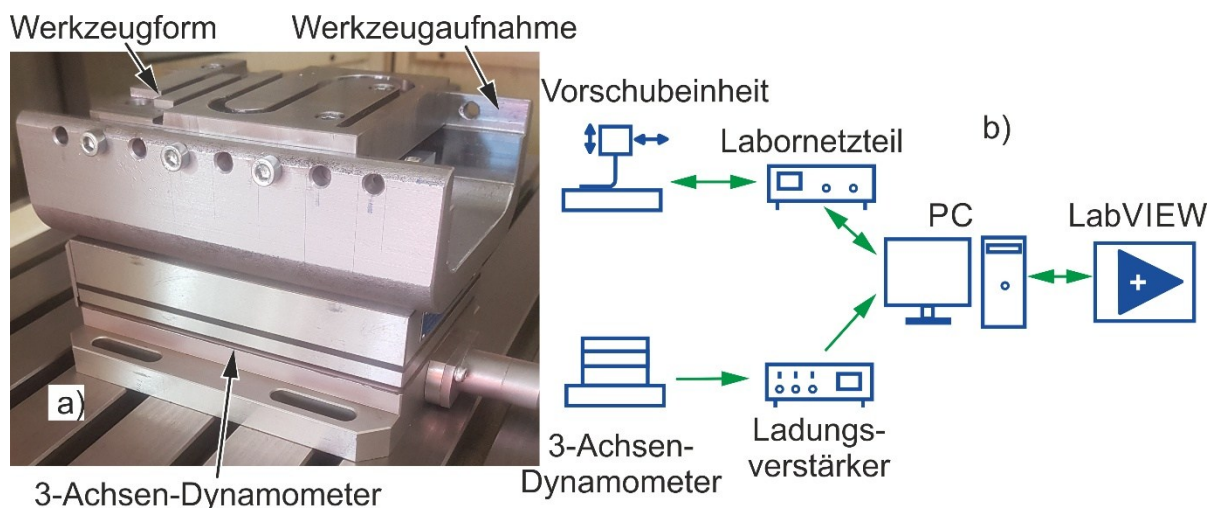


Bild 4.9: Experimenteller Aufbau: a) Werkzeugaufnahme, b) Signalfuss-Blockdiagramm

4.3.3 Eingesetzte Werkstückgeometrien und Werkstoffe

Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Werkstoffe und Querschnitte untersucht, dazu zählen:

- Rohrquerschnitt, Durchmesser 4,75 mm, Wandstärke 0,75 mm, Werkstoff 2.0872
- Kreisquerschnitt, Durchmesser 5 mm, Werkstoffe Al 99,5/EN AW-6060 (T6 und weichgeglüht)/1.0308 und 1.0324
- Vierkantquerschnitt, Abmaße 5x5 mm, Werkstoff EN AW-6060 (T6 und weichgeglüht)

Der Werkstoff EN AW-6060 kam sowohl im Anlieferungszustand T6 als auch im weichgeglühten Zustand zum Einsatz. Die Wärmebehandlung erfolgte Vorort (360°C, 2 Stunden).

4.4 FE-Modell

Neben dem experimentellen Modell wurden FEM-Analysen mit der Software Abaqus 2019 durchgeführt. Die FEM erlaubt einen tieferen Einblick in die Mechanismen, um z. B. die Spannungs- und Dehnungsverteilung an relevanten Stellen betrachten zu können. Durch den direkten Vergleich konnte das FE-Modell mit den Experimenten validiert werden. Eine optimale Ergänzung war dabei das erwähnte Dynamometer, das eine weitere Vergleichsmöglichkeit darbot. Dadurch war eine gute Gegenüberstellung der Experimente und des analytischen FE-Modells möglich.

Der Aufbau des impliziten FE-Modells war meistens ähnlich (**Bild 4.10**). So wurde für die Versuche das Profil als deformierbarer Körper mit einer festen Länge und sieben Knoten über den Querschnitt abgebildet. Es kamen lineare Elemente zum Einsatz (Elementbezeichnung „C3D8R“, Netzgröße 1 mm). Vereinzelt wurden die Ergebnisse mit quadratischen Elementen (Elementbezeichnung „C3D20R“) validiert. Der Biegekopf und die Führungseinheit wurden als eine Einheit durch Starrkörper-Elemente („analytical rigid“) mit einem Trägheitsmoment von $I_{11} = 3,25 \text{ mm}^4$, $I_{22} = 0,27 \text{ mm}^4$, $I_{33} = 3,25 \text{ mm}^4$ und einer Masse von 1,3 kg modelliert. Die Werkzeugform mit Nut/Stützstelle wurde als eine Einheit auf die notwendigen Elemente (Elementbezeichnung „R3D4“, Netzgröße 1,2 mm) und Abmessungen vereinfacht und als Starrkörper-Element mit einem leicht größeren Netz als der Draht abgebildet. Die Werkstoffkennwerte wurden aus einer Reihe an Zugversuchen gemittelt und nach Ludwik extrapoliert. Die Bewegung des Biegekopfes wurde mit dem in Kapitel 6 beschriebenen Excel-Programm erzeugt und als Amplitude importiert.

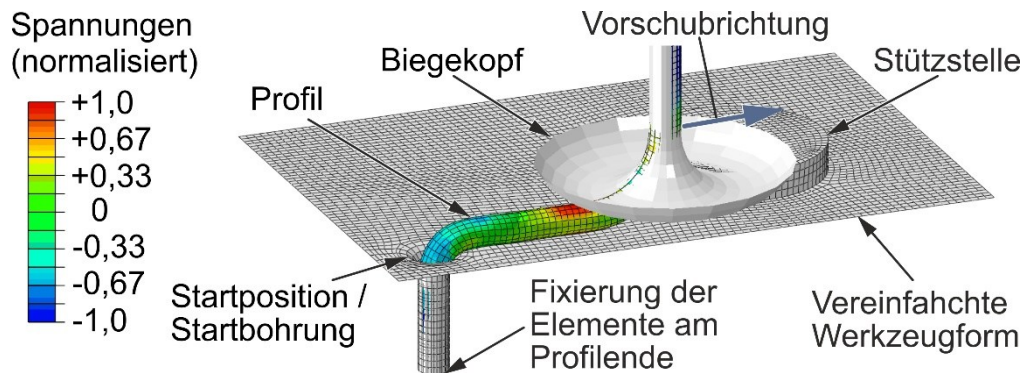


Bild 4.10: Darstellung des verwendeten FE-Modells

Der Reibungskoeffizient zwischen Profil und Biegekopf liegt bei 0,05. Der Reibungskoeffizient zwischen Profil und Werkzeugform lag bei 0,1 bis 0,2 (mit/ohne Schmierung). Für sandgestrahlte Oberflächen wurde ein Reibungskoeffizient von 0,4 verwendet. Zur Validierung des Reibungskoeffizienten wurden die Messungen aus dem Dynamometer herangezogen. Als Reibungsmethode wurde die „Penalty“ Reibung gewählt und als Kontakt bedingung der „Surface-to-Surface Contact“ in Abaqus. Die Verdrehung des Profils wurde hauptsächlich durch die FEM Simulationen bewertet, diese wurde durch Experimente validiert. Dazu wurden stellenweise speziell präparierte Proben mit einer Markierung auf der Außenfläche verwendet und für die Weiterentwicklung des FEM-Modells benutzt. Ein relevanter Parameter war dabei das Trägheitsmoment des Biegekopfes.

Für die Berechnung wurde ein Windows 10 Rechner mit einer Intel CPU (i7-6700 3,4 GHz) und 16 Gigabyte Arbeitsspeicher eingesetzt. Die Berechnungsdauer für das Modell lag bei rund 10 Stunden.

Abweichungen Experiment und FEM

Um die Berechnungsdauer der FEM Simulation zu reduzieren, wird der Biegekopf als ein Starrkörper modelliert. Dadurch erhält der Biegekopf in der FEM eine quasi unendlich hohe Steifigkeit. Dagegen erfährt der Biegekopf im Experiment (**Bild 4.6**), eine leichte Biegung, die durch eine Korrektur der Bahn kompensiert werden muss. Dazu wurde der Versatz (**Bild 4.2**), für die Experimente um ca. einen Millimeter vergrößert, was zu einer leicht abweichenden Bahnkinematik führte. Der Unterschied in der Bahn zwischen FEM und Experiment führte zu einer zeitlichen Verzerrung in den Kräfteverläufen der beiden Ergebnisse, die mit der Länge der Kreisbahn immer weiter zunahm. Des Weiteren blieb der Antrieb der CNC-Maschine für den Bruchteil einer Sekunde bei einem Richtungswechsel stehen, z. B. beim Übergang Gerade/Halbkreis, was ebenfalls zu einer Verzerrung der Zeitachse führte. Da dieser Verzerrung sich nur auf die kinematische Bewegung und die Darstellung der Daten auswirkt und keinen Einfluss auf die Mechanismen an sich hat, wurde dieser aus den Grafiken nicht herausgerechnet. Ein Beispiel dafür ist in **Bild 4.11** dargestellt.

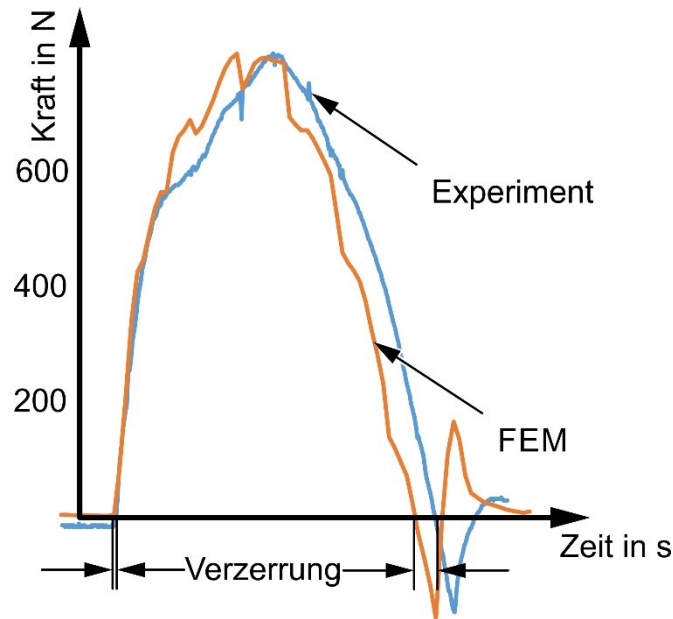


Bild 4.11: Verzerrung in der Laufzeit zwischen FEM und Experiment

4.5 Definition Verdrillung und Verdrehung

In dieser Arbeit werden folgende Begriffe benutzt: Winkel-Kreisbogen (α), Winkel-Verdrehung (β) und Winkel-Verdrillung (γ). Nachfolgend soll die Definition dieser Winkel näher beschrieben werden.

Winkel-Kreisbogen beschreibt den um eine Stützstelle gefahrenen Winkel des Kreisbogens (**Bild 4.12b**). Dabei bezieht sich die Lage auf den Mittelpunkt der Stützstelle, der zweite Bezugspunkt ist die Lage der Einlegezone, die um einen festen Versatz der vertikalen Mittelachse des Profils/Biegekopf hinterherläuft (**Bild 4.2b**).

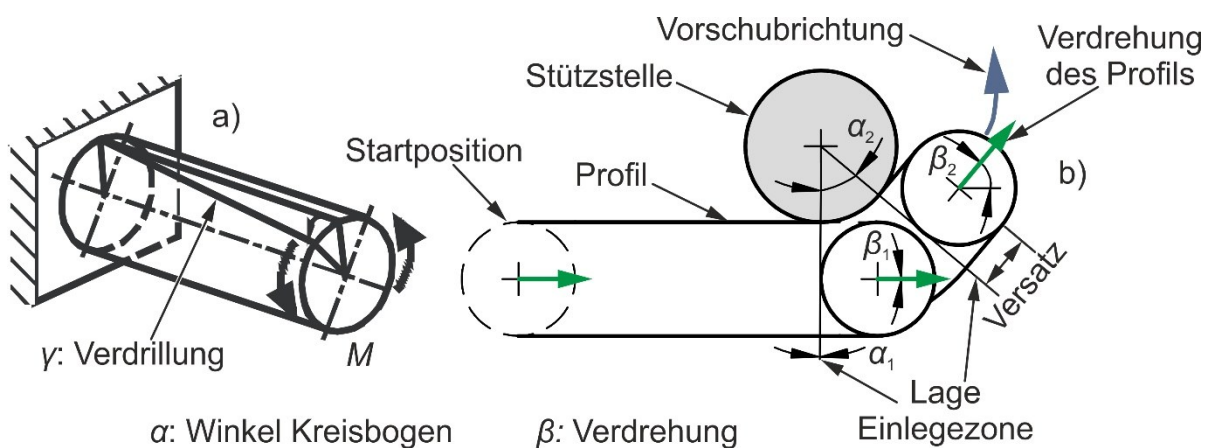


Bild 4.12: Begriffsdefinition a) Verdrillung (Doege und Behrens, 2010), b) Verdrehung

Winkel-Verdrehung beschreibt die Winkeländerung des unverformten Profilabschnitts im Biegekopf um die eigene Achse bei einer seitlichen Biegung um eine Stützstelle oder dergleichen (**Bild 4.12b**). Im Idealfall oder bei nicht symmetrischen Querschnitten sind Winkel-Verdrehung und Winkel-Kreisbogen gleich groß.

$$\alpha_1 = \beta_1 \tag{4.1}$$

und

$$\alpha_2 = \beta_2. \tag{4.2}$$

Bei rotationssymmetrischen Profilquerschnitten können diese beiden Winkel voneinander abweichen, da sich diese Querschnitte ohne Beschädigungen um die eigene Achse verdrillen können (**Bild 4.12a**). Unter Verdrillung wird eine Torsion des Profils um die Längsachse verstanden, die durch äußere Einflüsse hervorgerufen wird. Ein Beispiel dafür sind Kräfte und Momente, die durch das Anlehnen und die Reibung zwischen Profil und Werkzeugform/Stützstelle entstehen. Dabei gilt:

$$\gamma = \alpha - \beta. \tag{4.3}$$

5 Untersuchung der Umformmechanismen

Nachfolgend werden Mechanismen des inkrementellen Biegens im Gesenk dargestellt und erläutert sowie analytische Ansätze zur Berechnung von Parametern, die für die Auslegung des Prozesses benötigt werden, vorgestellt. Die dargestellten Ergebnisse basieren auf experimentellen Untersuchungen sowie validierten FEM-Simulationen. Die analytischen Ansätze wurden ebenfalls durch FEM und/oder Experimente validiert.

Um die große Anzahl an Mechanismen und Wechselwirkungen strukturiert einführen und beschreiben zu können, wurden diese in drei Gruppen aufgeteilt. Diese basieren auf den kinematischen Freiheitsgraden des Biegekopfes: 1D, 2D und 3D, die jeweils aufeinander aufbauen. Dabei beginnt jedes Kapitel mit der Beschreibung des jeweiligen Umformprozesses und der betrachteten Umformzone. Anschließend erfolgt die Beschreibung der Mechanismen anhand von Einflussparametern.

Dabei ist unter **1D** eine Linearbewegung mit einem konstanten Vorschub in einer Ebene zu verstehen (**Bild 5.1a**). Im Koordinatensystem der Maschinen kann es auch einer Bewegung in X- und Y-Richtung der Maschine oder einer Kombination dieser Ebenen gleichkommen. Allerdings darf die Startebene nicht verlassen werden.

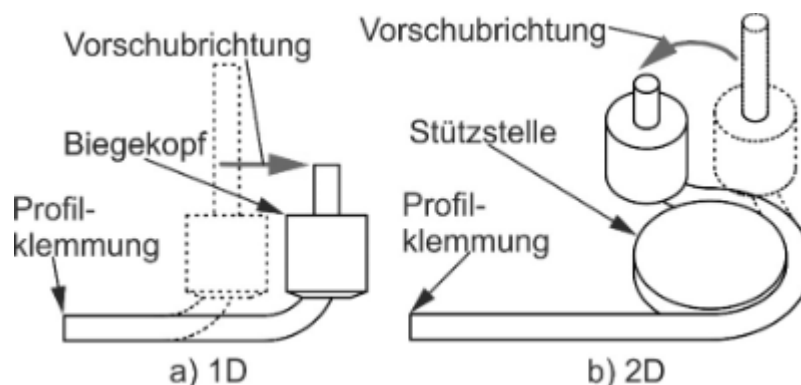


Bild 5.1: Darstellung einer 1D und 2D Bewegung

Unter **2D** ist eine zweiachsige Bewegung in einer Ebene zu verstehen (**Bild 5.1b**). Dabei kann der Vorschub der Achsen variieren. Ein Beispiel hierfür ist die Kreisbewegung. Aber auch der Übergangsbereich zwischen zwei Geraden, die sich unter einem beliebigen Winkel kreuzen, fällt in diese Kategorie.

Unter **3D** ist eine Bewegung in allen drei Achsen zu verstehen (**Bild 5.2**). Als dritte ist hierbei die Z-Achse gemeint. Dabei muss die Bewegung nicht immer in allen drei Achsen gleichzeitig stattfinden, es ist ausreichend, wenn der 2D-Bereich (die Startebene) einmalig verlassen wird, und so die Abstützung durch den Werkzeugboden entfällt.

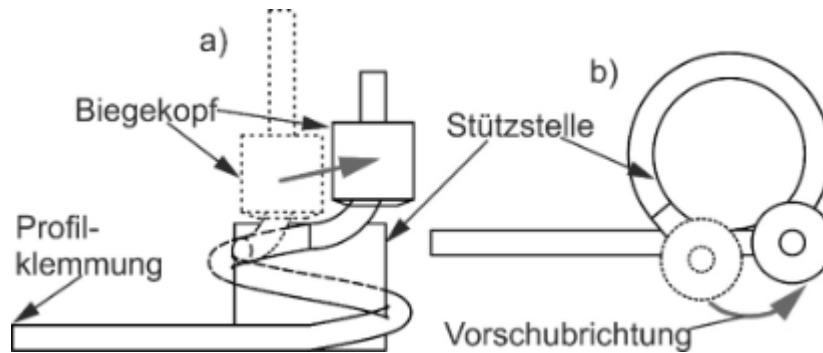


Bild 5.2: Darstellung einer 3D Bewegung: a) Seitenansicht, b) Draufsicht

Die Mechanismen in diesem Kapitel beziehen sich auf kreisrunde Querschnitte. Das Verhalten von nicht kreisrunden Profilen unterscheidet sich dadurch, dass die Verdrillung durch zusätzliche Maßnahmen verhindert werden muss. Die dazu notwendigen Maßnahmen und Veränderungen werden in Kapitel 6.4 beschrieben.

5.1 Mechanismen in 1D

Bei 1D wird der Prozess während einer linearen Bewegung betrachtet. Dadurch konzentriert sich alles auf die Umformzone am Austritt aus dem Biegekopf und dem Einspannbereich. Nachfolgend soll auf diese einzelnen Bereiche näher eingegangen werden.

5.1.1 Beschreibung des Umformprozesses/Umformzone

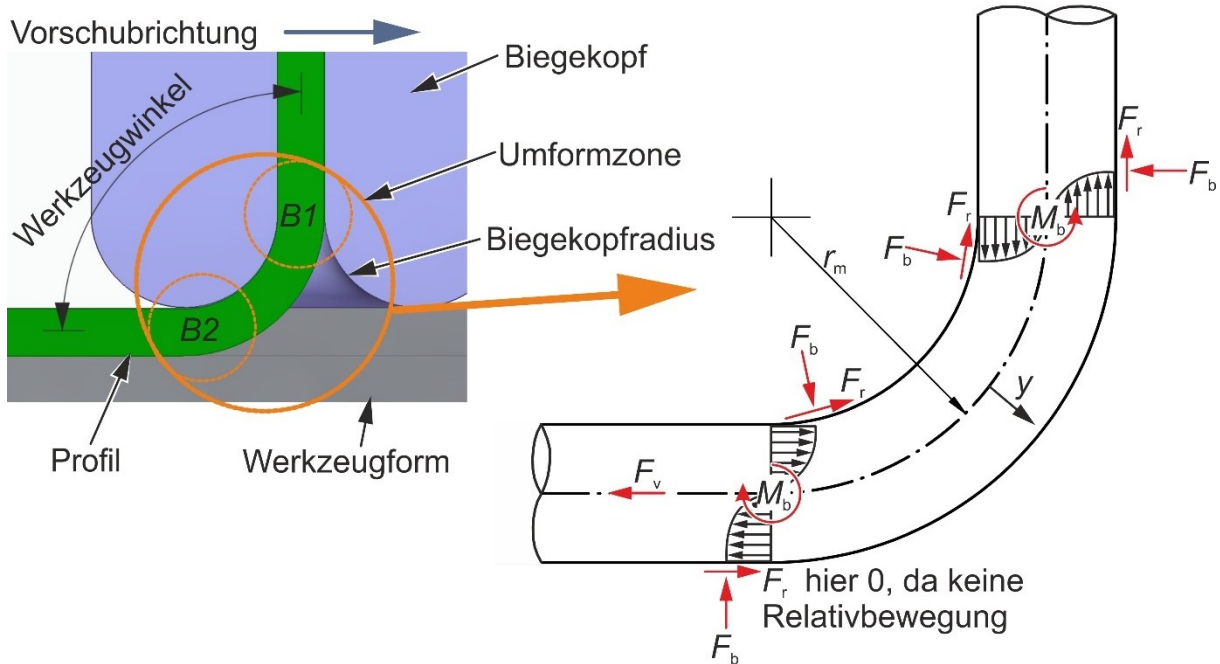


Bild 5.3: Definition der Umformzone sowie der Biegung 1 und Biegung 2

Umformzone bezeichnet den im **Bild 5.3** orange markierte Bereich. Dieser erstreckt sich von dem Austrittspunkt am Biegekopf bis zum Kontaktpunkt an der Werkzeugform. Während das

Profil diesen Bereich durchläuft, erfährt es eine doppelte Biegung, daher lässt sich dieser in zwei weitere Bereiche unterteilen: Im Bereich Biegung 1 (B1) entsteht eine Krümmung, die am Austritt im Bereich Biegung 2 (B2) wieder geradegebogen wird. Der Abstand der beiden Bereiche wird durch den Biegekopfradius und den Querschnitt des Profils bestimmt und ist über den gesamten Umformprozess, zu mindestens bei 1D, in Bezug auf die Vorschubrichtung und die Biegekopfmittelachse lokal fest. Des Weiteren hat der Werkzeugwinkel zwischen den beiden geraden Abschnitten einen Einfluss auf den Abstand. Dieser lag bei den Versuchen, wenn man die Steifigkeit des Biegekopfes vernachlässigt, bei 90° . Bei 3D-Geometrien wird dieser zusätzlich durch die Bauteilgeometrie beeinflusst und kann sich daher über den Verlauf verändern.

Nachfolgend sollen die Kräfte und Momente sowie die Abhängigkeiten beschrieben werden, die analytischen Ansätze zur Berechnung folgen später. Durch die Doppelbiegung des Profils entstehen die beiden Biegemomente M_b . Die Momente werden von ihrem Betrag als gleichgroß angesehen. Weiterhin resultieren an den Kontaktstellen zwischen Profil und Werkzeug die Kräfte F_b , die einen mathematischen Zusammenhang zum Biegemoment haben. So stützt sich das Profil beim Umformen zum einen an dem inneren Biegeradius des Biegekopfes und zum anderen auf dem Boden der Werkzeugform und an der Innenseite der Drahtführung ab, was durch die Biegekräfte F_b symbolisiert wird. Durch die Relativbewegung zwischen dem Profil und dem Biegekopf entstehen an den entsprechenden Kontaktstellen die Reibkräfte F_r . Da das Profil meistens in eine feststehende Werkzeugform abgelegt wird und sich danach relativ dazu nicht mehr bewegt, ist die Reibkraft an dieser Stelle im dargestellten Aufbau zu vernachlässigen. F_v ist die Kraft, mit der das Profil in Position, z. B. in der Einspannung, gehalten wird. Diese ist betragsmäßig gleich der Vorschubkraft, die für das Bewegen des Biegekopfes benötigt wird und durch die Antriebe der Werkzeugmaschine bereitgestellt werden muss. Diese ist in der Grafik nicht eingezeichnet. Der Zusammenhang zwischen den Kräften und Momenten ist wichtig um die Wechselwirkungen von Einflussparametern zu verstehen.

5.1.2 Einflussparameter

Ein wichtiger Punkt in diesem Prozess sind die beiden Biegungen (B1 und B2) und die daraus resultierenden Biegemomente und Kräfte. Diese lassen sich durch die Gestaltung des Biegekopfes und der Kinematik beeinflussen. In Zusammenhang mit dem gewählten Werkstückwerkstoff können daraus Prozessgrößen abgeleitet werden. Damit sind die folgenden Punkte die wichtigsten Einflussparameter um den Umformprozess zu steuern (wenn der Querschnitt gegeben ist):

- Der Biegekopfradius,
- die Reibung zwischen Profil und Biegekopf,
- Werkstückwerkstoff,
- Einspannung.

Biegekopfradius

Der Radius am Biegekopf ergibt zusammen mit dem halben Profildurchmesser den Biegeradius (r_m). So führt z. B. ein kleinerer Biegeradius zu einem höheren Biegemoment. Dadurch steigt der Anpressdruck auf die Biegeform und dementsprechend nimmt die Reibkraft zu. Dies führt dann in Summe zu einer höheren Streckung des geraden Abschnitts des Profils bis zur Einspannung sowie der benötigten Vorschubkraft (F_v). Dagegen führt ein größerer Biegeradius zu einer Verringerung des Biegemoments und damit auch zu geringeren Kräften und einer geringeren Reibung. Das macht sich auch dadurch bemerkbar, dass sich diese stärker über die Längsachse verteilen und sich nicht so stark an den Kontaktstellen mit dem Werkzeug konzentrieren (**Bild 5.4**). Dies macht sich durch eine stärkere Rückfederung bei größeren Biegeradien bemerkbar.

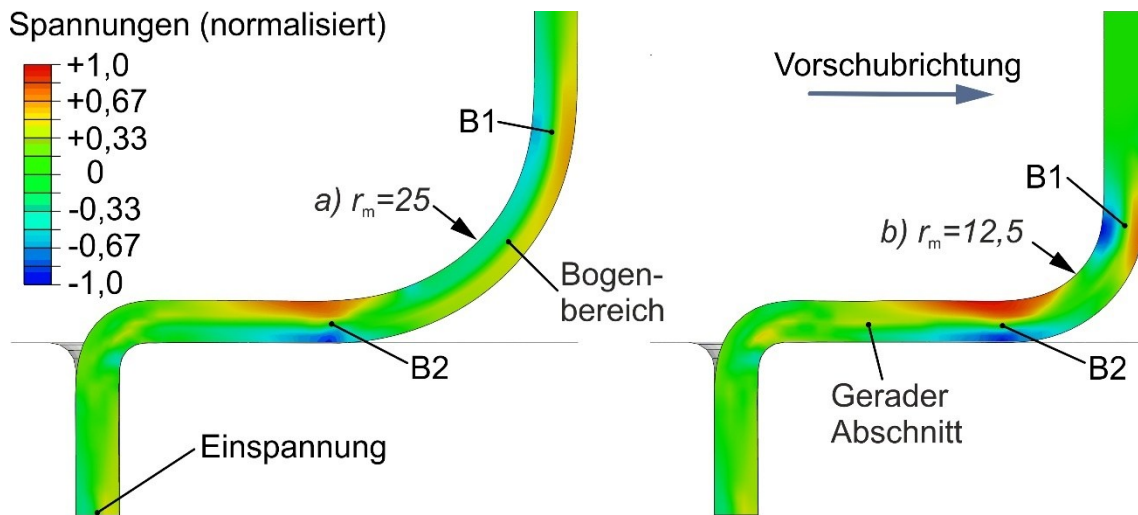


Bild 5.4: Spannungsverteilung bei unterschiedlichen Biegeradien: a) 25 mm, b) 12,5 mm

Reibung zwischen Profil und Biegekopf

Eine weitere Einflussgröße ist die Reibung zwischen Profil und Biegekopf. Diese kann durch den Reibungskoeffizienten und die Gestaltung des Biegekopfes beeinflusst werden. Der Reibungskoeffizient zwischen Profil und Biegekopf kann hauptsächlich durch die Schmierung beeinflusst werden. Durch die Verwendung eines Schmiermittels kann die Reibung etwa halbiert werden. Dies führt zu einer Reduktion der Vorschubkraft und einer geringeren Streckung des abgelegten Profils. Durch die geringere Streckung in Achsrichtung nimmt die Rückfederung in Biegerichtung proportional zu. Auch lassen sich durch die geringere Streckung die Querschnittsdeformation und Oberflächenbeschädigung reduzieren, sowie die Standzeit der Werkzeugelemente erhöhen.

Für eine praktische Umsetzung der Schmierung gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei kurzen Abschnitten, die ohne eine Vorschubeinheit auskommen, kann entweder der Draht oder der Biegekopf mit einem Schmierfilm zwischen den Versuchen versehen werden. Bei Verwendung einer Vorschubeinheit ist das so nicht möglich, da die Schmierung auch den Kontakt zwischen Antrieb und Profil beeinflussen würde. Daher muss hier die Schmierung nach der Antriebseinheit und vor dem Austritt am Biegekopf angebracht werden.

Eine weitere Möglichkeit der Einflussnahme auf die Reibung bietet die Gestaltung des Biegekopfes. Hier wurden bereits Variationen dargestellt (**Bild 4.7**). So ist es beispielsweise möglich, einen Biegekopf mit einem umlaufenden Radius zu versehen und optional zu polieren. Diese Möglichkeit ist vorteilhaft, wenn sich die Drahtführungseinheit nicht mitdrehen kann oder sehr enge Biegeradien hergestellt werden müssen, da das Profil sich frei auf der Oberfläche bewegen kann. Diese Ausführung ist für nicht kreissymmetrische Querschnitte ungeeignet.

Eine weitere Möglichkeit bietet die geometrieoptimierte Nut. Dadurch können nicht kreissymmetrische Geometrien besser abgestützt werden. Durch die größere Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück steigt die Reibung geringfügig an. Diese Art des Biegekopfes erfordert eine frei drehende Aufnahme und eine Anpassung der Kinematik, da der Versatz dadurch größer wird. Aus diesem Grund kann der geringe Abstand zum Werkzeugboden nicht eingehalten werden und muss um das Ausmaß der Einkerbung erhöht werden.

Einen größeren Einfluss auf die Reibung hat die Verwendung einer mitdrehenden Rolle (**Bild 4.7a**). Durch das Mitdrehen kann die Reibung zwischen Innenradius des Biegekopfes und dem Profil so stark reduziert werden, dass diese quasi vernachlässigt werden kann. Die reduzierte Reibung führt auch zu einer geringeren resultierenden Vorschubkraft F_v . Diese kann z. B. durch die Verwendung der mitdrehenden Rolle, je nach Reibpaarung, bis zu 30 % betragen. Dadurch sinkt die axiale Streckung und die Rückfederung nimmt zu.

Werkstückwerkstoff

Der Einfluss des Werkstückwerkstoffs führt zu einer Skalierung der Umformkräfte auf Basis der Werkstofffestigkeit. Weitere Einflüsse lassen sich am Beispiel des EN AW 6060 darstellen. Dieser wurde im Anlieferungszustand T6 und weichgeglüht untersucht. Mit abnehmender Festigkeit nahm die Geometriegenauigkeit durch die geringere Rückfederung zu, der Querschnitt deformierte sich dagegen beim Zustand T6 weniger aber federte stärker zurück.

Einen größeren Einfluss hat der Werkstückwerkstoff auf die Gestaltung der Werkzeuglemente. Durch die zunehmenden Kräfte bei zunehmender Werkstofffestigkeit müssen die Steifigkeit und Länge des Biegekopfes angepasst werden. Bei der in **Bild 4.6b** verwendeten Vorrichtung musste der Versatz beim Werkstoff EN AW-6060 (Durchmesser 5 mm) zwischen T6 und weichgeglüht um zusätzliche 0,5 bis 1 mm vergrößert werden da es sonst aufgrund der elastischen Verformung zwischen Werkzeug und Biegekopf zur Kollision kommen kann.

Einspannung

Neben der eigentlichen Umformzone wirkt sich auch die Gestaltung des Einspannbereichs auf das fertige Bauteil und den Prozessablauf aus. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Profilklemmung, die für die durchgeführten Versuche priorisierte Lösung zeichnet sich durch eine Startbohrung aus, in die das Profil vor Beginn der eigentlichen Umformung eingeführt und z. B. durch eine Schraube geklemmt wird (**Bild 4.1**). Durch die Schraube kann das Profil am Verrutschen gehindert werden. Diese Fixierung ist nicht zwingend erforderlich, da bei einer ausrei-

chenden Länge (**Bild 5.5b**) von $> 2 \times D$ das Profil bereits durch den Beginn des Umformprozesses formschlüssig in der Bohrung klemmen bleibt. Die Fixierung dient hier als eine zusätzliche Sicherung.

Sämtliche betrachtete Möglichkeiten haben eines gemeinsam: Durch das Anfahren, entsteht ein Wechsel von Haftreibung zu Gleitreibung. Dies führt zu einem leichten Peak der benötigten Vorschubkraft beim Anfahren oder auch zu Beginn eines neuen Abschnitts und betrifft auch bereits vorgebogene Profile die durch eine Fixierung ohne Startbohrung geklemmt werden. Dieses Phänomen ist auch später bei mehrachsigen Bewegungen zu beobachten, z. B. wenn eine Vorschubachse dazugeschaltet wird oder die Maschine von einem Bahnpunkt zum anderen wechselt und dabei einen kurzen Augenblick stehen bleibt. Das Ausmaß dieses Kraftanstiegs ist beim Anfahren nach Prozessbeginn am größten (**Bild 5.5c**).

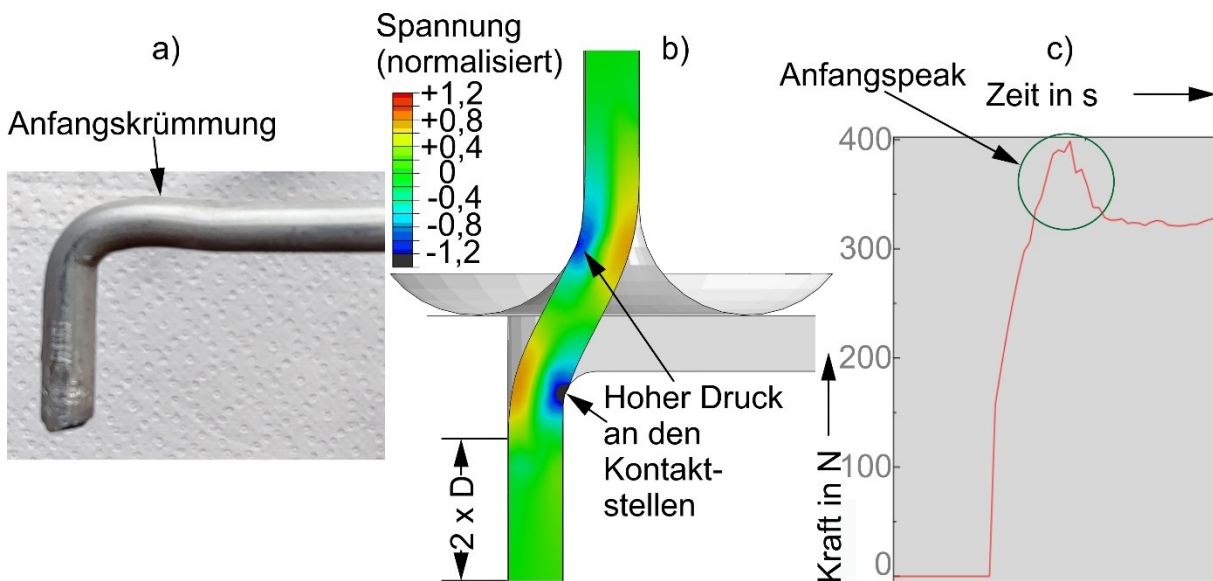


Bild 5.5: Initialbiegung: a) Anfangskrümmung, b) normalisierte Spannungen, c) Anfangspeak

Ein weiteres Merkmal betrifft vor allem die gewählte Lösung. So entsteht unmittelbar nach der Einspannung eine Anfangskrümmung (**Bild 5.5a**), die durch die Initialbiegung beim Anfahren erzeugt wird. Diese entsteht einerseits durch die hohen Kontaktkräfte beim Prozessstart und andererseits durch den erhöhten Reibanteil aufgrund der Haftreibung zwischen Profil und Werkzeug.

Durch das Vorbiegen kann der Anfangspeak nur geringfügig reduziert werden. Den größten Anteil haben der Übergang der Reibungsart und die Umformgeschwindigkeit. Ähnliches konnte in Situationen beobachtet werden, in denen die Umformmaschine kurz stehenblieb, um die Richtung zu wechseln.

Alle bis hier genannten Einflussparameter treten in der Praxis immer parallel und mit Wechselwirkungen untereinander auf. Das Ziel ist es, den richtigen Parameter zu verändern, um das beste Biegeergebnis zu erzielen. Es hat sich als vorteilhaft erwiesen, einen Biegekopf mit einem Biegeradius von zwei- bis dreimal Profildurchmesser und einem möglichst geringen Reibungskoeffizienten zu wählen und über die Variation des Drahtvorschubes oder einer Bremse eine definierte Spannungsüberlagerung zu erzeugen und dadurch ein optimiertes Biegeergebnis zu

erreichen. Durch eine gezielte abschnittsweise Überlagerung kann das Biegeergebnis noch weiter verbessert werden.

5.2 Mechanismen in 2D

Bei 2D handelt es um eine zweiachsige Bewegung in einer Ebene. Dabei kann sich die Vorschubgeschwindigkeit der einzelnen Achsen verändern. Ein einfaches Beispiel hierfür ist die Kreisbewegung (**Bild 5.1b**). Aber auch der Übergangsbereich von zwei Geraden (Knick), der um einen beliebigen Winkel zueinander versetzt ist, zählt zu dieser Kategorie.

Der 2D-Bereich ersetzt die bereits in 1D beschriebenen Mechanismen nicht, sondern ergänzt diese um weitere Einflussparameter. In diesem Kapitel sollen der erweiterte Umformprozess und die Parameter beschrieben und die daraus resultierenden Mechanismen dargestellt werden.

5.2.1 Beschreibung des Umformprozesses/Umformzone

Die Umformzone von 1D beschränkt sich auf die Doppelbiegung, die räumlich eindeutig bestimmt werden kann und von der Biegekopfgeometrie abhängt. Bei 2D-Geometrien kommt zusätzlich eine weitere Biegung hinzu, diese kann entweder durch eine horizontale oder vertikale Bewegung des Biegekopfes entstehen (**Bild 4.1**), dort sind beide Fälle dargestellt. Diese sind umformtechnisch klar voneinander zu trennen. Gemeinsam haben diese nur, dass zur Erzeugung der 2D-Geometrie immer eine Abstützung durch den Werkzeugboden erforderlich ist. Beide Arten und die Unterschiede sollen nachfolgend erläutert werden.

- **Horizontal**

Unter einer 2D-Horizontal-Bewegung ist die Erzeugung einer Geometrie zu verstehen, die sich in einer horizontalen Ebene zum Werkzeugboden befinden, während die Profilverfahren und damit der Biegekopf unter einem Winkel von 90° dazu verfährt.

Der lokale Umformprozess lässt sich wie folgt beschreiben: das von oben kommende Profil durchläuft die beschriebene Doppelbiegung (B1 und B2) und erfährt zusätzlich eine seitliche Biegung (B3) (**Bild 5.6**). Die seitliche Biegung erfolgt durch das seitliche Anlehnen des Profils an die Stützstelle und die entsprechende horizontale Relativbewegung des Biegekopfes um die Stützstelle. Dieser Umformprozess führt zu einer Verdrehung des oberen Abschnitts des Profils (Kapitel 4.5). Dabei verdreht sich das Profil immer mit der Kreisbewegung der Bahn, das heißt, dass das Profil sich im Uhrzeigersinn dreht, wenn die Kinematik einen Bogen im Uhrzeigersinn fährt. In Kombination mit der Abwärtsbewegung resultiert es zu einer schraubenähnlichen Bewegung durch die Umformzone in die Werkzeugform hinein. Der Biegekopf dreht sich dabei in der Regel frei mit.

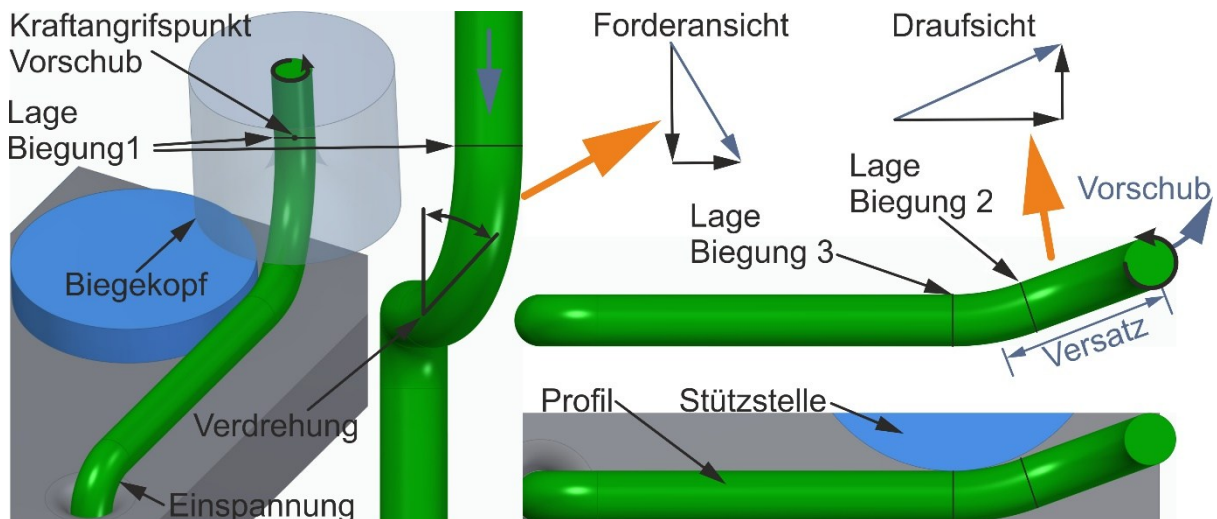


Bild 5.6: 2D-Bewegung am Beispiel Draht, horizontal

Hierbei ist das Umformen von kreisrunden und nicht kreisrunden Querschnitten zu unterscheiden. Während kreisrunde Profile wie Drähte und Rohre sich frei verdrillen können und damit keine nennenswerten Einschränkungen haben, erfordert das Umformen von nicht kreisrunden Querschnitten eine besondere Anpassung der Kinematik, da sich das Profil nicht verdrillen darf, da es sonst beim Ablegen in die Werkzeugform zu Querschnittsdeformationen des Profils kommen kann.

Während die Positionen von B1 und B2 eindeutig durch den Biegekopf und die Neigung der Werkzeugachse vorgegeben werden, wird die Lage von B3 von der Kinematik bestimmt und kann zusätzlich durch die Bahnplanung beeinflusst werden. Der Abstand von B3 zur Biegekopf-Mittelachse verändert sich nach einer Lokalisierung bei einem konstanten Versatz nicht mehr und folgt dieser mit einem gleichbleibenden Abstand. Unter Lokalisierung wird die erstmalige Entstehung der Krümmung um den Bereich von B3 zu Beginn der Kreisbahn verstanden. Diese entsteht dadurch, dass der Biegekopf erst um den Wert des Versatzes linear vorfahren muss, bevor es in die seitliche Biegung übergeht.

- **Vertikal**

Etwas anders verhält es sich bei der 2D-Vertikalbewegung (**Bild 4.1**) letzter Profilschnitt. Als Zusatzbewegung ist hier eine Abwärtsbewegung gemeint, während das Profil von oben zugeführt wird (**Bild 5.7**). Eine Aufwärtsbewegung für 2D wird in dieser Arbeit nicht behandelt, da diese eine spezifische Abstützung erfordert, die je nach Umsetzung anders ausfallen kann und dadurch keine allgemeingültige Betrachtung möglich ist. Jedoch sind die Mechanismen recht ähnlich zu Horizontal.

Bei der 2D-Vertikalbewegung kommt es ähnlich wie bei der Horizontalbewegung zu einer weiteren Biegung (B3, **Bild 5.7**) nur dass diese geometriebedingt abschnittsweise lokal festbleibt und nicht der Bewegung des Biegekopfs folgt. Dabei stützt sich das Profil an der Werkzeugform

ab und wird vom Biegekopf in die Werkzeugform abgelegt. Wichtig ist dabei, dass der Übergangsbereich (B3) in der Werkzeugform mit einem Radius versehen wird, um Querschnittsdeformationen zu vermeiden.

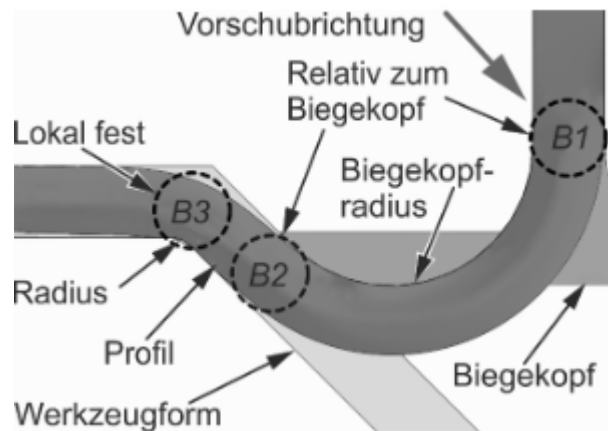


Bild 5.7: 2D Umformung vertikal, Schnittdarstellung

Durch die vertikale Relativbewegung des Biegekopfes zur vorherigen Ebene verändert sich der B2-Bereich, entsprechend dem Neigungswinkel der Form, tangential zum Außenradius des Biegekopfes. Der Betrag des Biegemoments von B1 und B2 ändern sich nicht im Vergleich zu 1D. Bei der Abwärtsbewegung ist eine genaue Kenntnis der Geometrie erforderlich, da der Versatz neu und anders als üblich berechnet wird und die Kinematik dem entsprechend angepasst werden muss.

- **Position Kraftangriffspunkt Vorschub/Hebelarm**

Ein weiterer relevanter Aspekt ist die Kraftübertragung zwischen Biegekopf und Profil während des Vorschubvorgangs. Dieser erfolgt durch den Kontakt zwischen den beiden Elementen Profil und Biegekopfradius. Für die Betrachtung kann die Lage des Kraftangriffspunkts als die Ebene, in der die Krümmung entsteht, angesehen werden (**Bild 5.6**). Durch das in der Praxis notwendige Spiel innerhalb des Biegekopfes, liegt dieser Punkt immer etwas weiter im Radius, was aber hierbei vernachlässigt werden kann.

Dieser Punkt wandert je nach Umformrichtung horizontal oder vertikal. Bei einer horizontalen Bewegung verändert sich dieser, sobald eine seitliche Biegung hinzukommt, entsprechend der Vorschubrichtung in der horizontalen Ebene. Bei einer vertikalen Bewegung verändert er sich mit dem entsprechenden Winkel vertikal auf der Kontaktfläche zwischen Biegekopfradius und Profil. Der Abstand zwischen B3 und dem Kraftangriffspunkt wird hier als Hebelarm bezeichnet und ist z. B. bei einer geraden Bewegung etwa um den halben Querschnitt kleiner als der Versatz (X_V) und verändert sich je nach Vorschubrichtung relativ zur aktuellen Ausrichtung.

• Einführung und Definition der Einflusszone

Die bis hier beschriebene Sichtweise zeigt nur den primären Umformbereich (Umformzone/blau), allerdings wirkt sich dieser bei B3 (2D-Horizontal) auf einen größeren Bereich aus, hier als Einflusszone bezeichnet (**Bild 5.8** orangener Bereich). Um den Einfluss und die Auswirkungen der Prozessparameter zu verstehen, ist es notwendig, den betrachteten Bereich zu vergrößern. Dabei wird dieser in zwei Bereiche aufgeteilt: den „oberen unverformten Bereich“ und den „beeinflussten abgelegten Bereich“, also die beiden geraden Abschnitte vor und nach der Umformzone.

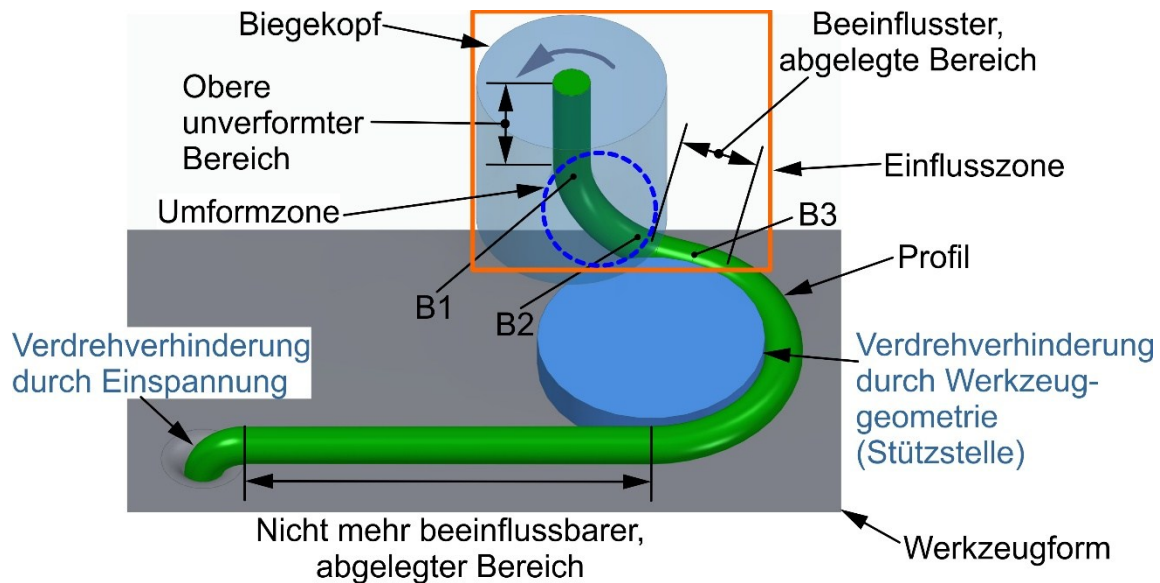


Bild 5.8: Definition der Einflusszone bei 2D Geometrien

Der obere unverformte Bereich geht von B1 bis zum Drahtvorschub. Dieser erfährt keine Verdrillung, da dieser in der Regel drehbar gelagert ist und sich zusammen mit dem Biegekopf mit dreht.

Der zweite Bereich der Einflusszone ist der beeinflusste abgelegte Bereich. Dieser Teil der Einflusszone erstreckt sich näherungsweise von B2 bis zur letzten Verdrehverhinderung. Als Verdrehverhinderung kann das bezeichnet werden, was eine Blockierung der Verdrillung des abgelegten Bereichs um die eigene Achse bewirkt (Kapitel 4.5). Zwei Beispiele einer Verdrillung sind in **Bild 5.8** dargestellt. Das erste Beispiel ist die Einspannung in der Startposition. Das Zweite ist die Verdrehverhinderung durch ein Werkzeugelement der Werkzeugform, in diesem Fall die Stützstelle, um die das Profil gebogen wird.

Der erweiterte Umformprozess um z. B. eine Stützstelle lässt sich in drei Phasen aufteilen, die sich von Stützstelle zu Stützstelle wiederholen:

In Phase 1 fährt der Biegekopf eine vorgegebene Strecke (Versatz X_v) linear zur vorherigen Bahn vor. Diese muss mindestens den errechneten Versatz X_c betragen (**Bild 5.9**), kann aber um einen beliebigen Offset X_o erweitert werden.

In Phase 2 beginnt die seitliche Relativbewegung (B3 entsteht). Dabei wird der bereits abgelegte gerade Abschnitt des Profils verdrillt, bis durch den Verdrehwiderstand (M_v) im Profil

und die Reibung an der Kontaktstelle zum Stützelement ein dem Biegemoment entsprechendes Gleichgewicht aufgebaut wird (**Bild 5.9**).

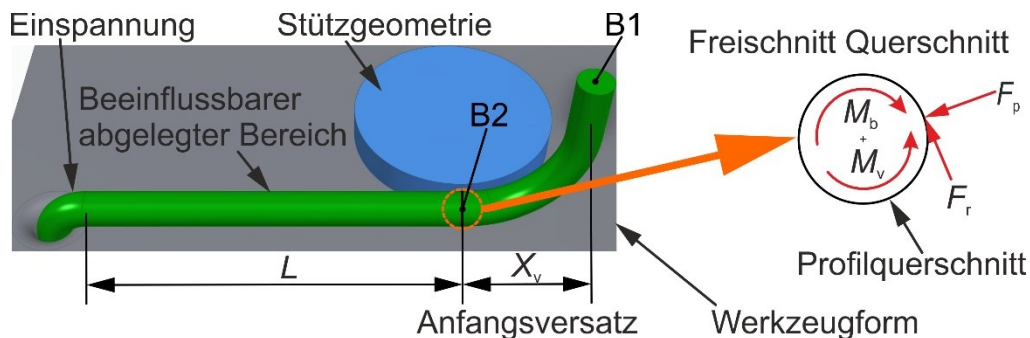


Bild 5.9: Kräfte beim seitlichen Biegen

Sobald dieses Gleichgewicht erreicht ist, lokalisiert in Phase 3 die Verdrillung und folgt mit einem konstanten Abstand der Biegekopf-Mittelachse. Während der beschriebenen Umformung dreht sich der obere Abschnitt, inklusive Vorschub, ohne nennenswerte Verdrillung mit. Die Verdrillung wirkt dabei bis zur letzten Verdrehverhinderung. Dabei entspricht der Abstand von B3 zur Biegekopf-Mittelachse. Dieser entspricht näherungsweise dem Betrag des Versatzes X_v .

5.2.2 Einflussparameter

Nachdem nun der Prozess und die Definition der Umformzone beschrieben wurden, sollen nun die wichtigsten Einflussparameter und deren Auswirkungen erläutert werden. Diese sind:

- der Versatz zwischen Mittelachse-Biegekopf und Sollgeometrie,
- die Reibung μ zwischen Profil und Werkzeug,
- der Werkstückwerkstoff und
- der Biegekopfradius r_{BK} .

• Versatz

Der Versatz in 2D (Horizontal) ist der stärkste Einflussfaktor, er beschreibt die tangential Verschiebung der Biegekopf-Mittelachse von der Sollgeometrie in Vorschubrichtung. Dabei setzt sich der Versatz X_v aus zwei Komponenten zusammen. X_c steht dabei für den errechneten Mindestversatz (in **Bild 5.10** $X_c = 5,05$ mm) und der darauffolgende Zahlenwert steht für den zusätzlichen Offset (X_o) in mm (Versatz $X_v = X_c + X_o$). In **Bild 5.10** sind dazu exemplarisch zwei Bahnen mit unterschiedlichem Offset für die gleiche Sollgeometrie dargestellt.

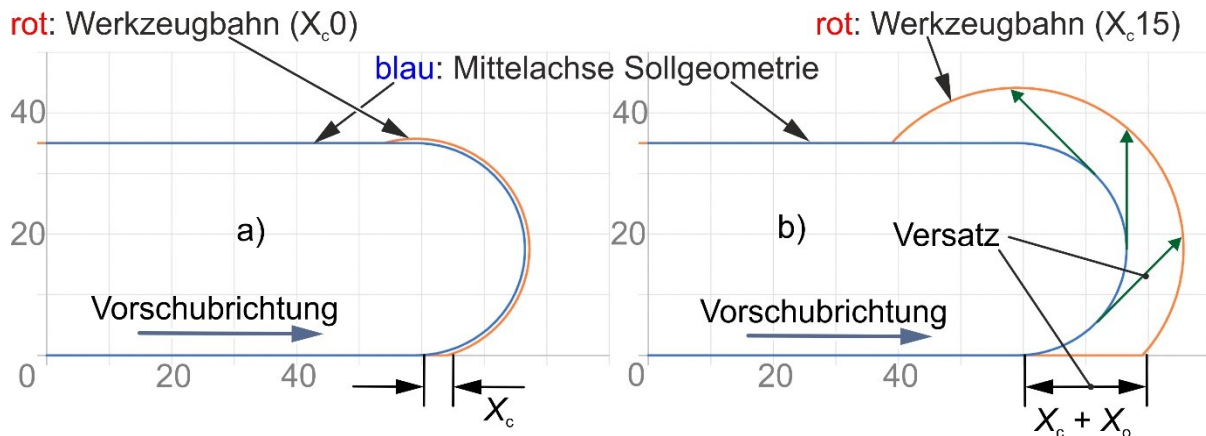


Bild 5.10: Werkzeugbahn mit unterschiedlichem Offset: a) $X_o = 0$ mm, b) $X_o = 15$ mm

In den durchgeführten Experimenten ist der Versatz während eines einzelnen Kreisbogens immer konstant. Des Weiteren ist hierbei zu erwähnen, dass die Nut im Werkzeug im betroffenen Bereich bei größerem Versatz entsprechend angepasst werden muss, oder es sind Stützelemente statt einer Nut zu verwenden (Kapitel 4.1.2).

Der Versatz spielt vor allem bei 2D-Geometrien eine wichtige Rolle, da er näherungsweise die Position aufzeigt, an der sich das Profil seitlich an der Werkzeugform abstützt, während es um diese gebogen wird. Für die Betrachtung der Mechanismen sind dabei drei Fälle zu unterscheiden (**Bild 5.11**).

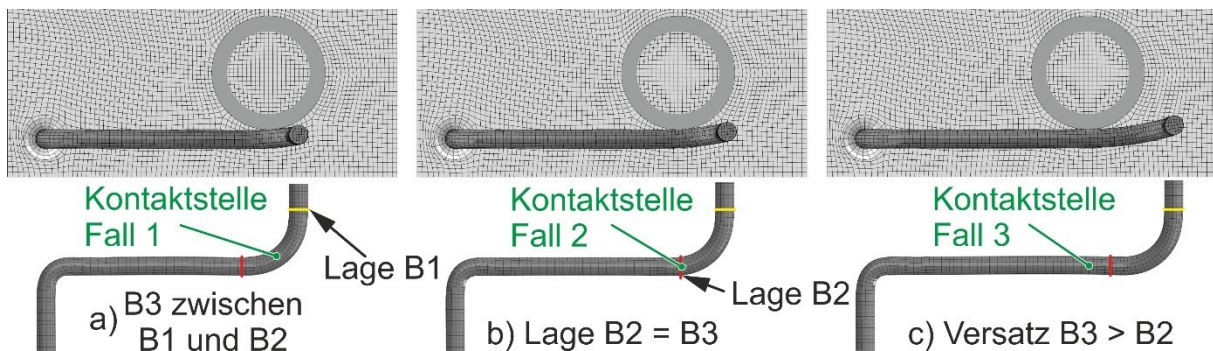


Bild 5.11: Einteilung der Mechanismen nach Lage B3 (Kontaktstelle)

Fall 1: Hierbei befindet sich B3 zwischen B1 und B2. Dies trifft dann zu, wenn der Versatz vom Betrag kleiner ist als der Biegeradius r_m . Je größer der Biegekopfradius wird, desto näher kommen sich B3 und B2.

Fall 2 tritt ein, wenn der Versatz und der Biegeradius r_m näherungsweise gleich groß sind. Dadurch kommt es zu einer Überlagerung der beiden Biegungen (B2 und B3).

Fall 3: Hierbei ist der Versatz größer als der Biegeradius r_m . Die Biegungen erfolgen in der numerischen Reihenfolge.

Diese drei Fälle sind voneinander zu trennen. Der Übergang zwischen diesen ist fließend, insbesondere bei Fall 2. Die Lage des Punktes ist für die Betrachtung des Verfahrens deshalb relevant, weil je nach Fall sich Einflussparameter unterschiedlich auswirken. Die Entstehung und Lokalisierung von B3 wurden im vorangegangenen Abschnitt erläutert.

Den größten Einfluss zeigt der Versatz auf die Verdrehung/Verdrillung von kreisrunden Profilquerschnitten und die Maßhaltigkeit der Bauteile. **Bild 5.12** zeigt die Verdrehungen des oberen Abschnitts bei unterschiedlichem Versatz. Dazu wurden überwiegend FEM-Versuche ausgewertet, die abschnittsweise durch Experimente validiert wurden. Rechts daneben ist die Verdrillung des abgelegten Bereichs dargestellt. Der Winkel des gefahrenen Kreisbogens in diesem Versuchen betrug 180° und der Radius der Stützstelle 30 mm.

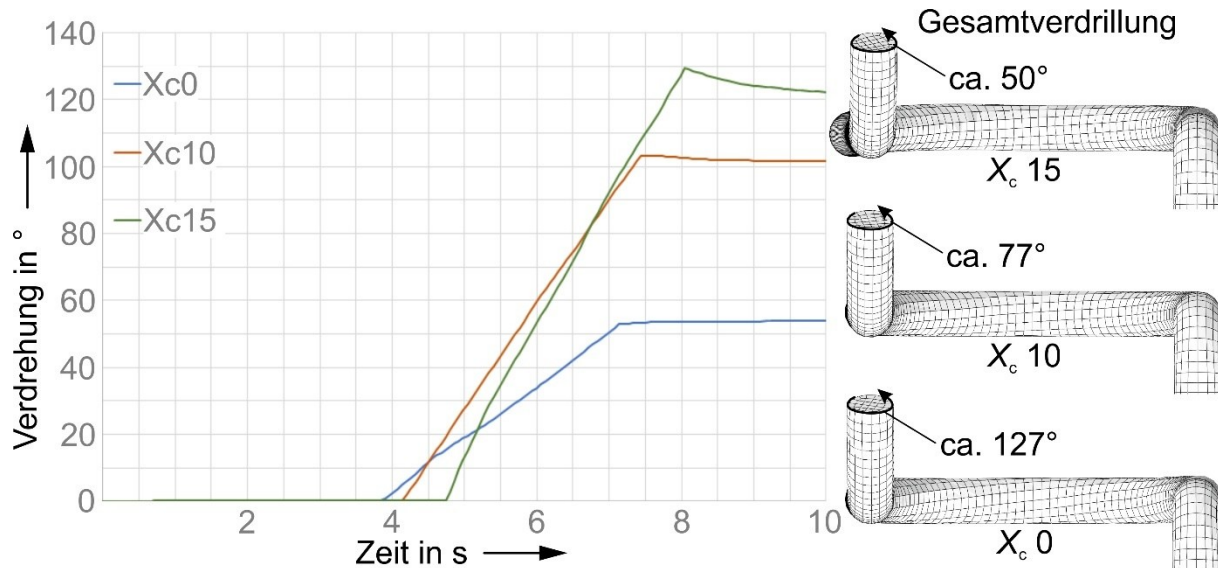


Bild 5.12: Verdrehung und Verdrillung eines Drahtes bei unterschiedlichem Versatz

Man erkennt, dass Bauteile mit einem geringeren Versatz eine größere Verdrillung des ablegenden Bereichs aufweisen, während bei größerem Offset die Werkzeugachse stärker verdreht wird und die Verdrillung des Bauteils am Ende deutlich geringer ausfällt. Dies ist auf den unterschiedlichen Versatz zurückzuführen, der sich durch folgende Aspekte bemerkbar macht.

Als Erstes ist hier der Anfangsversatz zu nennen. Dieser ist betragsmäßig identisch mit dem Versatz X_v . Damit ist der gerade Abschnitt gemeint (**Bild 5.10** und **Bild 5.9**), den der Biegekopf vorfährt, und dadurch das Profil ohne zu Verdrillen und Verdrehen ablegt. Je größer der Anfangsversatz wird, desto später startet die seitliche Biegung (B3), was auch an der zeitlichen Verschiebung der Verdrehung in dem oberen Bild zu erkennen ist. Dieser Abschnitt erfährt hauptsächlich eine Verdrehung und nur eine geringe Verdrillung. Des Weiteren wird mit einem größeren Versatz auch der Hebelarm zwischen Kontaktstelle und Kraftangriffspunkt größer, sodass der Verdrehwiderstand, der durch den Kontakt zwischen Profil und Stützstelle entsteht (**Bild 5.9**), sich stärker auswirkt. Dieser Zusammenhang ist der Hauptgrund für die abnehmende Verdrillung bei steigendem Versatz. Der Zusammenhang ist nicht linear, dies wird später noch detailliert erläutert.

Weiterhin wirkt sich der Versatz nicht nur auf die Verdrillung, sondern auch auf das Biegeergebnis aus. So überlagern sich bei kleinen Offsets die beiden plastischen Umformbereiche von B2 und B3 (Fall 1 und 2), was zu einer erhöhten Querschnittsdeformation im Innenbogen des Profils an der Kontaktstelle zur Stützstelle führt (**Bild 5.13**). Diese Querschnittsdeformation nimmt mit zunehmendem Offset ab, da sich die plastischen Bereiche von B2 und B3 nicht mehr überlagern. Gleichzeitig nimmt dadurch die Geometrieabweichung zu. Dies macht sich durch

einen leicht S-förmigen Verlauf des geraden Abschnitts nach dem Kreisbogen bemerkbar (**Bild 5.13c**).

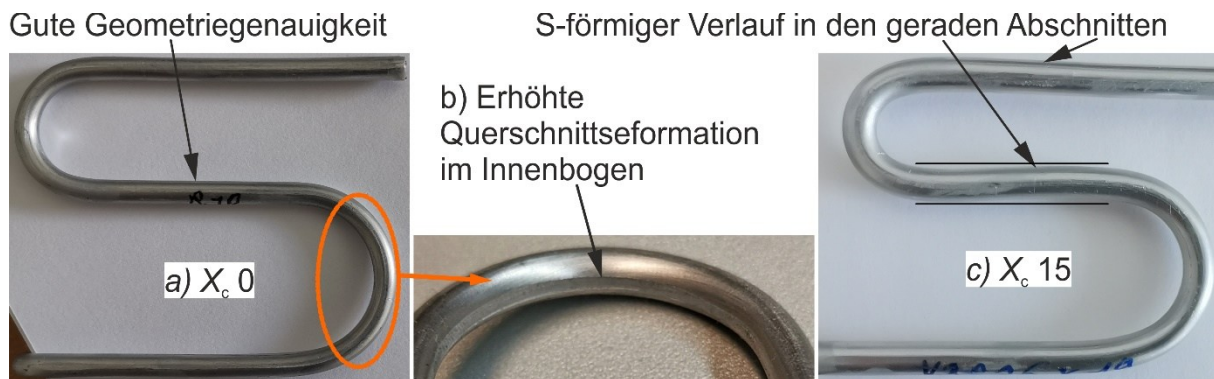


Bild 5.13: Einfluss eines großen und kleinen Offsets

Der S-förmige Verlauf lässt sich vor allem durch die Rückfederung erklären. Durch den höheren Abstand zwischen B3 und B2 kommt es zu deutlich geringeren Wechselwirkungen zwischen den beiden Biegungen, sodass die Rückfederung für beide Bereiche nun unabhängig voneinander erfolgt. Für B3 bedeutet das, dass diese nicht mehr in Achsrichtung erfolgen kann, wodurch nun solche Verläufe entstehen. Durch die räumliche Trennung der beiden plastischen Bereiche B2 und B3 reicht die Streckkraft des Vorschubs nicht mehr aus, um das gebogene Profil wieder gerade zu ziehen. Durch den längeren Hebelarm wird außerdem ein deutlich längerer Abschnitt elastisch verdrillt, der nach dem Entlasten ebenfalls die Rückfederung verstärkt.

Die Verdrehung bei gleichem Offset ist unabhängig vom Stützstelle-Radius (**Bild 5.14**). Hier sind die Verdrehungen des oberen Abschnitts bei unterschiedlichem Stützstellen-Radius und unterschiedlichen Offset dargestellt. Dabei ist die gefahrene Strecke der Kreisbahn von „Stützstelle-Radius 17,5, $X_c 15$ “ und „Stützstelle-Radius 26,2, $X_c 0$ “ gleich groß. Dadurch ist ersichtlich, dass die Verdrehung des oberen Abschnitts trotz eines größeren Weges nahezu unverändert bleibt.

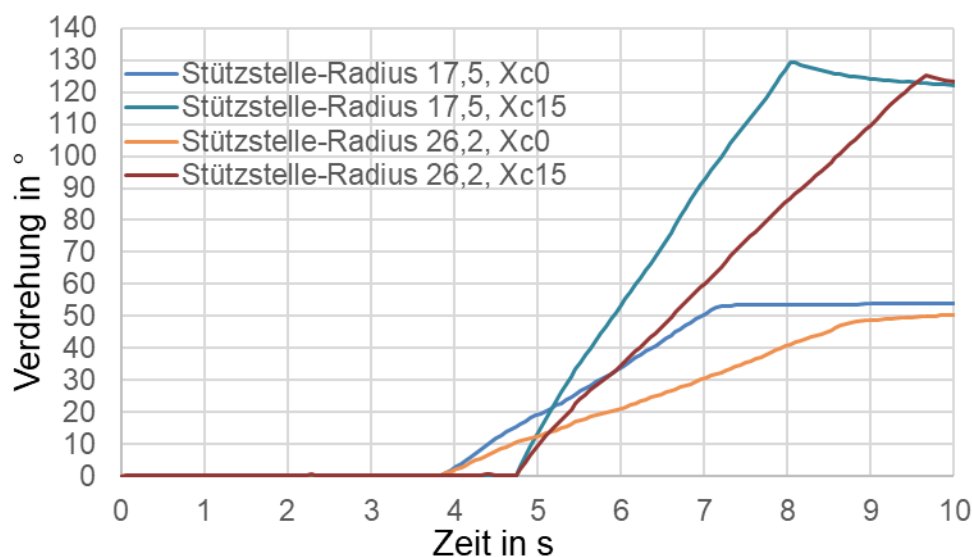


Bild 5.14: Verdrehung bei unterschiedlichem Stützstelle-Radius

Die Verdrillung verteilt sich bei größeren Biegeradien auf einen längeren Profilabschnitt, was dazu führt, dass die Gesamtverdrillung zwar gleich groß bleibt, aber die Verdrillung pro mm Profillänge abnimmt (**Tabelle 5.1**).

Tabelle 5.1: Verdrehung und Verdrillung des Profils

Offset	Biegeradius r_m	Verdrehung β	Verdrillung γ	Verdrillung pro Länge
mm	mm	°	°	°/mm
0	17,5	53	127	2,31
0	26,2	49	131	1,59
15	17,5	130	50	0,91
15	26,2	126	54	0,66

- **Reibung zwischen Profil und Werkzeug**

Der Einfluss der Reibung zwischen Profil und Biegekopf wurde bereits in 1D beschrieben und ist bei 2D identisch. An dieser Stelle soll auf die Reibung zwischen Profil und Werkzeug/Stützstelle eingegangen werden. Diese wirkt sich je nach Fall und Lage des Kontaktpunktes (**Bild 5.11**), unterschiedlich aus (**Bild 5.15**).

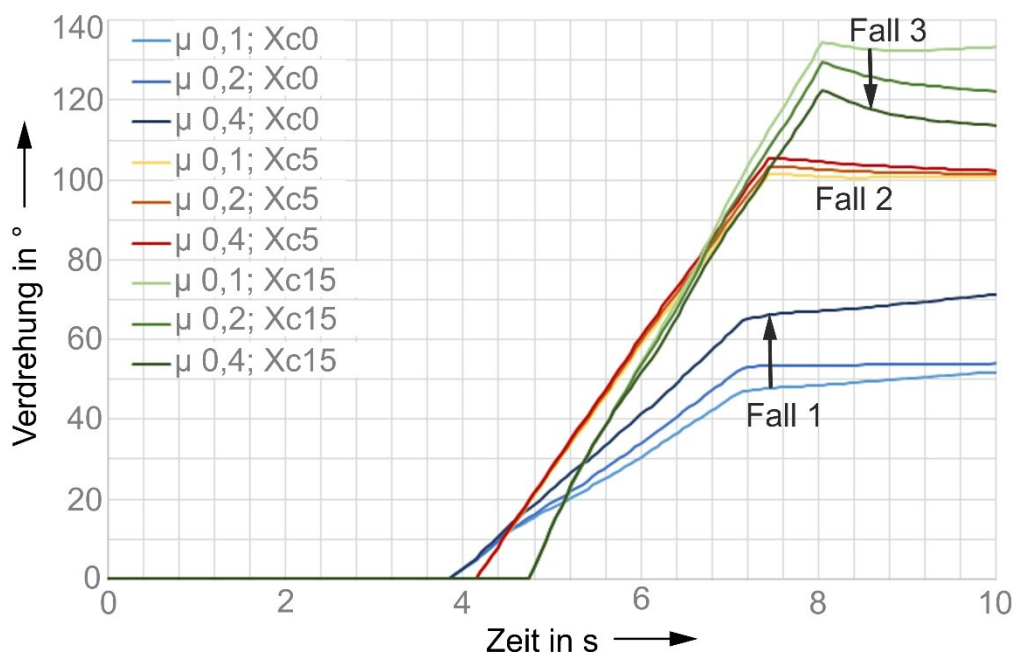


Bild 5.15: Einfluss Reibung

Ohne zusätzlichen Offset (Fall 1) ist der Hebelarm zur Kontaktstelle kleiner, sodass sich das Profil nur wenig verdreht und mehr verdrillt. Vor allen bei Offsets, die gegen 0 gehen, ist dabei ein Stick-Slip-Effekt bei der Verdrillung in der Umformzone zu beobachten (**Bild 5.16**). Dabei wird durch das Anlehnen an die Stützstelle ein Moment aufgebaut, bis dieser den entsprechenden Verdrehwiderstand erreicht hat, und es in eine Drehung um die Längsachse kommt (Ver-

drillung) und dann wieder von vorne beginnt (**Bild 5.10**). Mit steigendem Reibungskoeffizienten nimmt auch der Widerstand zu, was zur reduzierten Verdrillung des Profils und größeren Kraftspitzen an der Werkzeugform in Z-Richtung führt (**Bild 5.16**). Dieser Effekt konnte auch in den Experimenten beobachtet werden, dadurch dass bei kleinen Offsets in den Kreisbögen die Verdrehung des Biegekopfes nicht gleichmäßig, sondern in kleinen Sprüngen erfolgte. Mit steigendem Offset wurde die Drehbewegung immer gleichmäßiger. Durch den größeren Offset nimmt der Abstand zwischen Kontaktstelle und Kraftangriffspunkt zu, dies hat zur Folge, dass der Einfluss der Reibung sinkt.

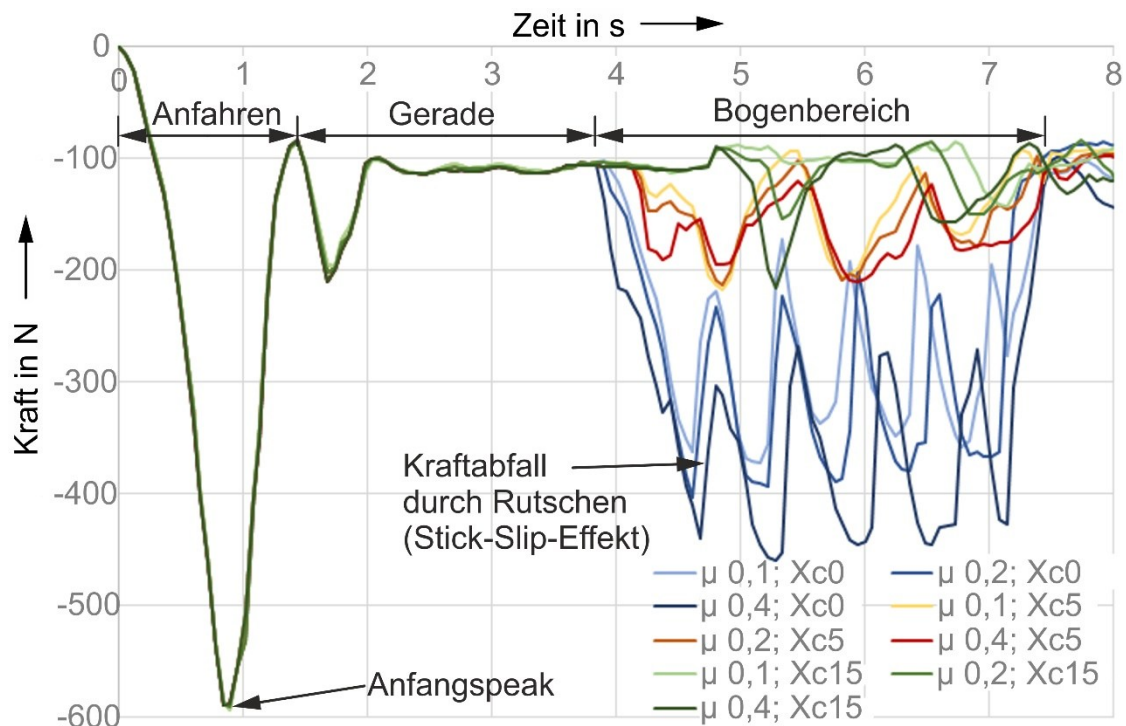


Bild 5.16: Resultierende Kraft an der Werkzeugform in Z-Richtung

Wird dieser deutlich größer, sodass sich die beiden plastischen Bereiche von B2 und B3 nicht mehr überlagern (Fall 3), verdreht sich das Profil bei einem größeren Offset mit steigender Reibung weniger (**Bild 5.15**). Dies ist allerdings nicht auf die Verdrillung des abgelegten Bereichs zurückzuführen, sondern auf eine Geometrieabweichung. So wird z. B. das kreisrunde Profil überwiegend durch die Reibkraft (F_r) zwischen Stützstelle und Profil hinter der Stützstelle gehalten. Nimmt diese ab, so kann sich das Profil, nachdem der Biegekopf weitergefahren ist und die Anpresskraft sich verringert hat, über die Stützstelle verdrillen und im Anschluss sogar über die Stützstelle gezogen werden. Durch den längeren Offset und daraus resultierenden Hebelarm wird außerdem ein deutlich längerer Abschnitt elastisch verdrillt, der nach dem Entlasten ebenfalls zu einer Rückfederung um die Mittelachse führt, und so das Profil leicht vom Boden abheben kann. Hier ist meist eine Mindestreibkraft zwischen Stützstelle und Profil erforderlich. Diese kann in erster Linie durch den passenden Reibungskoeffizienten erreicht werden oder auch durch die Erhöhung der Vorschubkraft und damit eine höhere Anpresskraft an die Stützstelle. In **Bild 5.17** sind zwei solcher Beispiele dargestellt. Man erkennt, wie bei einem höheren Reibungskoeffizienten das Profil hinter der Stützstelle liegen bleibt (**Bild 5.17a**) und bei einem geringeren Reibungskoeffizienten das Profil über die Stützstelle zu verdrillen beginnt

(Bild 5.17b). Dies führt schlussendlich zur scheinbar zunehmenden Verdrillung bei abnehmender Reibung. Dieser Effekt tritt ebenfalls unabhängig vom Stützstellendurchmesser auf. Eine konstruktive Anpassung der Stützstelle ist hier zu empfehlen.

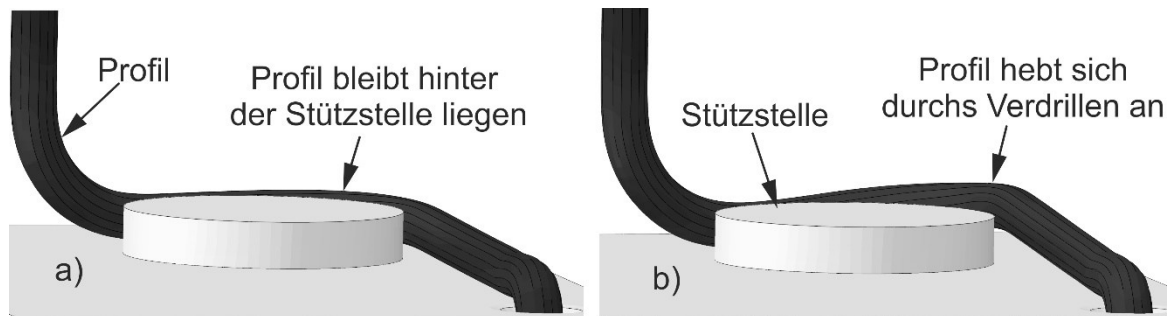


Bild 5.17: Einfluss Reibungskoeffizient: a) $\mu=0,4$, b) $\mu=0,1$

• Werkstückwerkstoff

Ein weiterer Einflussfaktor ist der Werkstückwerkstoff. Dieser hat einen Einfluss auf die Bahnplanung und die Rückfederung. Mit steigender Werkstofffestigkeit steigen proportional die Umformkräfte. Größere Umformkräfte führen dazu, dass die Vorschubkraft steigt und damit auch die Belastung des Biegekopfes. Dieser verbiegt sich dadurch stärker, was durch die Kinematik wieder kompensiert werden muss. Diese Durchbiegung ist über den gesamten Verlauf konstant und kann durch einfache Versuche ermittelt werden, vor allem weil die Gestaltung des Biegekopfes komplex ausfallen kann.

Mit steigender Werkstofffestigkeit nimmt die Rückfederung zu, was sich teilweise durch eine zunehmende Geometrieabweichung bemerkbar macht. Gleichzeitig nimmt die Querschnittsdeformation ab, da der Werkstoff durch den Kontakt mit der Stützstelle sich proportional weniger deformiert. Dagegen ist nahezu kein Einfluss des Werkstoffs auf die Verdrillung/Verdrehung des Profils zu erkennen. Diese bleibt trotz der Verwendung unterschiedlicher Werkstoffe unverändert (Bild 5.18), verglichen werden Al 99,5 und E235.

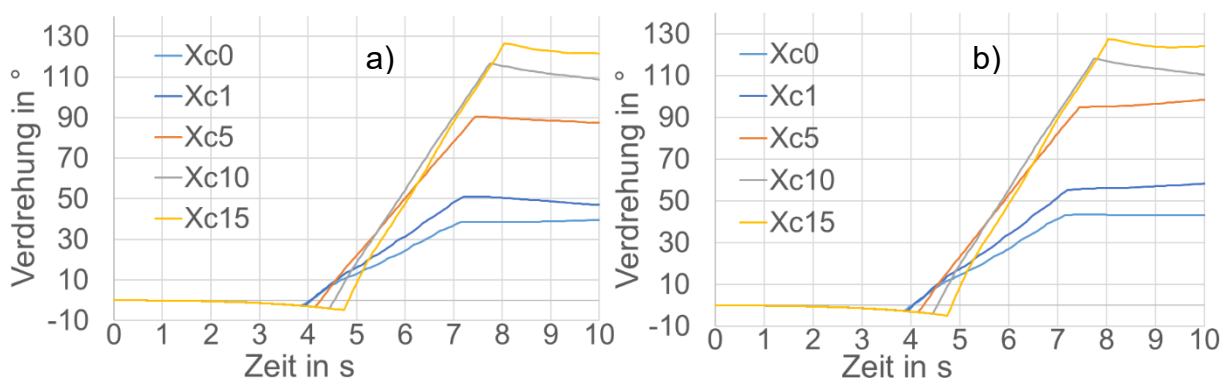


Bild 5.18: Vergleich Verdrehung Biegekopf: a) Al 99,5, b) E235

- **Biegekopfradius**

Einen komplexeren Einfluss hat die Variation des Biegekopfradius. In erster Linie verändern sich durch den Biegekopfradius der Biegeradius r_m und die Biegekopfabmessungen. Dies führt dazu, dass mit steigendem Biegekopfradius das Biegemoment abnimmt. Dementsprechend verändert sich auch die gesamte Kette über die Reibkräfte bis zur Vorschubkraft. Das heißt, es treten bei steigendem Biegekopfradius ähnliche Phänomene auf wie bei sinkendem Reibungskoeffizienten, da auch die Anpresskraft an die Stützstellen und die Biegeform geringer wird. Andersherum steigt diese mit kleiner werdendem Biegeradius. Dieser kann nicht endlos klein werden, da sonst der Werkstoff durch die Doppelbiegung zu stark belastet wird und es zur Querschnittsdeformation in Form von Ovalisierung des Profils oder sogar Rissen kommen kann. Die Experimente haben gezeigt, dass Biegefaktoren von 2 bis 3 einen guten Arbeitsbereich darstellen.

5.2.3 Zusammenfassung

Abschließend wird in **Tabelle 5.2** der Zusammenhang zwischen den wichtigsten Parameter und deren Auswirkungen, für den Fall einer Zunahme des genannten Parameters, dargestellt. Bei einer Abnahme des Parameters ist entsprechend mit einer Umkehr der Auswirkungen zu rechnen.

Tabelle 5.2: Zusammenfassung der Auswirkungen

Parameter (Zunahme)	Auswirkungen			
	Vorschubkraft	Querschnittsdeformation	Geometrie-genauigkeit	Verdrillung
Biegekopfradius	nimmt ab	nimmt ab	nimmt ab	nimmt leicht ab
Werkstoff (Festigkeit)	nimmt zu	nimmt ab	nimmt ab	unverändert
Reibung Biegekopf	nimmt zu	nimmt zu	nimmt ab	unverändert
Reibung Stützstelle	unverändert	unverändert	nimmt zu	nimmt ab
Versatz	unverändert	nimmt ab	nimmt ab	nimmt zu

5.3 Mechanismen in 3D

Abschließend wird das 3D-Biegen, erläutert. Damit ist eine Bewegung in allen drei Achsen zu verstehen. Als dritte Achse ist hierbei vor allem die Z-Achse gemeint. Die Bewegung muss nicht durchgehend in allen drei Achsen gleichzeitig erfolgen, es ist ausreichend, wenn der 2D-Bereich (die Ebene) einmalig verlassen wird und die Abstützung durch den Werkzeugboden entfällt. Weiterhin ist darauf hinzuweisen, dass es in der Praxis keine 2D- oder 3D-Geometrie gibt, sondern dass es sich je nach Komplexität und Länge der gesamten Geometrie um einen nahtlosen Übergang zwischen den einzelnen Arten innerhalb eines Bauteils handeln kann.

Um den Rahmen dieser Arbeit einzuhalten, wurden nur charakteristische Geometrien untersucht, die deutlich zeigen, wie sich das Verfahren von den bekannten Biegeverfahren unterscheidet und worauf es dabei ankommt. In **Bild 5.19** ist eine der untersuchten 3D-Geometrien dargestellt. Dabei handelt es sich um eine Form, die einer "8" ähnelt, mit einer Ausdehnung in der dritten Ebene. Dadurch ist es möglich, mehrere dieser Geometrien übereinander zu positionieren. Die einzige Begrenzung dabei ist die vertikale Ausdehnung der Stützstellen und des Biegekopfes, da diese sich mit zunehmender Länge immer stärker verbiegen können.

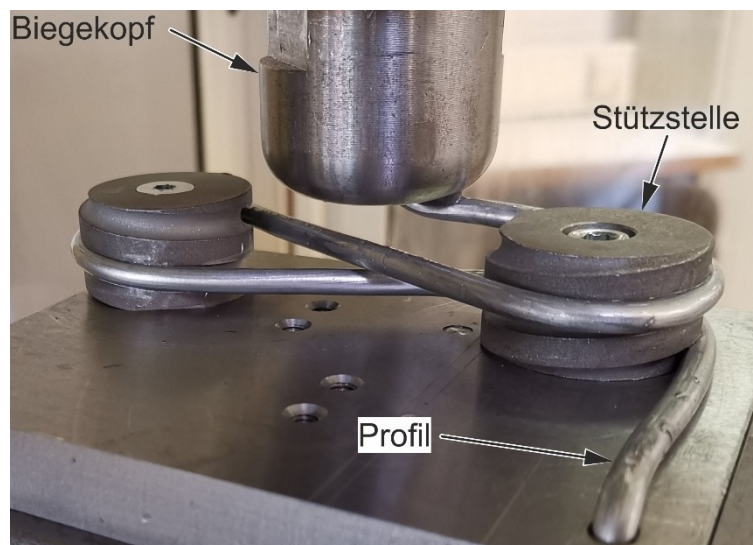


Bild 5.19: Experimenteller Aufbau einer 3D-Geometrie

An diesem Beispiel wird ersichtlich, welche Vorteile dieses Verfahren gegenüber den bekannten Verfahren bietet. Bei den bekannten Biegeverfahren ist der Biegekopf räumlich fix und das Profil durchläuft diesen, wird dabei entsprechend umgeformt und weitergefördert. Dies führt zwangsläufig dazu, dass, wenn Geometrieabschnitte sich nahekomen, es zur Kollision mit der Werkzeugform oder mit anderen Maschinenelementen kommen kann. Außerdem kommt es bei bekannten Verfahren bei langen Profilen zur Schwingung des bereits den Biegekopf durchlaufenen Abschnitts. Beim Inkrementellen Biegen im Gesenk wird die Kinematik hauptsächlich vom Biegekopf durchgeführt und das Profil bleibt nach dem Ablegen lokal fest in der Werkzeugform/Stützstelle liegen. Dieser Vorteil kommt vor allem bei 3D-Geometrien zum Tragen, so dass Geometrien, die sich kreuzen oder sich nahekomen, kein Problem darstellen, wie in **Bild 5.19** ersichtlich ist. Auch das Schwingen von langen Geometrien stellt kein Problem dar, da beim inkrementellen Biegen das Profil durch die Werkzeugform oder Stützstellen je nach Bedarf gestützt werden kann.

5.3.1 Beschreibung des Umformprozesses/Umformzone

Beim 3D-Umformen wird das Profil je nach Geometrie um eine Stützstelle gebogen. Dabei ist die Geometrie möglichst flach anzuordnen. Das gestapelte Fertigen von ähnlichen Geometrien in gleicher Aufspannung ist ebenfalls möglich. Diese müssen von unten nach oben angeordnet und abgelegt werden, um Kollisionen zu vermeiden. Höhenverläufe innerhalb einer Geometrie sind in beide Richtungen möglich, solange eine Kollision ausgeschlossen werden kann.

Eine wesentliche Änderung gegenüber 2D ist, dass sich der Biegekopf nicht mehr frei über die Stützstellen bewegen kann, sondern dass diese in der Regel vollständig umfahren werden müssen, da diese nun ebenfalls eine 3D-Ausdehnung haben. Dadurch wird der Versatz größer und man befindet sich durchgehend im Fall 3 (**Bild 5.11**), was die Biegeposition B3 angeht. Umformtechnisch erfolgt hier eine Kombination und Vermischung aus den unter 2D-Horizontal und 2D-Vertikal beschriebenen Mechanismen, nur dass die stützende Wirkung durch den Werkzeugboden entfällt und das Profil nur noch durch die Stützstelle geführt wird (**Bild 5.20**).

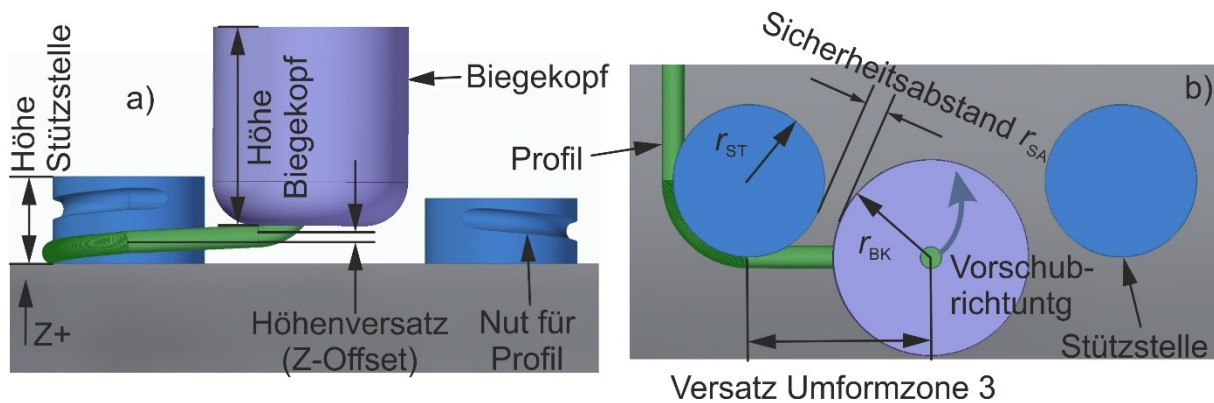


Bild 5.20: 3D-Umformen Prinzipskizze: a) Seitenansicht, b) Draufsicht

Durch die fehlende Abstützung des Werkzeugbodens wird das Profil nicht mehr vollständig zurückgebogen. Ein Teil der Biegung B3 wird dabei als elastische Energie gespeichert, die nach dem Entlasten, das teilweise durch das Weiterfahren des Biegekopfes erfolgt, langsam freigesetzt wird. Durch diese Rückfederung entsteht ein Höhenversatz (Z-Offset) zwischen dem Austritt aus dem Biegekopf und der Position an der Stützstelle, der bei der Planung der Kinematik berücksichtigt werden muss (**Bild 5.20**). Dieser Z-Offset steigt mit der Entfernung zwischen dem aktuellen Kontakt an der Stützstelle und der aktuellen Position des Biegekopfes. Dabei ist eine Kompensation in der Z-Richtung notwendig. Bei horizontalen und vertikal steigenden Abschnitten erfolgt die Z-Offset Anpassung in positiver Z-Richtung. Dagegen erfolgt bei vertikal abnehmenden Abschnitten die Kompensation in negative Z-Richtung. Dadurch kommt es zu einem komplexen Sprung der Kinematik in der Z-Achse bei einer Umkehr der Z-Steigung der Geometrie.

5.3.2 Einflussparameter

Die Gestaltung der Werkzelemente und der Kinematik ist ein Einflussparameter, der sich aus der Geometrie ableiten lässt. Der Höhenversatz ist damit der einzige Mechanismus, der bei

3D hinzukommt. Daher soll in diesem Abschnitt auf die folgenden Punkte und deren Einfluss näher eingegangen werden:

- Gestaltung der Stützstellen,
- Biegekopfradius r_{BK} ,
- Sicherheitsabstand r_{SA} zwischen Stützstelle und Biegekopf und
- Höhenversatz (Z-Offset).

• Gestaltung der Stützstellen

Für 3D-Geometrien werden hauptsächlich Stützstellen verwendet. Diese müssen vollständig umfahren werden und können je nach Geometrie komplex werden. Dabei ist die Gestaltung der Stützstellen bzw. der Oberfläche von großer Bedeutung. Während bei 2D noch ohne große Geometrieabweichungen glatte Stützstellen eingesetzt werden konnten, ist bei 3D-Geometrien dies nicht mehr ohne weiteres möglich. Um ausreichende Genauigkeit zu erreichen, sind angeraute Stützstellen oder solche mit einer leichten Nut, wie in **Bild 5.20** dargestellt, zu verwenden. Beide Variationen bieten Vor- und Nachteile. Nuten ermöglichen eine bessere Positionierung des Profils und verhindern das Verrutschen während der Umformung. Dadurch können leichte Schwankungen in der Kinematik oder Prozessschwankungen kompensiert werden. Durch ihre Form kann das Profil besser abgestützt werden, da das Bauteil nicht nur punktuell, sondern flächig anliegt. Dies reduziert die Querschnittsdeformation im Innenbogen messbar im Vergleich zu Stützstellen ohne Nut, insbesondere bei weichen Werkstoffen. Tiefe Nuten erschweren das Entnehmen des fertigen Bauteils. Dadurch kann das Werkstück nach dem Umformen unter Umständen nicht mehr zerstörungsfrei entnommen werden. Teilweise kann dies durch das Lösen der Stützstelle dennoch erfolgen, was aber bei einer Serienfertigung zu Problemen wie Taktzeiterhöhung führen kann.

Es ist auch möglich, Stützstellen ohne Nuten zu verwenden. Diese erfordern eine angeraute Oberfläche, um das Verrutschen des Bauteils während des Umformens zu minimieren. Diese Stützstellen sind fertigungstechnisch einfach herzustellen, da das Anrauen durch z. B. Sandstrahlen erfolgen kann, erfordern aber eine aufwendige Anpassung der Kinematik und einen konstanten und gleichförmigen Prozessablauf um eine gute Geometriege nauigkeit zu erreichen. Besonders kritisch dabei sind Richtungswechsel, bei denen z. B. eine Maschinenachse zugeschaltet wird oder ein Geometriewechsel (z. B. Übergangspunkt von einer Gerade in einen Kreisbogen). Diese können zu einem kurzen Übergangsstopp des Vorschubs, bedingt durch die Steuerung der Maschine, führen, der in einem kurzen Peak in der Vorschubkraft resultieren kann und sich dadurch negativ auf die Geometriege nauigkeit auswirkt. Vor allem bei verhältnismäßig geringen Vorschubkräften kann es leicht zu einem Verrutschen des Profils um die Stützstelle kommen.

Der Einfluss der Stützstellen auf die Mechanismen ist der minimale Abstand zwischen B2 und B3. Je tiefer die Nut für die Fixierung der Stützstelle wird, desto größer muss auch der Abstand zwischen B2 und B3 und damit der Abstand zwischen Biegekopf und Stützstelle werden.

- **Biegekopfradius r_{BK}**

Ähnlich verhält es sich mit der Gestaltung des Biegekopfes und des Biegekopfradius. Diese beiden Größen hängen direkt miteinander zusammen. Je größer diese werden, desto größer werden der Versatz und der Radius der Kreisbahn um die Stützstellen und damit auch der Abstand zwischen B2 und B3 (**Bild 5.21**). Ebenfalls steigt damit auch der kleinste mögliche Abstand zwischen den Stützstellen. Für eine ausreichende Steifigkeit des Biegekopfes darf der Durchmesser der Biegekopfes nicht zu klein werden, sodass hier immer ein Kompromiss getroffen werden muss. Zusätzlich verändert sich dadurch der Höhenversatz. Dieser Zusammenhang ist nur gering und muss erst bei Änderungen in zweistelligen Millimeterbereich angepasst werden.

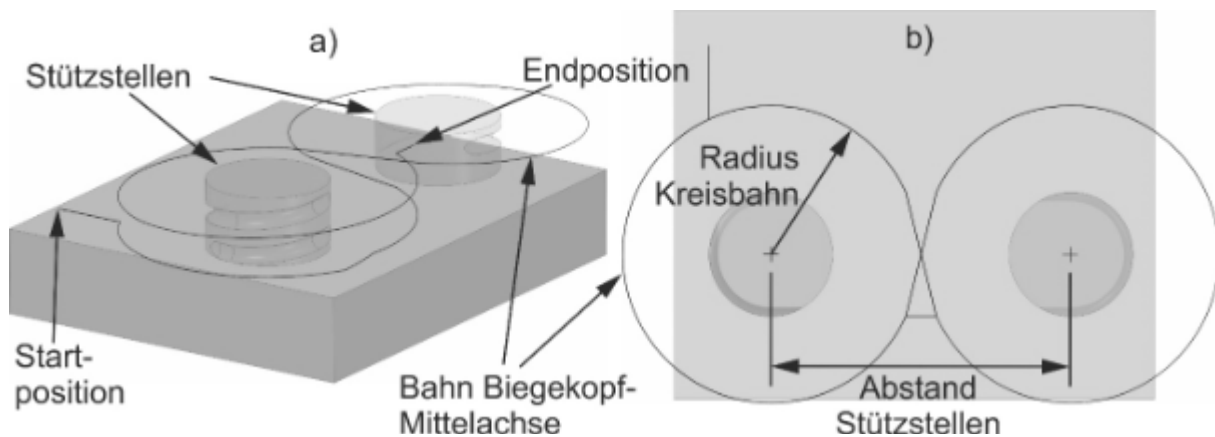


Bild 5.21: 3D Geometriepanung: a) 3D-Ansicht, b) Draufsicht

- **Sicherheitsabstand r_{SA} zwischen Stützstelle und Biegekopf**

Ein weiterer relevanter Aspekt ist der Sicherheitsabstand zwischen Biegekopf und Stützstelle. Um die Stützstellen umfahren zu können, muss der Biegekopf länger werden, um eine Kollision mit dem Profilvorschub zu vermeiden. Mit der zunehmenden Länge der Vorrichtung sinkt die Steifigkeit. Dies führt dazu, dass der Radius der Kreisbahn um die Stützstelle um einen konstanten Wert, einem sogenannten Sicherheitsabstand, vergrößert werden muss (**Bild 5.20**). Dieser Sicherheitsabstand resultiert aus der Steifigkeit der Vorrichtung und dient der Kollisionsvermeidung. Dieses Maß hat keinen Einfluss auf den Versatz, da dadurch nur die Steifigkeit der Vorrichtung kompensiert wird. Dadurch wird der Mindestabstand zwischen den Stützstellen größer (**Bild 5.21**), was Einfluss auf mögliche Geometrien hat.

- **Höhenversatz (Z-Offset)**

Der letzte Parameter ist der Höhenversatz, dieser resultiert aus anderen Parametern. Den größten Einfluss hat dabei die Vorschubkraft. Steigt diese, z. B. durch einen höheren Reibungskoeffizienten, engeren Biegekopfradius oder Spannungsüberlagerung durch den Vorschub, so nimmt der Z-Offset ab. Durch die steigende Vorschubkraft wird das Profil in Achsrichtung

gestreckt und dadurch näher in den plastischen Umformbereich gebracht. Dadurch wird das Profil an der Biegeposition (B2) stärker plastisch umgeformt als bei geringerer Vorschubkraft. Zusätzlich wird es stärker durch die Vorschubkraft gestreckt, sodass die Krümmung stärker zurückgebogen wird. Die Rückfederung findet dadurch mehr in Achsrichtung statt, ähnlich wie beim Streckbiegen. Andersherum führt ein größerer Versatz X_v zu einem größeren Z-Offset. Dies ist vor allen bei längeren geraden Abschnitten von Bedeutung, da dies bei der Bahnplanung berücksichtigt und kompensiert werden muss (Kapitel 6.3), Z-Offset Feinanpassung 3D.

Durch den Höhenversatz ändert sich auch der Biegeradius an der Stelle B2 leicht. Dieser wird effektiv, durch den Z-Offset, größer, was sich auch auf die Reibung und das Kräftegleichgewicht auswirken kann. Damit sinkt auch die Vorschubkraft leicht. Diese Änderung ist allerdings zu vernachlässigen. In den untersuchten Szenarien konnte eine Vorschubkraftabnahme nach dem Abheben vom Werkzeugboden von ca. 10 % beobachtet werden gegenüber der Anfahrstrecke derselben Geometrie mit Werkzeugbodenkontakt.

5.4 Analytische Ansätze zum Auslegen des Verfahrens

Nachfolgend sollen die Berechnungen für relevante Parameter des Verfahrens dargestellt werden. Diese können sowohl für die Berechnung der Kinematik als auch die Abschätzung der Kräfte, Spannungen und Dehnungen im Profil herangezogen werden.

5.4.1 Berechnung des Versatzes

Wie bereits beschrieben, ist der Versatz die tangentielle Verschiebung zwischen der Mittelachse des Biegekopfes und der Mittelachse der Sollgeometrie. Er entspricht näherungsweise dem Abstand zwischen B2 und B3, also der Position für den seitlichen Kontakt/die seitliche Biegung in der Werkzeugform. Dabei ist X_v der vollständige Versatz, der sich aus X_c den Mindestversatz und einem weiteren individuellen Offset X_o zusammensetzt. Der individuelle Offset wird je nach Biegeprozess angepasst und hat daher keine konkrete Berechnung. Er wird in den Experimenten auch dazu genutzt um die seitliche Auslenkung des Biegekopfes beim Biegen auszugleichen (Sicherheitsabstand). Berechnet werden kann der Versatz nach der folgenden Formel:

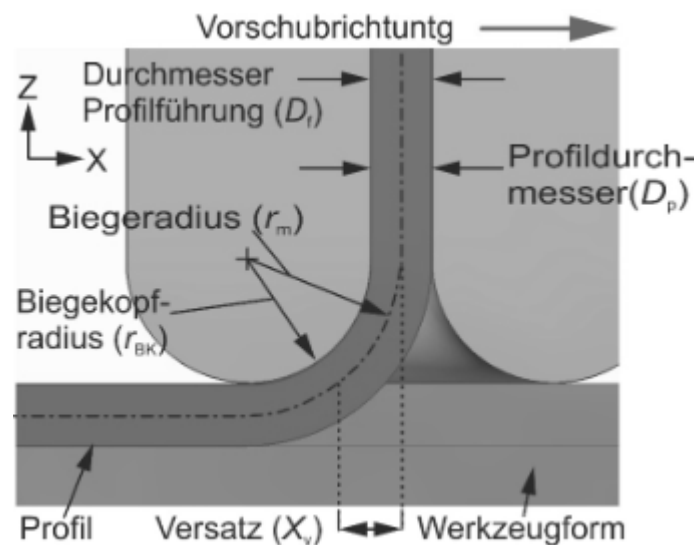


Bild 5.22: Bezeichnung der Einzelemente am Biegekopfaustritt

$$X_v = X_c + X_o, \quad (5.1)$$

$$X_v = \left(r_m + \frac{D_f}{2} \right) - \sqrt{\left(r_m + \frac{D_p}{2} \right)^2 - r_m^2} + X_o. \quad (5.2)$$

Dabei wird berücksichtigt, dass der Durchmesser in der Profilführung immer etwas größer ist als der Durchmesser des Profils. Der Versatz ist ein sehr wichtiger Aspekt für die Berechnung der Kinematik, vor allem bei 2D. Der Versatz hat einen hohen Einfluss auf das Umformverhalten des Profils (siehe Kap. 5.2).

5.4.2 Berechnung der Biegemomente und der Vorschubkraft

Für die Betrachtung der Mechanismen in der Umformzone wurden die beiden Bereiche der Umformzone B1 und B2 einzeln freigeschnitten und analytisch untersucht. **Bild 5.23** stellt dabei die Freischnitte der beiden Biegungen dar. (vgl. Holstein et al., 2020).

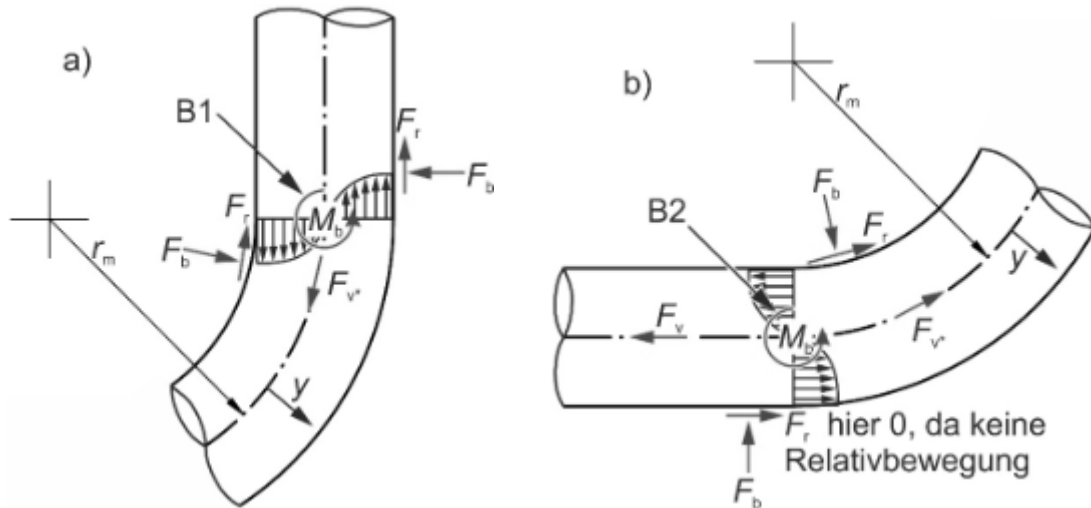


Bild 5.23: Freischnitt der Umformbereiche a) B1 und b) B2

Bei diesem Modell wird davon ausgegangen, dass der Draht in der Einspannung fixiert ist und das Durchziehen des Drahtes durch die Vorschubeinheit erzeugt wird. Dabei ist die für den Vorschub benötigte Kraft äquivalent der Kraft F_v , die in der Einspannung wirkt. Als F_{v*} wird die Kraft bezeichnet durch die die Krümmung erzeugt wird (B1) und F_v ist die resultierende Kraft nach dem geradebiegen des Drahtes (B2) und der Vorschubkraft äquivalent. Während des Biegeprozesses stützt sich das Profil an der Drahtführung sowie an der Werkzeugform ab, wodurch die Biegekräfte F_b und die daraus resultierenden Reibkräfte F_r entstehen. Diese werden zu einem resultierenden Biegemoment M_r zusammengefasst. Weiterhin wird angenommen, dass beide Biegemomente von ihrem Betrag identisch sind, das Gleiche gilt auch für die Kräfte F_b und F_r . Damit kann nun das Momentengleichgewicht für die erste Biegung aufgestellt werden:

$$\sum M = 0 = -F_{v*} \cdot r_m + M_b + M_{r1}. \quad (5.3)$$

Zunächst muss der Spannungstensor bestimmt werden. Dabei wird angenommen, dass die Spannung in axialer Richtung maßgeblich für die Verformung der Biegeform verantwortlich ist. Des Weiteren werden hier alle Annahmen der elementaren Biegetheorie vorausgesetzt. Weiterhin wird bei der Berechnung des Biegemoments von einer vollplastischen Biegung ausgegangen, da der elastische Bereich hier vernachlässigbar klein ist. Somit kann der Tensor wie folgt reduziert werden zu:

$$\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_a & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.4)$$

Die Spannung σ_a kann aus dem Zugversuch mit Hilfe der Dehnungen ε_a bestimmt werden. Dabei kann die Verfestigung des Materials berücksichtigt werden. Es wird angenommen, dass die Spannungsverteilung im Draht symmetrisch ist und die geometrische Mittelebene des Querschnitts eine konstante Lage im Prozess hat und gleich mit der neutralen Ebene der Dehnung und Spannung ist (Hosford und Caddell 2007). Die Dehnung im Querschnitt kann demnach aus der Biegung des Drahtes nach Gleichung 2.1 berechnet werden. Dies führt zu einer logarithmischen Verformung im Profil:

$$\varphi_a = \ln \left(1 + \frac{y}{r_m} \right). \quad (5.5)$$

Das Biegemoment lässt sich nach Gleichung 2.7 berechnen. Dabei können die Ergebnisse aus dem Zugversuch für die Berechnung der Spannung verwendet werden, wobei die Fließkurvenbeschreibung durch mehrere Zugversuche gemittelt und nach Ludwik unter Verwendung des Ansatzes von Nadai und Wahl (1931) sowie Reihle (1961) approximiert wurde:

$$|\sigma_a| = k_f, \quad (5.6)$$

$$|\sigma_a| = C \cdot \varphi^n. \quad (5.7)$$

Die Spannung im Querschnitt wird der Spannung aus dem Zugversuch gleichgesetzt. Dabei sind C und n materialabhängige Konstanten:

$$C = R_m \left(\frac{e}{n} \right)^n \quad (5.8)$$

und

$$n = \varphi_{gl}. \quad (5.9)$$

Die Fläche dA wird entsprechend den Abmaßen des Querschnitts berechnet, für z. B. runde Querschnitte kann die Fläche nach der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$dA = b \cdot dy = 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{D}{2}\right)^2 - y^2}, \quad (5.10)$$

wobei $\frac{D}{2}$ der halbe Durchmesser des Profils ist.

Aus dem errechneten Biegemoment lassen sich nun die resultierenden Kräfte F_b und F_r bestimmen, die sich durch die Abstützung am Biegekopf ergeben.

$$M_b = 2 \cdot F_b \cdot \frac{D}{2}, \quad (5.11)$$

$$F_b = \frac{M_b}{D}. \quad (5.12)$$

Die Reibungskraft F_r kann nun unter der Verwendung des entsprechenden Reibungskoeffizienten berechnet werden mit:

$$F_r = F_b \cdot \mu. \quad (5.13)$$

Da die Reibkraft nun bestimmt ist, kann diese der Einfachheit halber zu einem Reibungsmoment zusammengefasst werden:

$$M_{r1} = F_r \cdot r_i + F_r \cdot r_a, \quad (5.14)$$

mit

$$r_a = r_m + \frac{D}{2} \quad (5.15)$$

und

$$r_i = r_m - \frac{D}{2}. \quad (5.16)$$

Da nun alle notwendigen Drehmomente bekannt sind, kann die Vorschubkraft für die erste Biegung durch das Gleichgewicht der Momente berechnet werden. Dazu wird die Gleichung 5.3 nach der Vorschubkraft F_{V*} umgestellt:

$$F_{V*} = \frac{M_b + M_{r1}}{r_m}. \quad (5.17)$$

Nun kann das Gleichgewicht für die zweite Biegung aufgestellt werden:

$$\sum M = 0 = -F_v \cdot r_m + F_{v*} \cdot r_m + M_b + F_r \cdot r_i \quad (5.18)$$

Wie bereits erwähnt wird davon ausgegangen das M_b und F_r in beiden Biegungen gleich groß sind Die Reibungskraft an der Kontaktfläche zum Werkzeugboden ist zu vernachlässigen, da hier keine Relativbewegung zwischen Profil und Werkzeug stattfindet. Damit sind alle Drehmomente und Kräfte bekannt, sodass die resultierende Vorschubkraft durch das Gleichgewicht der Momente berechnet werden kann. Dazu wird die Gleichung 5.18 nach der Vorschubkraft F_v umgestellt:

$$F_v = F_{v*} + \frac{M_b + F_r \cdot r_i}{r_m} \quad (5.19)$$

Um die Aussagekraft dieses Ansatzes zu überprüfen, wurde ein FE-Modell entwickelt und ein Experiment aufgebaut (Kapitel 4.3). Dabei wurden die Vorschubkräfte in allen Richtungen aufgezeichnet und miteinander verglichen. In **Bild 5.24** sind exemplarisch die Kräfte in X-Richtung aufgetragen. Passend dazu ist im oberen Teil des Bilds die Lage des Profils an relevanten Punkten im Werkzeug dargestellt.

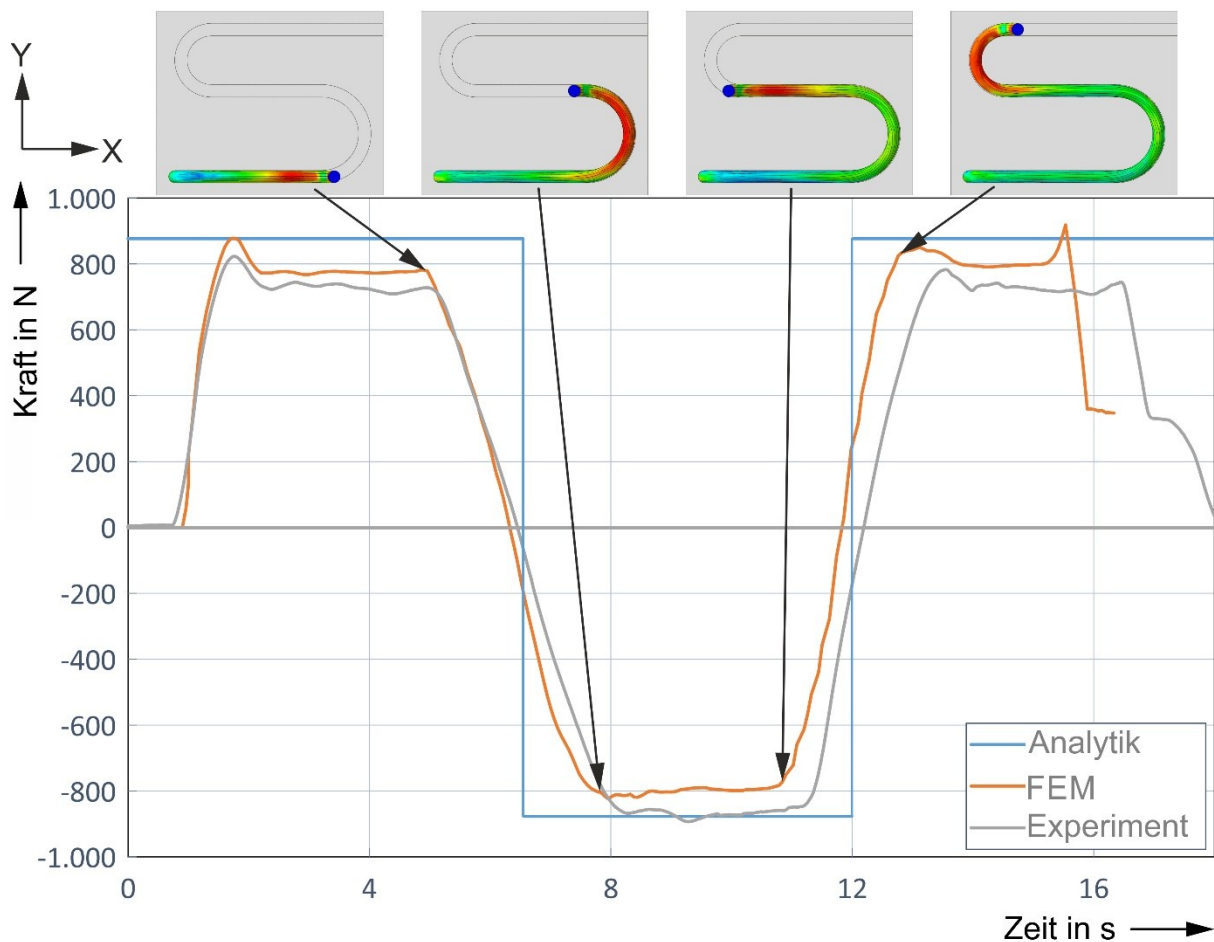


Bild 5.24: Vergleich Vorschubkräfte in X-Richtung, EN AW-6060 T6

Es ist eine gute Übereinstimmung der drei Modelle zu erkennen. Das analytische Modell liegt betragsmäßig etwas höher und wird nur in den Spitzen erreicht. Der Vergleich wurde sowohl mit dem weicheren Al 99,5 als auch mit dem festeren EN AW-6060 T6 durchgeführt. Die Übereinstimmung der drei Modelle war für beide Materialien vergleichbar. Dank der guten Übereinstimmung des analytischen Ansatzes ist es denkbar damit die Antriebe auszulegen oder die Umsetzbarkeit zu überprüfen.

Darüber hinaus zeigt sich, dass die Vorschubkraft vor allem eine materialabhängige Größe ist. Nach der Wahl eines Werkstoffs kann sie nur durch eine Anpassung der Reibung und des Biegekopfradius optimiert werden. Durch Versuche konnte gezeigt werden, dass die Umformgeschwindigkeit hier keinen signifikanten Einfluss hat. Eine höhere Umformgeschwindigkeit führt lediglich zu einer höheren Anfangsspitze, bevor der Wert auf einen konstanten Wert abfällt.

Die detaillierte Betrachtung der Reibung zeigt die wesentlichen Reibstellen und deren Anteil am Gesamtprozess. Dieser beträgt z. B. bei einem Reibungskoeffizienten von 0,1 ca. 26 % und bei einem Reibungskoeffizienten von 0,2 sogar 41 % der errechneten Vorschubkraft. Der Betrag für das Biegemoment bleibt dabei konstant. Dies macht deutlich, warum die Reibung in Kapitel 5 immer wieder als Einflussparameter vorkommt. Da die Reibung z. B. durch Schmierung oder konstruktive Maßnahmen verändert werden kann, kann diese auch zur Steuerung und Optimierung des Prozesses herangezogen werden. Abschließend soll noch erwähnt werden, dass für die Bestimmung der Fließkurve auch andere Ansätze verwendet werden können. Diese liefern je nach maximaler Dehnung vergleichbare Ergebnisse.

Des Weiteren wurde der Spannungsverlauf im Querschnitt des Profils untersucht. Es konnten hierfür nur die FEM und das analytische Modell miteinander verglichen werden. Für diesen Vergleich wurden die Kräfte entlang des Querschnitts der beiden Biegebereiche ausgewertet (**Bild 5.25**).

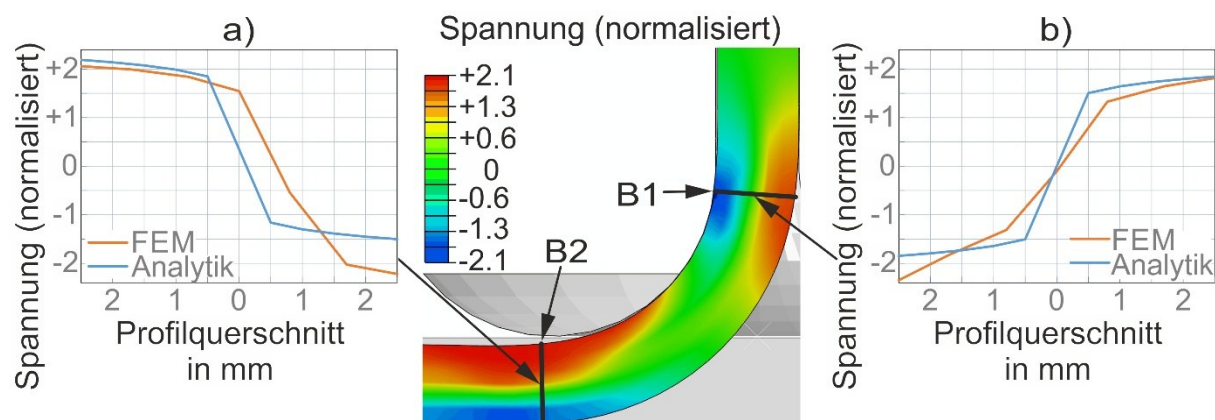


Bild 5.25: Spannungsverteilung in Längsachsenrichtung, normalisiert auf Streckgrenze:
a) Bereich Biegung 2, b) Bereich Biegung 1

Im Bereich B1 des Profils (**Bild 5.25b**) ist eine hohe Übereinstimmung im Zugbereich zwischen Analytik und FEM zu erkennen. Lediglich im Randbereich des Innenbogens ist eine leichte Abweichung zwischen den beiden Modellen zu beobachten, die auf den direkten Kontakt zwischen Profil und dem Biegekopf zurückzuführen ist. Die Reibung führt hier zu einem leichten

Anstieg der Druckspannung. Die Symmetrie des Spannungsverlaufs ist hier weitestgehend erhalten.

Im Bereich B2 des Profils (**Bild 5.25a**) ist im analytischen Modell die Überlagerung durch die Vorschubkraft berücksichtigt. Dies führt zu einer guten Übereinstimmung im Zugbereich, aber die Verschiebung der neutralen Achse im FE-Modell ist größer als im analytischen Modell. Darüber hinaus ist ein Einfluss des Kontaktes zur Werkzeugoberfläche im Druckbereich (Innenkurve) zu beobachten. Dieser kann der Grund für die Abweichung zwischen FEM und Analytik darstellen.

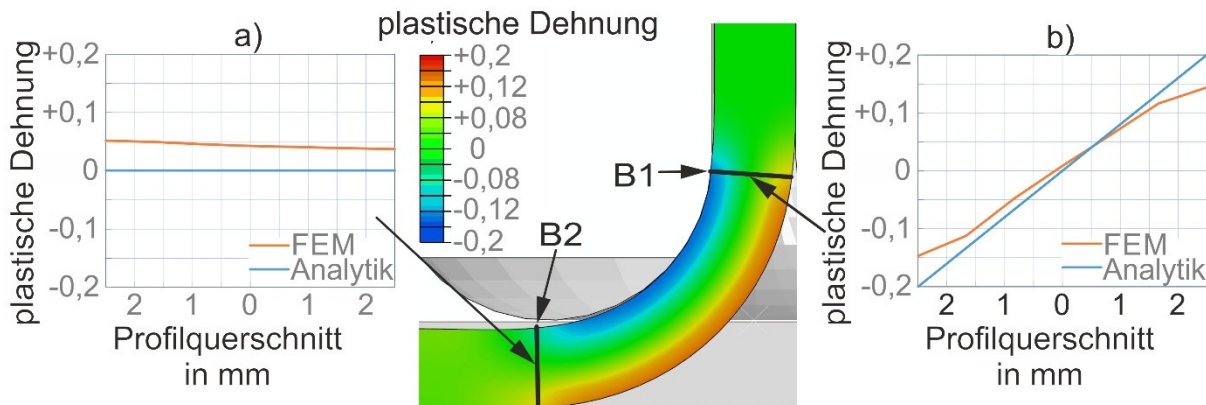


Bild 5.26: plastische Dehnungsverteilung in Längsachsenrichtung a) Bereich Biegung 2 b) Bereich Biegung 1

Schaut man sich die plastische Dehnung an den gleichen Stellen an, so ist ein ähnliches Verhalten feststellbar. Beim Eintritt in die Umformzone (**Bild 5.26b**) ist eine gute Übereinstimmung zwischen der FEM und der Analytik zu erkennen. Die Abweichung am Rand kann durch die Materialverfestigung erklärt werden. Im Austrittsbereich der Umformzone sind beide Kurven konstant (**Bild 5.26a**), es ist ein deutlicher Versatz zwischen den beiden Kurven zu sehen. Dieser Versatz entsteht durch die beiden Biegeprozesse, die der Draht durchläuft. Er ist analytisch nur schwer zu erfassen. Es erklärt auch den Versatz zwischen den beiden Modellen in **Bild 5.25a**. Darüber hinaus deutet eine bleibende Dehnung des Drahtes von 4-5 % auf eine Querschnittsverringerung hin und eine Verlängerung des Drahtes, die in den Experimenten beobachtet werden konnte.

5.4.3 Berechnung der Vorschubkraft mit Spannungsüberlagerung

Wie bereits in Kapitel 5.2 angedeutet, ist die Vorschubkraft ein wichtiger Einflussparameter. Diese lässt sich durch Biegekopfradius Änderungen oder durch Anpassung des Reibungskoeffizienten beeinflussen. Eine weitere Möglichkeit ist die Beeinflussung durch den Profilver Schub. Dazu kann durch den Vorschub oder eine zusätzliche Bremse eine Spannungsüberlagerung aufgebracht werden. Während die anfangs erwähnten Parameter bereits in der Grundgleichung berücksichtigt werden, ist die Überlagerung durch den Antrieb nicht darin enthalten und soll an dieser Stelle dargestellt werden.

Durch die Spannungsüberlagerung ändern sich die beiden Momentengleichgewichte (Gleichung 5.3 und 5.18), sodass diese nun um die aufgebrachte Kraft und den entsprechenden Hebelarm ergänzt werden, **Bild 5.27**.

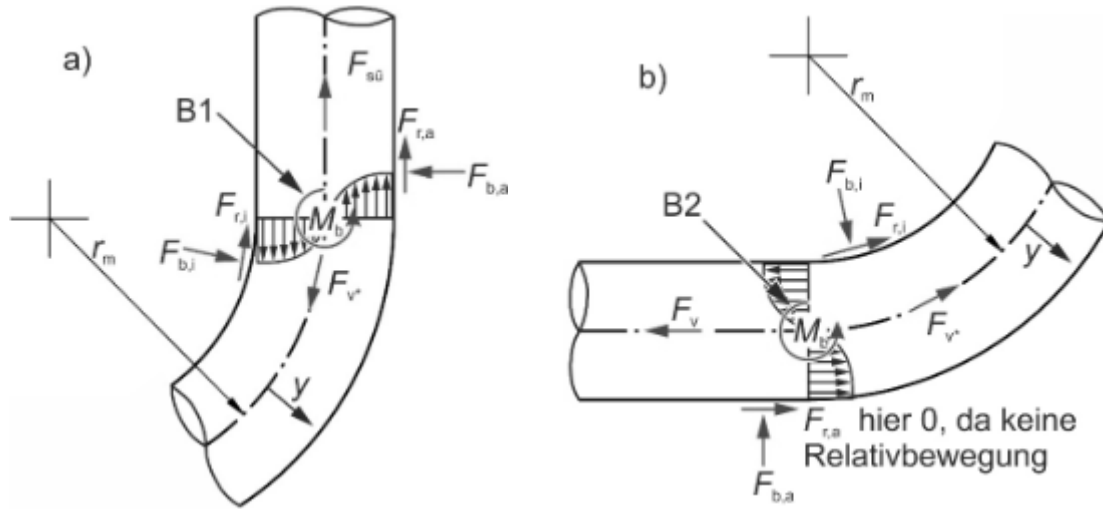


Bild 5.27: Freischnitt der Umformbereiche mit Spannungsüberlagerung a) B1 und b) B2

$$\sum M = 0 = -F_{v^*} \cdot r_m + M_b + M_{r1,sü} + F_{sü} \cdot r_m \quad (5.20)$$

und

$$\sum M = 0 = -F_v \cdot r_m + F_{v^*} \cdot r_m + M_b + F_r \cdot r_i \quad (5.21)$$

Weiterhin ändert sich durch die Spannungsüberlagerung die Biegekraft F_b zu $F_{b,i}$ im Innenradius und $F_{b,a}$ im Außenradius und dementsprechend auch die Reibkraft F_b sowie das resultierende Reibmoment $M_{r,sü}$ (**Bild 5.27**). An dieser Stelle soll festgehalten werden, dass die Spannungsüberlagerung sowohl positiv als auch negativ sein kann, entsprechend ändert sich auch deren Wirkrichtung/Vorzeichen, im dargestellten Beispiel wird mit einer Zugüberlagerung gerechnet.

Der Grund für die Auftrennung der Kräfte ist die Wirkung der Überlagerung. So sorgt z. B. eine Zugüberlagerung für eine deutlich höhere Anpressung des Profils an den Innenradius und damit auch für eine Entlastung im Außenradiusbereich. Daher müssen diese nun unabhängig voneinander betrachtet werden. Dazu werden die entsprechenden Biegemomente je nach Wirkrichtung der Kraft wie folgt berechnet:

$$M_{b,sü\pm} = \int_0^r (\sigma_a \pm \sigma_{sü}) \cdot y \cdot dA, \quad (5.24)$$

wobei

$$\sigma_{s\ddot{u}} = \frac{F_{s\ddot{u}}}{A} \quad (5.25)$$

ist. Dabei wird von einer vollplastischen Biegung ausgegangen und die Verschiebung der Symmetrie wird vernachlässigt (**Bild 5.28**).

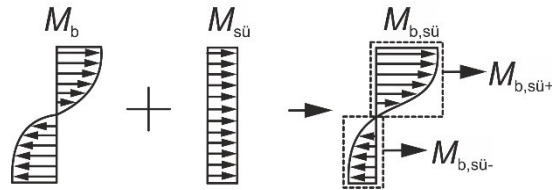


Bild 5.28: Zusammensetzung des Biegemoments bei Spannungsüberlagerung

Mit den neuen Biegemomenten können nun die entsprechenden Biegekräfte neu berechnet werden. So gilt bei Zugüberlagerung:

$$F_{b,i} = \frac{2 \cdot M_{b,s\ddot{u}+}}{2 \cdot D}, \quad (5.26)$$

$$F_{b,a} = \frac{2 \cdot M_{b,s\ddot{u}-}}{2 \cdot D}, \quad (5.27)$$

$$F_{r,i} = F_{b,i} \cdot \mu, \quad (5.28)$$

$$F_{r,a} = F_{b,a} \cdot \mu. \quad (5.29)$$

Damit wird die Verschiebung der Reibung berücksichtigt, sodass nun das neue Reibmoment wie folgt zusammengesetzt wird:

$$M_{r1,s\ddot{u}} = F_{r,i} \cdot r_i + F_{r,a} \cdot r_a. \quad (5.30)$$

Nun sind alle Komponenten bekannt und die Gleichung für die Vorschubkraft kann umgestellt werden. Dabei ist zu erwähnen, dass $M_{b,s\ddot{u}\pm}$ nur für die Berechnung der resultierenden Biegekräfte verwendet wird und nicht für das Gleichgewicht.

$$F_v = F_{v*} + \frac{M_b + F_r \cdot r_i}{r_m} + F_{s\ddot{u}}. \quad (5.31)$$

Die so errechnete Vorschubkraft wurde im Anschluss für unterschiedliche Szenarien errechnet und mit einem FE-Modell verglichen (**Bild 5.29**). Das Ergebnis zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung zwischen FEM und Analytik.

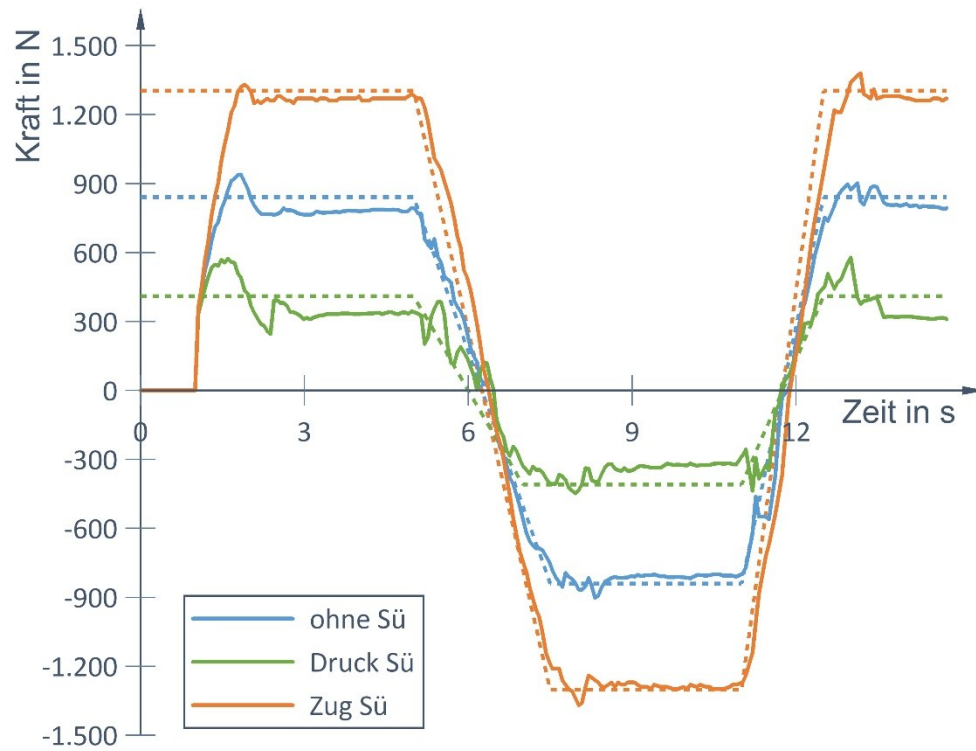


Bild 5.29: Vergleich der Vorschubkraft mit/ohne Spannungsüberlagerung analytisch und FEM

6 Entwicklung der Kinematik, Variationen und Prozessgrenzen

In diesem Kapitel soll nun das Vorgehen zur Planung der Bahnkinematik sowie Parameter und Eigenheiten die zu beachten sind, dargestellt werden. Diese wurden teilweise in den vorangegangenen Kapiteln angesprochen, sollen aber in diesem Kapitel aus der Sicht der Bahnplanung vertieft werden. Dabei wird zwischen der Planung von 2D- und 3D-Geometrien unterschieden. Des Weiteren wird hier auf die Umformung von nicht kreisrunden Profilen sowie weitere Variationen eingegangen. Abschließend werden die Prozessgrenzen des Verfahrens dargestellt.

6.1 Bahnplanung 2D

Die Einlegezone folgt, aufgrund des Radius am Biegekopf, mit einem Versatz X_v der programmierten Mittelachse des Biegekopfs. Dies führt dazu, dass die programmierte Bahn stellenweise von der eigentlichen Geometrie abweicht. Ein Beispiel hierfür wurde bereits in **Bild 5.10** dargestellt.

Kreisbahnen sind nicht die einzigen Elemente, die eine solche Anpassung erfordern. Auch Richtungswechsel, wie in **Bild 6.1** dargestellt, erfordern eine spezielle Anpassung. Dazu wird die Bahn erst um den Versatz X_v verlängert und anschließend wird diese mit einem Kreisbogen (konstanter Abstand zum Eckpunkt, Mittelpunkt im Knick) zurück auf die ursprüngliche Bahn gefahren. Dadurch wird sichergestellt, dass die Umformzone den Knickpunkt erreicht, bevor das Profil eine seitliche Umformung erfährt.

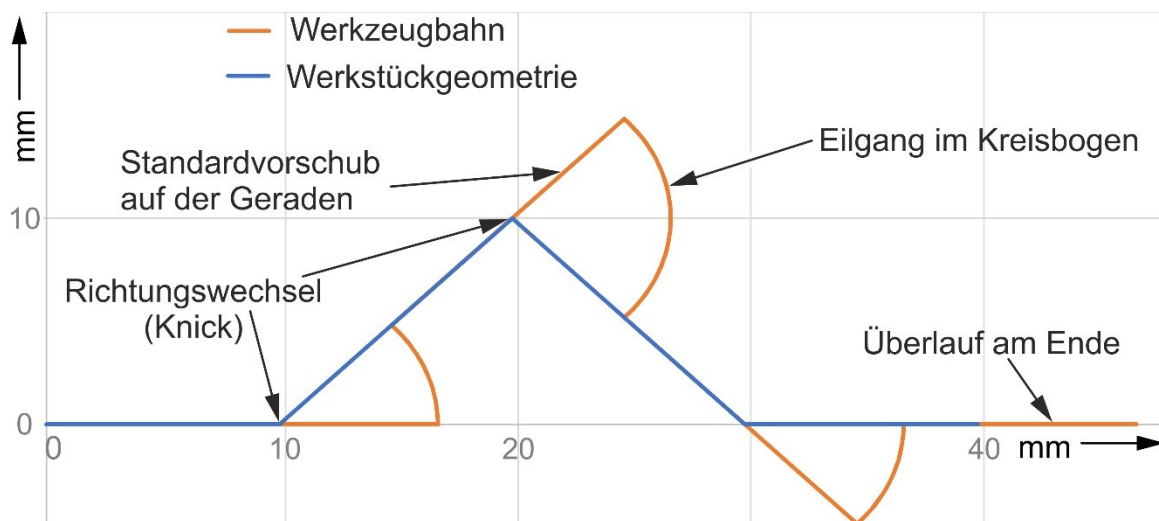


Bild 6.1: Anpassung der Kinematik bei Richtungswechsel

Der Versatz betrifft auch das Ende der Bahn. Es kann vorkommen, dass hier der Versatz noch weiter verlängert werden muss, um z. B. das Trennen des Profils zu ermöglichen.

Die Bahnanpassungen generell erfordern eine genaue Abstimmung der beiden Vorschübe: des Profilverfahrens und des Vorschubs des Biegekopfs. Diese sind nämlich nur auf geraden Abschnitten identisch. Dabei sind grundsätzlich zwei Szenarien zu unterscheiden:

1. Richtungswechsel (**Bild 6.1**): Dabei wird z. B. das gerade Stück mit gleichem Vorschub vorgefahren und für den anschließenden Kreisbogen in den Eilgang geschaltet, da hier kein Profil gefördert werden muss.
2. Kreisbögen oder Geometrien mit einer konstanten seitlichen Bewegung (**Bild 5.10**): Hier wird der Vorschub des Biegekopfs erhöht, sodass der Profilver Schub nicht verändert werden muss. Dies erfolgt über das Verhältnis der Längen der zu fahrenden Strecke des Biegekopfes und der Länge der Profilmittelachse um die Stützstelle.

Dabei ist es auch möglich, den Profilver Schub an den genannten Stellen im gleichen Verhältnis zu reduzieren und den Vorschub konstant zu halten. In dieser Arbeit wurde der Profilver Schub konstant gehalten und der Vorschub des Biegekopfes erhöht.

Um diese Anpassungen zu automatisieren, wurde ein VBA-Programm in Kombination mit einem Excel-Programm entwickelt, das diese Aufgabe vereinfacht. Dazu kann in der Excel-Datei in einem ersten Schritt der Verlauf der Mittelachse der Sollgeometrie entweder als Punktfolge oder als CNC-Programm nach DIN 66025 (1983) eingegeben werden. Dabei können auch sämtliche Zusatzinformationen wie Vorschubgeschwindigkeit, Biegekopf- und Profilageometrie berücksichtigt werden.

In einem weiteren Schritt wird die Bahn komplett in lineare Abschnitte zerlegt. Dies betrifft vor allem Kreisbögen und ähnliche Geometrien. Daraus kann anschließend die entsprechende Bahn für die einzelnen Achsen errechnet werden. Dabei kann die maximale Länge des linearen Abschnitts frei gewählt werden. Anschließend erfolgt die tangentielle Verschiebung der einzelnen Punkte um den Versatz X_v .

Daraus kann anschließend ein CNC-Programm erzeugt werden. Die Formatierung ist an die Heidenhain TNC 415 angepasst. Beim Export des NC-Programms können zusätzlich der Startpunkt, der Vorschub und die Blockform des Bauteils ergänzt werden.

Das Programm kann auch genutzt werden, um die Bahn für die FE-Simulation in Abaqus zu erzeugen. Dabei wird für jede Achse in Abhängigkeit von der Zeit die Position bestimmt und als Textdatei exportiert. Diese kann im Anschluss als Amplitude in Abaqus importiert werden.

Abschließend können die Punkte genutzt werden, um sich die beiden Bahnen (Mittelachse Sollgeometrie/korrigierte Bahn) graphisch in einem Diagramm anzeigen zu lassen. Zwischen den einzelnen Schritten ist es möglich, die Bahnbeschreibung zwischen absolut oder inkrementell zu wechseln. In **Bild 6.2** ist schematisch der Ablauf des Programms dargestellt.

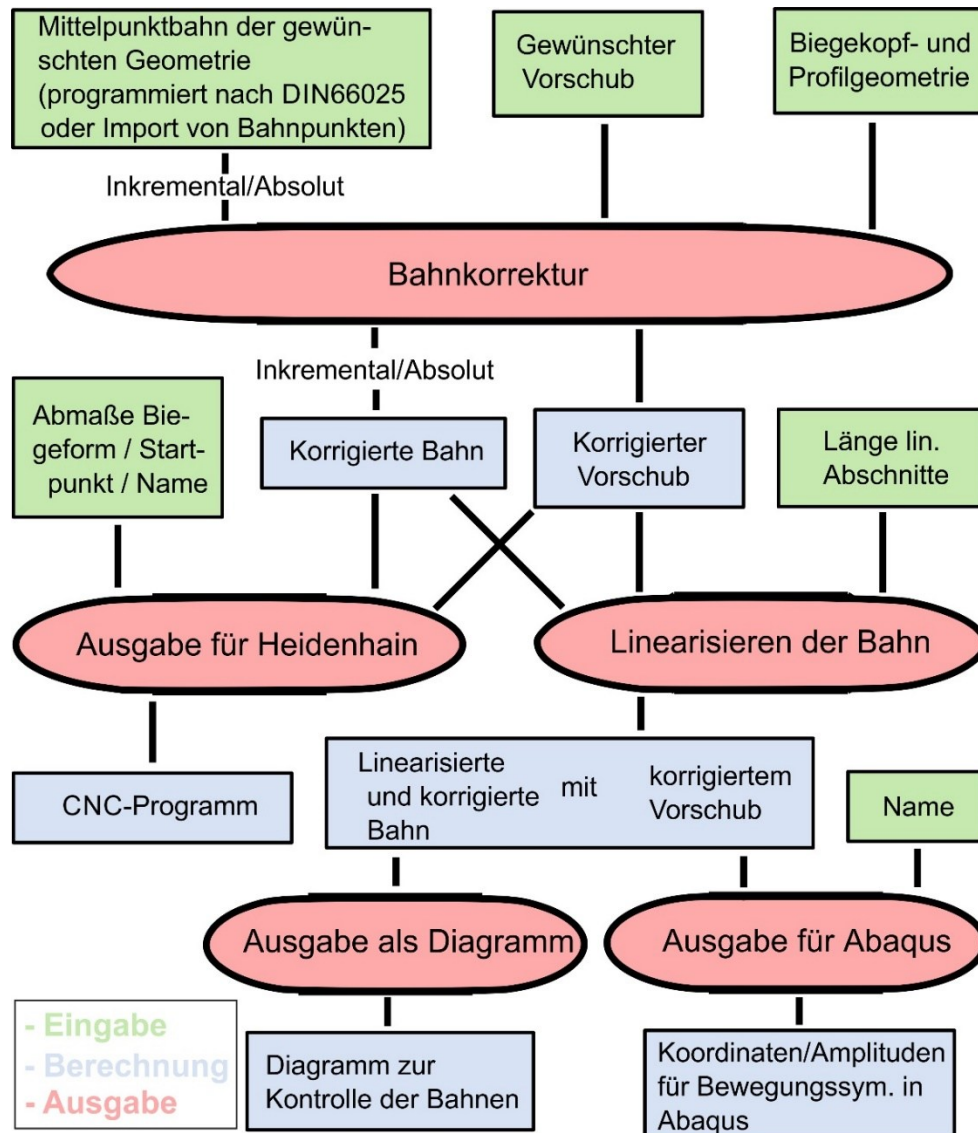


Bild 6.2: Schema Programmablauf 2D nach. Rosenkranz (2018)

Zusätzlich sei hier erwähnt, dass beim Verwenden dieses Tools auf das Koordinatensystem zu achten ist, da die Nullpunkte durchgehend identisch sein müssen und die Startposition für die Berechnung immer $X=0 / Y=0 / Z=0$ ist.

In **Bild 6.3** ist ein Beispiel für die Komplexität der Bahnplanung dargestellt. Dabei handelt es sich um eine spiralförmige Form, die von außen nach innen abgefahren wird. Dabei ist zu sehen, dass mit zunehmender Krümmung die beiden Bahnen (Mittelachse Profilgeometrie und kompensierte Bahn) sich immer weiter voneinander entfernen. Dies resultiert aus der immer größer werdenden Krümmung der Geometrie. Dies betrifft auch den Vorschub, der zu Beginn mit der Vorgabe von 1000 mm/min startet und entlang der Krümmung kontinuierlich auf bis zu 1266 mm/min ansteigt.

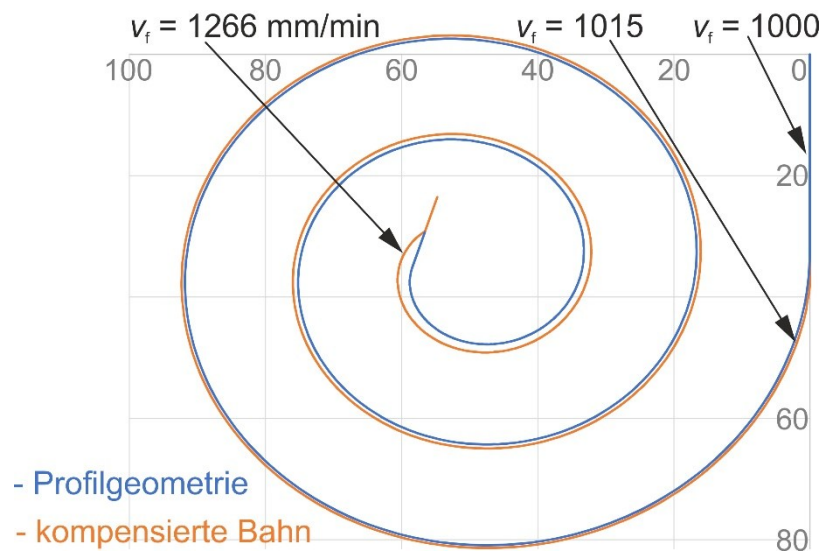


Bild 6.3: Beispiel für die Bahnplanung einer Spirale

6.2 Bahnplanung 3D

Die 3D-Bahnplanung baut auf den Ergebnissen von 2D-Bahnplanung auf, wird aber durch weitere Elemente ergänzt. Dadurch verlagert sich der Schwerpunkt Richtung Kollisionsvermeidung. Durch die meist 3D-Ausformung der Stützstellen müssen diese nun mit einem Sicherheitsabstand zwischen Biegekopf und Stützstelle umfahren werden. Dazu muss die Bahn tangential zusätzlich verlängert und der Punkt so angefahren werden, dass der Biegekopf und die Stützstelle sich nicht berühren, aber auch das Profil nicht aus der Stützstelle herauspringt. Dies erfolgt meistens in einem Kreisbogen (**Bild 6.4**, Anfahrt). Des Weiteren entfällt bei 3D-Geometrien die Abstützung durch den Werkzeugboden, was dazu führt, dass zusätzlich ein Höhenoffset (Z-Offset) hinzukommt, der je nach Richtung der Steigung überlagert wird (**Bild 6.4** und **Bild 5.20**).

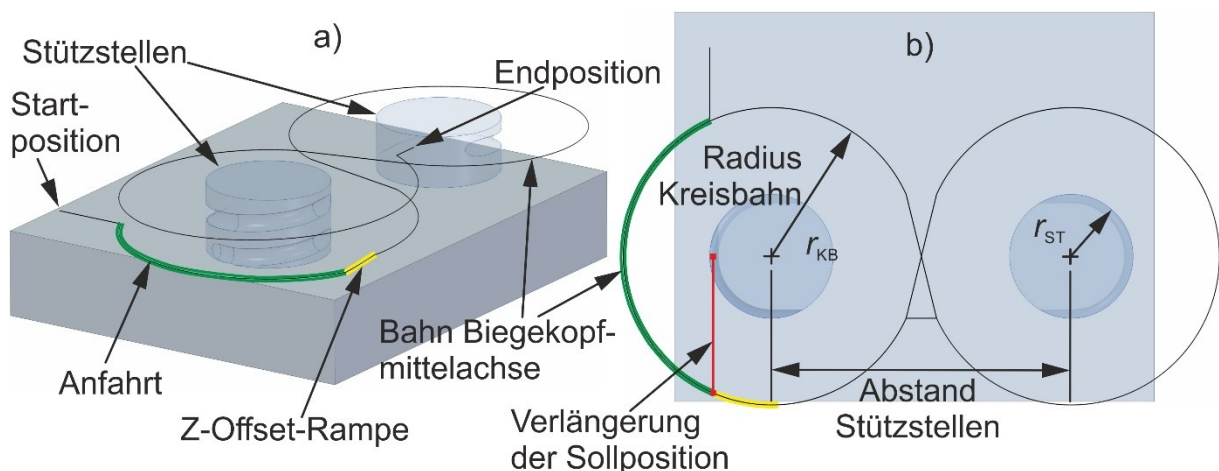


Bild 6.4: Bezeichnung der Elemente und Streckenabschnitte bei einer 3D-Bahnplanung: 3D-Ansicht, b) Draufsicht

Vereinfacht erfolgt die Planung einer 3D-Geometrie um 3D-Stützstellen nach dem folgenden Muster:

1. Es wird ein Mindestradius r_{KB} um die Stützstelle berechnet. Dieser setzt sich aus dem Außenradius der Stützstelle r_{ST} , der Außenradius des Biegekopfes r_{BK} und dem bereits angesprochenen Sicherheitsabstand r_{SA} zusammen:

$$r_{KB} = r_{ST} + r_{BK} + r_{SA} \quad (6.1)$$

2. Der entsprechende Punkt der Profilgeometrie wird tangential so verlängert, bis dieser sich mit einem Punkt auf der errechneten Kreisbahn kreuzt (rote Linie **Bild 6.4**).
3. Anschließend wird dieser Punkt mit dem Radius r_{KB} um die Stützstelle auf einer Kreisbahn angefahren (grüne Linie), sodass eine Kollision zwischen Biegekopf und Stützstelle vermieden wird.
4. Danach wird die ebene Bahn um die Z-Komponente ergänzt.
5. Die Z-Komponente wird dann, je nach Steigungsrichtung, um den entsprechenden Z-Offset erweitert.
6. Der zusätzliche Z-Offset wird nicht sprunghaft, sondern über eine kleine Rampe aufgebaut (gelbe Linie **Bild 6.4**). Je nach Steigung erfolgt diese entweder in Z+ oder Z-Richtung.

Solange die horizontale Ausrichtung sich nicht ändert, bleibt dieser Z-Offset den Rest der Bahn konstant. Das Ausmaß dieses Z-Offsets ist von der Form, der Geometrie und dem Werkstoff abhängig und kann aktuell nur durch Versuche ermittelt werden. Der Z-Offset und die dazugehörige Rampe sind nur in Bereichen notwendig, in denen eine Abstützung durch den Werkzeugboden nicht gewährleistet werden kann.

Um diese Anpassungen für 3D-Geometrien zu automatisieren, wurde auch hierfür ein VBA-Programm in Kombination mit einem Excel-Programm entwickelt, das diese Aufgabe vereinfacht. In diesem Fall ist das 3D-Programm eine eigenständige Weiterentwicklung. Durch die geringere Flexibilität bei der Eingabe der Sollgeometrie und der deutlich längeren Berechnungszeit, teilweise mehrere Minuten pro Schritt, werden je nach Anwendung die entsprechenden Programme, 2D oder 3D, verwendet.

Für die 3D-Bahnplanung kann die Bahn, die aus linearen Abschnitten besteht, eingegeben oder eingefügt werden. Die Länge der einzelnen linearen Abschnitte ist vorerst irrelevant, da im darauffolgenden Schritt die gesamte Geometrie in gleich lange lineare Abschnitte zerlegt wird. Die Länge der Abschnitte kann frei festgelegt werden. Ab diesem Punkt kann jeder errechnete Schritt als eine Punkte-Linie exportiert werden, um z. B. in einem CAD-Programm zur Überprüfung eingelesen zu werden.

Im nächsten Schritt kann die Werkzeuggeometrie als eine STL-Datei im ASCII-Format importiert werden. Dabei ist der Abstand der einzelnen Punkte der Werkzeuggeometrie sehr wichtig. Ist dieser zu groß, kann die Geometrie unter Umständen nicht als solche erkannt werden und die Bahn würde z. B. direkt durch eine Stützstelle verlaufen. Ist diese zu fein, kann die Berechnungszeit für die Kollision mehrere Stunden dauern. Daher wurde eine Schleife programmiert, die den Abstand zwischen den Punkten eines Dreiecks der STL-Geometrie überprüft und diesen auffüllt, bis ein vorgegebener Abstand erreicht ist (**Bild 6.5**). Anschließend werden alle doppelt

vorkommenden Punkte gelöscht, um die Rechenzeit zu reduzieren. Dies betrifft z. B. Elemente, die aneinander angrenzen und sich so den gleichen Punkt teilen.

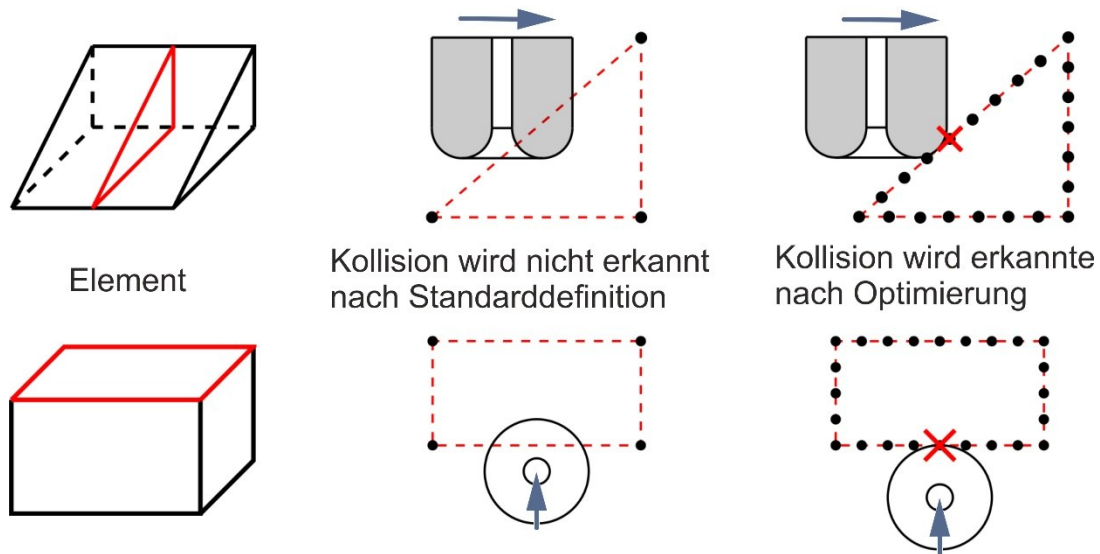


Bild 6.5: Auffüllen der STL-Geometrie nach Rosenkranz (2019)

Als Nächstes wird eine ideale kompensierte Bahn ohne Kollisionsbetrachtung errechnet, diese bildet die Basis für weitere Schritte. Nun erfolgt in mehreren Schleifen eine Verschiebung der Bahn des Biegekopfes, bis eine Kollision vermieden wird (**Bild 6.6a**). Eine Anpassung in mehreren Schleifen ist unter anderem deswegen notwendig, da es vereinzelt und je nach Verlauf der Bahn zu ungewollten Umkehrungen kommen kann (**Bild 6.6b**), die erkannt und entfernt werden müssen. Die Korrektur erfolgt im ersten Schritt automatisiert, kann aber in einem weiteren Schritt durch manuelle Eingaben unterstützt werden.

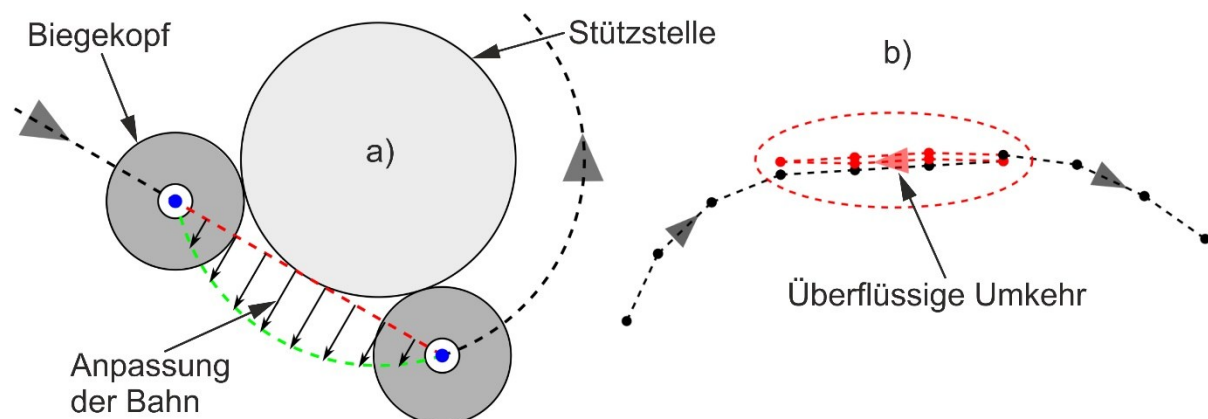


Bild 6.6: Bahnanpassung nach Rosenkranz (2019): a) Verschiebung der Bahn, b) Eliminierung von Umkehrungen

In **Bild 6.7** ist der schematische Ablauf des Programms dargestellt. Das Programm konnte anhand einer einfachen 3D-Spirale (**Bild 6.8**) getestet und validiert werden. Für die Verwendung mehrerer Stützstellen und deutlich längeren Geometrien ist eine weitere Optimierung des Tools notwendig.

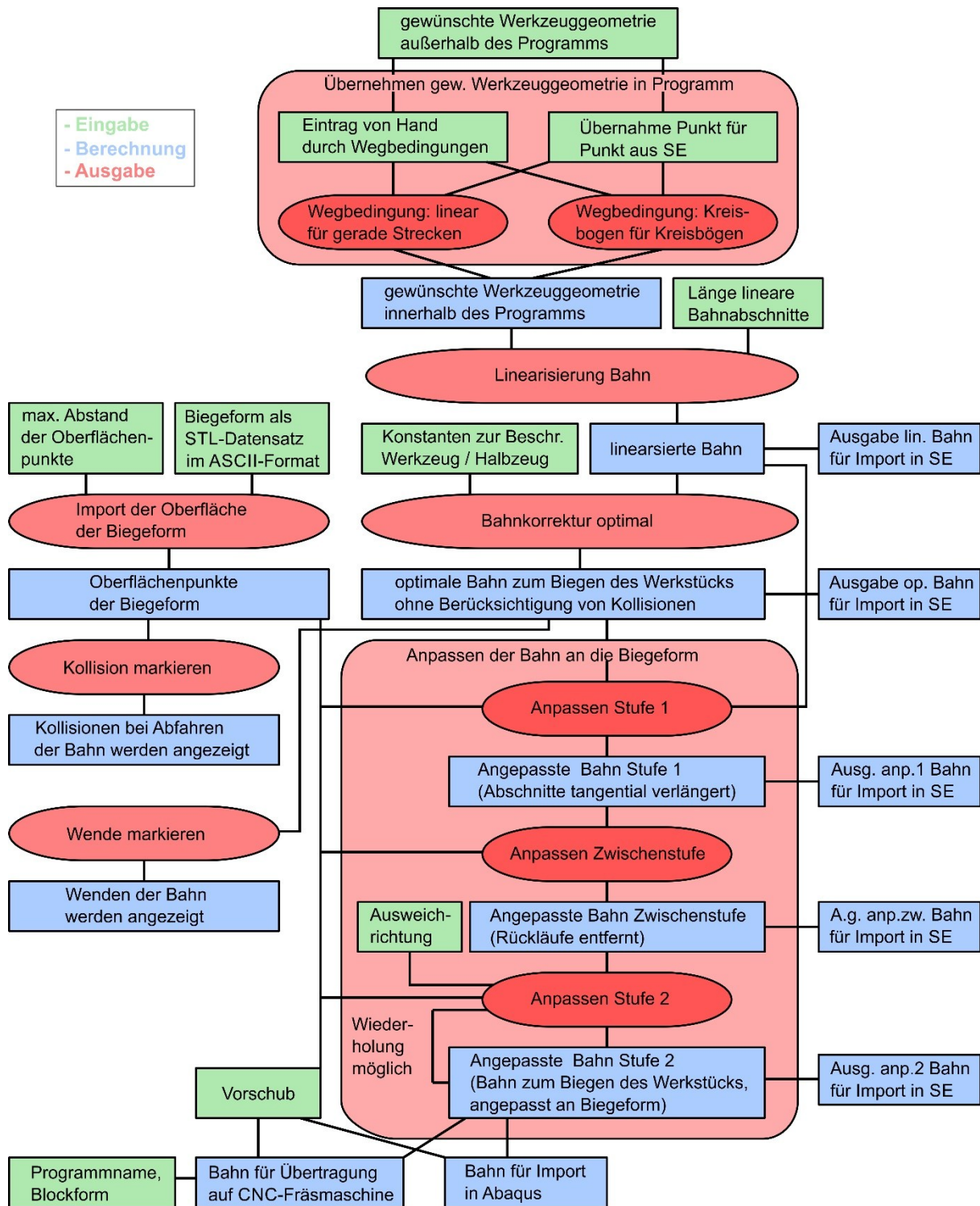


Bild 6.7: Schema Programmablauf 3D nach Rosenkranz (2019)

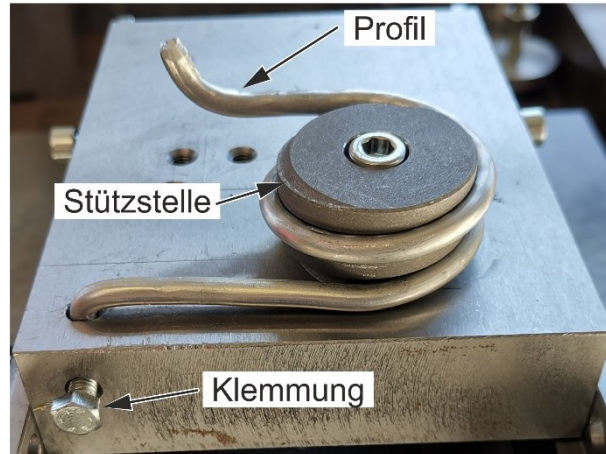


Bild 6.8: Experimentelle Versuch einer 3D-Spirale

Zusätzlich sei hier erwähnt, dass beim Verwenden dieses Tools auf das Koordinatensystem zu achten ist, da die Nullpunkte durchgehend identisch sein müssen (auch beim CAD-Modell) und die Startposition immer $X=0 / Y=0 / Z=0$ sein muss.

6.3 Weiterführende kinematische Optimierungsmöglichkeiten

Je nach Bauteilgeometrie gibt es auch weiterführenden Möglichkeiten zur Kinematikoptimierung. Diese optionalen Möglichkeiten sollen nachfolgend vorgestellt werden.

6.3.1 Optimierung des Biegekopfs

Um ungewollte Deformationen zu reduzieren und eine gute Abstützung des Profils, vor allem bei runden Querschnitten und 3D-Geometrien, zu gewährleisten, wird ein rotationsymmetrischer Biegekopf mit einem Durchgangsloch in der Mitte als Führung für das Profil verwendet. Dieser ermöglicht eine einfache Gestaltung des Biegekopfes, gute Steifigkeit, einfache Lagerung und eine vereinfachte Bahnplanung. Dadurch wird z. B. der Mindestabstand zwischen benachbarten Stützstellen und dem Mindestradius r_{KB} um die Stützstelle vergrößert, was auch das Anfahren der verlängerten Position betrifft (grüne Bahn **Bild 6.4**).

Eine Möglichkeit dies zu optimieren, ist das Freiräumen des Bereichs, der keinen Kontakt mit dem Profil hat (**Bild 6.9**). Die Höhe der Freiräumung ist dabei von der Höhe der Stützstelle abhängig.

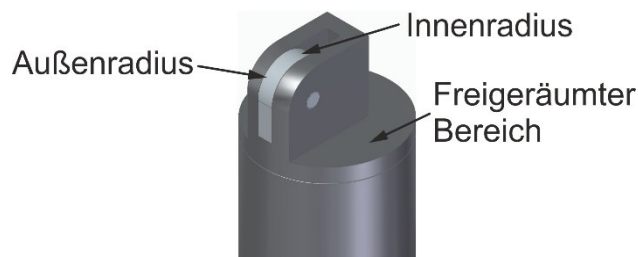


Bild 6.9: Biegekopfvariation durch Freiräumung

Durch diese Maßnahme kann der Mindestabstand zwischen den Stützstellen kleiner werden, ohne dass eine Kollision droht. Weiterhin reduziert sich dadurch der Radius um die Stützstelle, der zum Anfahren der tangential verlängerten Position notwendig ist, und damit wird auch die Geometriegenauigkeit des Bauteils in diesem Bereich verbessert, da das Profil beim Umkreisen der Stützstelle nicht mehr hin und her gebogen wird. Als weitere Zusatzmaßnahme kann der Außenradius des Biegekopfes freigeräumt werden. Dies ist nur dann möglich, wenn keine oder nur leichte Höhenverläufe in negativer Z-Richtung bei der zu fertigenden Geometrie auftreten.

6.3.2 Zweistufige-Kreisbahn-Kinematik

Es gibt mehrere Möglichkeiten, das Profil um einen Bogen abzulegen. Eine der bereits dargestellten Optionen ist es, die Stützstelle mit einem größeren konstanten Radius zu umfahren. Dabei kann durch den Versatz X_0 der Radius zusätzlich bedarfsorientiert angepasst werden. Durch die Änderung des Versatzes ändert sich auch der Abstand der beiden Biegezone B2 und B3 sowie deren Wechselwirkungen.

Eine weitere Möglichkeit, die Wechselwirkungen der beiden Bereiche zu beeinflussen, ist in **Bild 6.10** dargestellt. Dabei wird der Kreisbogen um die Stützstelle in mehrere kleineren Abschnitte aufgeteilt, einfachheitshalber bieten sich dafür 90° -Abschnitte an. Dabei wird die für den Teil-Kreisbogen benötigte Profillänge erst ungekrümmt in der Werkzeugform abgelegt. Dazu wird die Bahn linear verlängert. Anschließend wird der Kreisbogen gefahren, während der Profilvorschub gestoppt wird. Dies sorgt dafür, dass B1/B2 und B3 zeitlich getrennt voneinander erfolgen und so die Wechselwirkungen vermieden werden, also ein zweistufiges Ablegen. Dies kann sowohl für 2D- als auch 3D-Geometrien eingesetzt werden.

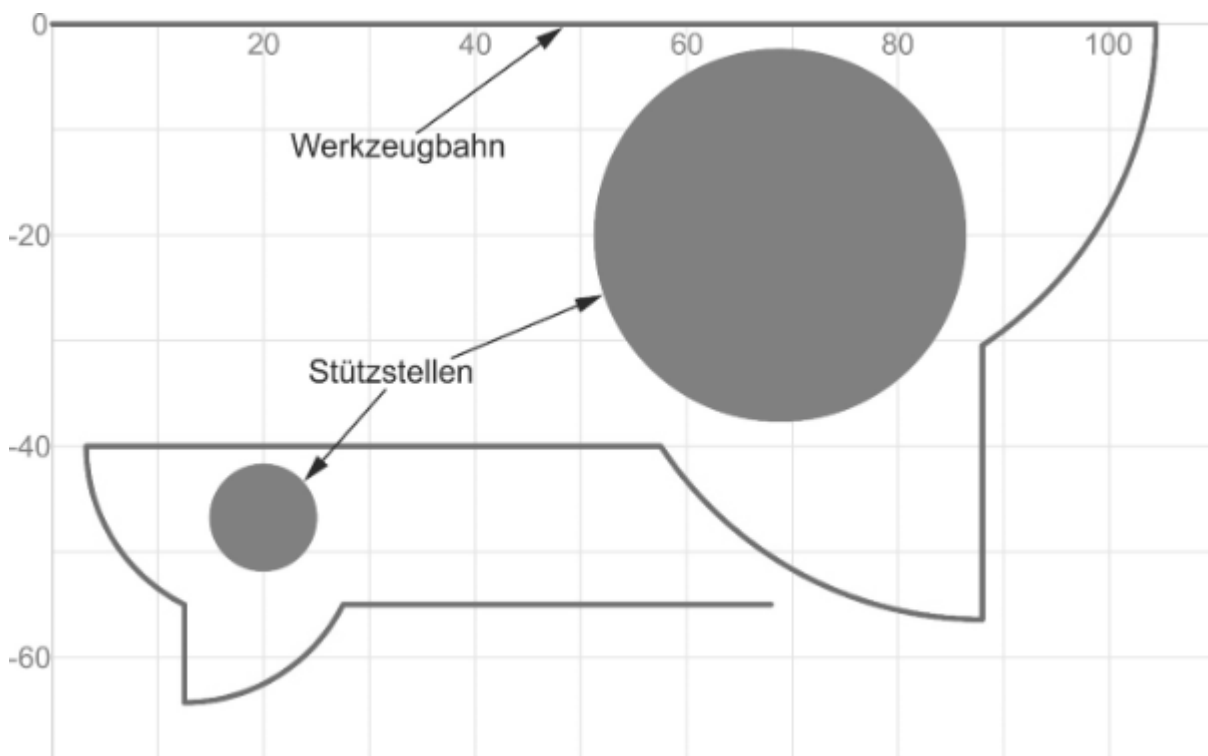


Bild 6.10: Zweistufige-Kreisbahn-Kinematik

Der praktische Vorteil dieser Strategie ist die Reduktion der Verdrillung des Profils. Dies ist vor allem bei nicht kreisrunden Querschnitten und engen Biegeradien von Vorteil. Das Profil liegt dabei deutlich gleichmäßiger an der Stützstelle an, was auch dafür sorgt, dass die Aufstauchung im Innenbogen vor allem bei rechteckigen Profilen gleichmäßig und nicht mehr einseitig erfolgt (**Bild 6.11**). Es ergeben sich auch Nachteile dadurch, so nimmt dabei die Geometrie-Genauigkeit etwas ab, da die Vorschubkraft während des Kreisbogens deutlich kleiner wird, sodass man schlussendlich hier immer einen Kompromiss treffen muss.

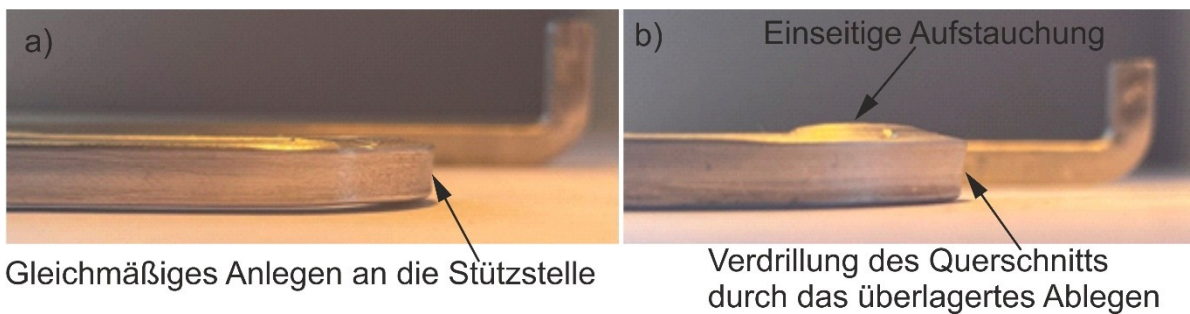


Bild 6.11: Vergleich Ablaufvariation, rechteckiges Profilquerschnitt (Schenk, 2023): zweistufiges Ablegen, b) überlagertes Ablegen

Möglich ist es auch, nur einen Teil der Strecke des Teilkreisbogens vorzufahren und so eine Mischung der beiden Mechanismen zu erreichen. Durch die Variation des Verhältnisses kann eine weitere Optimierung des Ergebnisses erreicht werden.

6.3.3 Z-Offset Feinanpassung 3D

Durch die fehlende Abstützung durch den Werkzeugboden kommt es zu einem Höhenversatz zwischen der Position des Profils an der Stützstelle und der Position am Austritt des Biegekopfs. Für Geometrien, die sich nahe an den Stützstellen entlang bewegen, kann der Z-Offset nach der erwähnten Startrampe konstant gehalten werden. Bei großen Abständen zwischen Stützstellen und Biegekopf bildet sich bei dem abzulegenden Profil eine Ausbauchung in die negative Z-Richtung, sodass das Anlegen an die darauffolgende Stützstelle nicht mehr korrekt gewährleistet werden kann. Daher erfordern lange Abstände zwischen Stützstellen entweder eine Zwischenabstützung oder eine kinematische Anpassung der Bahn. Da Letzteres deutlich einfacher umzusetzen ist, soll dies anhand eines Beispiels dargestellt werden (**Bild 6.12**).

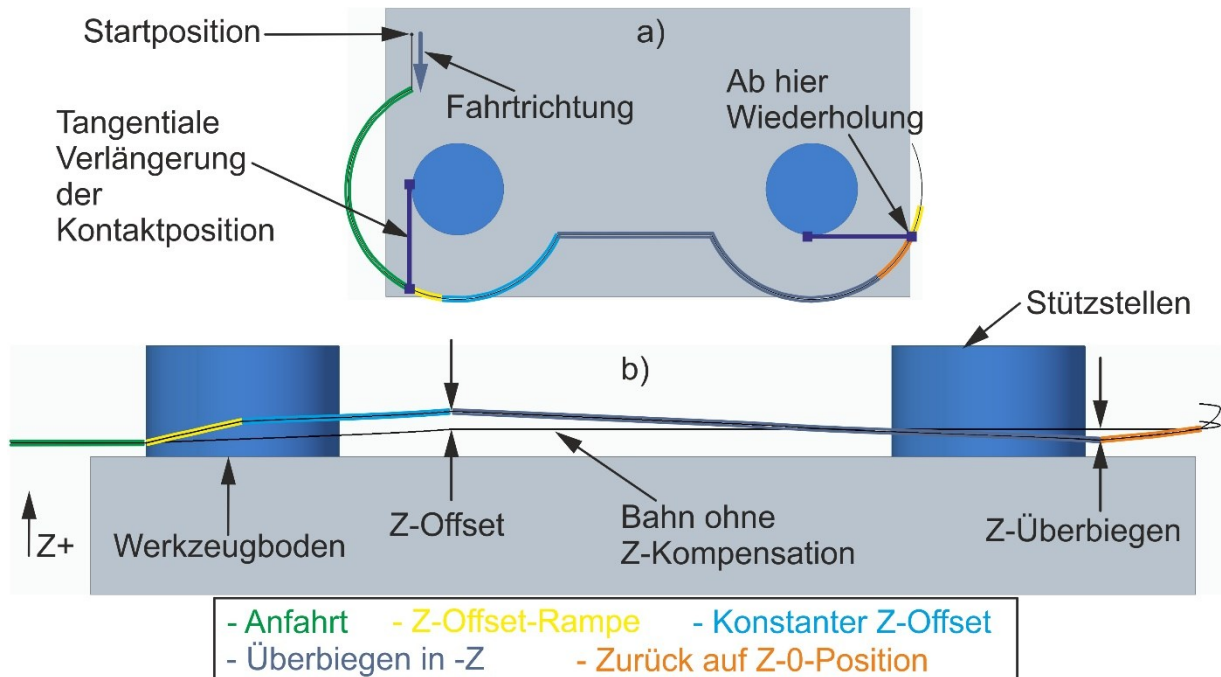


Bild 6.12: Höhenversatz Feinanpassung, O-Form: a) Draufsicht, b) Seitenansicht

Die Bahnplanung ändert sich dabei wie folgt. Das Umfahren der Stützstelle (Anfahrt/grün), der Aufbau des Z-Offsets (Z-Offset-Rampe/gelb) und das Umkreisen der Stützstelle (konstanter Offset/hellblau) ist wie bereits beschrieben. Auf der geraden Strecke zwischen den Stützstellen wird das Profil leicht in die negative Z-Richtung überbogen (Überbiegen in Z-/dunkelblau). Das Überbiegen kann sogar größer als der aufgebaute Z-Offset werden. Dabei hat es sich als zielführend erwiesen, das Überbiegen gleichmäßiger auf einen längeren Abschnitt zu verteilen, da dadurch auch der Verlauf des Profils gleichmäßiger wird. Das überbogene Z-Aufmaß wird dann kurz vor Kontakt mit der neuen Stützstelle zurückgenommen (zurück auf Z-0-Position/orange), sodass das Profil wieder auf der gleichen Z-Position ist wie ohne die Z-Kompensation, und sich das Profil korrekt in die Einkerbung in der Stützstelle einlegen kann. Ab hier kann der Prozess je nach Geometrieverlauf wiederholt werden.

Des Weiteren erfordert diese Feinanpassung eine leichte Adaption bei der Stützstellengestaltung. Durch das Überbiegen ist es nicht mehr ausreichend, die Originalgeometrie der Sollgeometrie als Abstützung/Führung in der Stützstelle einzufräsen, sondern es muss auch das Überbiegen in beide Richtungen am Auslauf der Bahn, wo der Kontakt zwischen Werkstück und Stützstelle endet, entsprechend berücksichtigt werden. Dazu muss an der Stützstelle im Auslaufbereich die Einkerbung mit einer Steigung in beide Richtungen passend zur Bahnanpassung verlängert werden (**Bild 6.13**). Erst dadurch kann das Überbiegen ohne bleibende Schäden am Profil erfolgen.

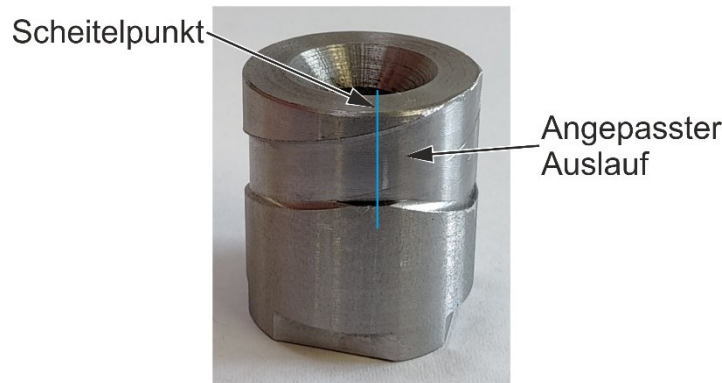


Bild 6.13: Feinanpassung Auslauf an Stützstelle

6.4 Prozessvariationen

Bis hierhin wurde überwiegend auf kreisrunde Querschnitte eingegangen. Kreisrunde Querschnitte haben den Vorteil, dass sie sich verdrillen können, ohne dass es zu Querschnittsdeformationen oder Beschädigungen kommt. Bei nicht kreisrunden Querschnitten muss das Verdrillen vermieden werden, da dies in der Regel zu einer ungewollten Querschnittsdeformation führt. Dazu sind Vorkehrungen und Maßnahmen nötig, die zum Teil bereits angesprochen wurden. Vereinfacht kann gesagt werden, dass alles, das beim kreisrunden Querschnitt zu einer Reduktion der Verdrillung führt, auch bei nicht kreisrunden Querschnitten den gleichen Effekt bewirkt. Die Variationen werden hier überwiegend anhand eines Rechteckprofils dargestellt.

Die Bandbreite möglicher nicht kreisrunder Querschnitte im aktuellen Stadium des Verfahrens ist nicht sehr groß. Ein Grund dafür ist die Doppelbiegung im Biegekopf (B1 und B2), die meist mit einem sehr engen Biegeradius verbunden ist. Dadurch ist das Verfahren primär für Querschnitte mit dickeren Wandstärken und/oder geschlossenen Querschnitten geeignet. Nachfolgend soll auf die Unterschiede und das Umformen von nicht kreisrunden Querschnitten näher eingegangen werden.

6.4.1 Variationen 2D

Kreisrunde Querschnitte ermöglichen eine sehr flexible Lage für B3. Diese kann, wie bereits gezeigt, auch vor B2 liegen, da Spannungsüberlagerungen und Wechselwirkungen kaum nennenswerte negative Auswirkungen haben. Bei nicht kreisrunden Querschnitten sind die beiden Bereiche deutlich voneinander zu trennen, um Wechselwirkungen möglichst auszuschließen. Dies liegt vor allem daran, dass durch die Wechselwirkungen meistens der Werkstoff in den plastischen Bereich gebracht wird und damit der Widerstand gegen das Verdrillen/Verformen verringert wird. Daher sind diese Umformbereiche nach Möglichkeit voneinander zu trennen. Dies führt dazu, dass der Gesamtversatz X_v größer werden muss. Dies hat auch einen direkten Einfluss auf die möglichen Geometrien der Bauteile, da z. B. der Mindestabstand zwischen zwei benachbarten Stützstellen größer werden muss.

Eine Möglichkeit, Wechselwirkungen der beiden Umformzonen zu reduzieren, ist in Kapitel 6.3 (Zweistufige Kreisbahn-Kinematik) beschrieben. Dadurch wird nicht nur eine räumliche, sondern auch eine zeitliche Trennung der beiden Umformbereiche erreicht.

Ein weiterer Aspekt betrifft rechteckige Querschnitte. Während bei den bekannten Verfahren das Profil meist nur in einer Ebene gebogen wird, erfolgt beim Inkrementellen Biegen im Gesenk eine Dreifachbiegung in zwei Ebenen, die meist um 90° zueinander verdreht sind: die ersten beiden im Biegekopf (B1 und B2) und dann eine dritte seitliche Biegung um die Stützstelle (B3). Hierbei stellen rechteckige und vergleichbare Querschnitte eine besondere Herausforderung dar, da diese beim Biegen im Innenradius deutlich breiter werden als andere Querschnitte. Dies erfordert ein größeres Aufmaß in der Führung des Biegekopfes, um Verklemmungen oder erhöhten Verschleiß zu vermeiden. Außerdem schließt das die Bandbreite möglicher Profilgeometrien ein wenig ein.

Eine weitere Änderung betrifft die Führung des Profils im Biegekopf-Auslauf durch die Doppelbiegung. Beim seitlichen Biegen um eine Stützstelle ist eine größere Abstützung des Profils notwendig. Rotationssymmetrische Biegeköpfe wie in **Bild 4.7** sind daher hier nur noch vereinzelt geeignet. Deutlich bessere Ergebnisse zeigten Biegeköpfe mit seitlicher Führung/Abstützung wie in **Bild 6.14** dargestellt. Durch die seitliche Abstützung kann das Verdrillen besser vermieden werden. Dadurch gilt die beschriebene Berechnung des Mindestversatz X_c nicht mehr. Hierbei entspricht der Mindestversatz X_c dem Biegeradius r_m .

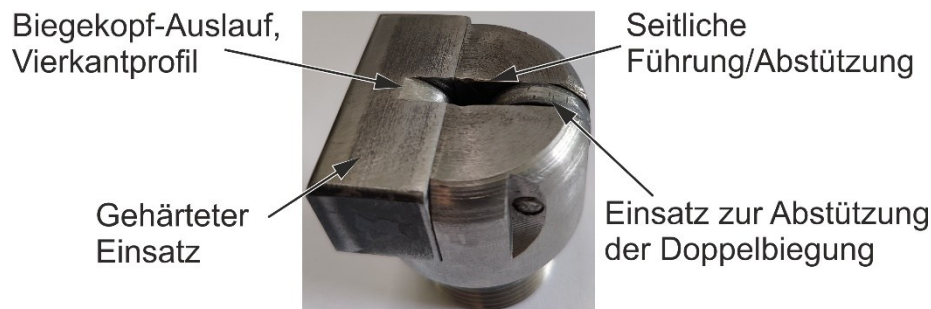


Bild 6.14: Biegekopf 2D mit zwei Profil-Führungsarten

6.4.2 Variationen 3D

Das 3D-Umformen von nicht kreisrunden Querschnitten baut auf den in 2D beschriebenen Variationen auf. Die Änderung bei diesen Querschnitten betrifft den Biegekopf und seine Gestaltung. Dies ist wichtig, da er stärker für eine gute Stützung und Führung des Profils durch die Doppelbiegung beim Ablegen des Profils verantwortlich ist. Vor allem bei 3D-Geometrien wie z. B. einer spiralähnlichen Form um eine runde Stützstelle mit einer konstanten Steigung in Z-Richtung oder der bereits in Kapitel 5.3, **Bild 5.19** gezeigten 8er-Form kommt es zu einer zusätzlichen Bestrebung des Profils zur Verdrillung. Dabei führen Geometrien mit kleiner werdendem Stützstellenradien und größerer Steigung zu einer stärkeren Verdrillung des Profils, die einerseits durch die Stützstelle und andererseits durch die Führung im Biegekopf aufgenommen werden muss.

Durch die meist seitliche Biegung in Kombination mit der Z-Steigung ist ein freies und möglichst kraftloses Mitdrehen des Biegekopfes notwendig. Hier können bereits leichte Torsionswiderstände zu Verklemmungen im Biegekopf führen. Eine geringe Reibung zwischen Biegekopf und Profil wird hier nochmals wichtiger, da dadurch sowohl das Profil geführt als auch die ungewollte Torsion vermieden wird (**Bild 6.15**). Andersherum kann es leicht zu Verklemmungen und Schäden im Querschnitt des Profils kommen. Die Experimente haben auch gezeigt, dass hier die meisten der in **Bild 4.7** dargestellte Variationen nicht mehr gut geeignet sind, sondern die Variationen mit einem Einsatz oder einer Rolle eindeutig vorteilhafter sind. Eine Rolle ist hier immer in Kombination mit einer Bremse zu verbinden, um die notwendige Streckung des Profils zu erreichen. Durch die Streckung wird das Profil mit einer Spannung überlagert, sodass es sich stärker an der Stützstelle und im Biegekopf ausrichtet und weniger verdrillt. Dadurch kann auch das Durchhängen des Profils reduziert werden.

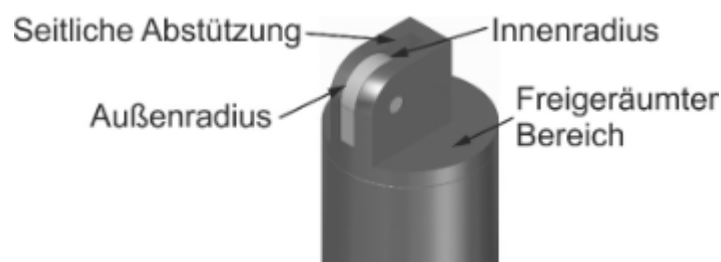


Bild 6.15: Gestaltung des Biegekopfes für Vierkant-Querschnitte und 3D-Geometrien

Des Weiteren macht sich die Verdrillung an der Ablegeposition an der Stützstelle bemerkbar, sodass hier je nach Geometrie eine aufwendigere Abstützung oder Kinematik des Profils erforderlich werden kann. Dies kann in der Regel dadurch umgesetzt werden, dass ein Teil des Profilquerschnitts zur Abstützung an der Kontaktstelle in der Stützstelle eingefräst wird (**Bild 6.13**).

6.4.3 Überbiegen/Rückfederung

Neben den beschriebenen konstruktiven Anpassungen verändert sich durch den modifizierten Umformprozess auch die Rückfederung der gebogenen Bauteile. Während bei kreisrunden Querschnitten die Umformbereiche B2 und B3 nah beieinander liegen, konnte durch die Spannungsüberlagerung in der Umformzonen eine Reduktion der Rückfederung erreicht werden. Durch die räumliche oder zeitliche Trennung der Bereiche entfällt die Überlagerung. Dies betrifft vor allem das zweistufige Biegen, da hier die Vorschubkraft deutlich geringer ausfällt. Diese Veränderung führt dazu, dass bei diesen Geometrien die Rückfederung deutlich größer ausfällt. Diese kann entweder durch eine angepasste Gestaltung der Stützstellen oder durch die Anpassung der Kinematik kompensiert werden.

Eine der Möglichkeiten, die Rückfederung zu kompensieren, vor allem wenn es um den Bogenbereich geht, ist die Anpassung des Durchmessers der Stützstelle. Dazu werden die Stützstellen mit einem um den Rückfederungswert reduzierten Radius gefertigt, sodass das Profil nach Ende des Prozesses auf das Sollmaß auffedert. Dies betrifft auch die Steigung. Diese federt nach dem Umformen ebenfalls, bedingt durch die Doppelbiegung und die fehlende Abstützung

durch den Werkzeugboden, leicht in Z-Richtung auf. Dies kann durch eine angepasste Skalierung der Z-Koordinate kompensiert werden.

Eine weitere Möglichkeit, die erhöhte Rückfederung zu kompensieren, ist das Überbiegen durch die Kinematik. Dies betrifft vorwiegend Bereiche, in denen das Profil nicht durch eine Stützstelle geführt wird. Dabei bewegt sich der Biegekopf mit einer leichten Steigung in Z-Richtung entgegengesetzt zu der Rückfederungsrichtung. Die praktische Umsetzung dieser Strategie wurde bereits in Kapitel 6.3 unter „Z-Offset Feinanpassung 3D“ ausführlich beschrieben.

6.5 Prozessgrenzen

Wie die meisten Verfahren hat auch das Inkrementelle Biegen im Gesenk Prozessgrenzen. Dies liegt an den spezifischen Ausführungen des Verfahrens. Diese lassen sich in Kategorien unterteilen, die nachfolgend beschrieben werden.

6.5.1 Allgemeine Prozessgrenzen

Bevor auf die konkreten Prozessgrenzen eingegangen wird, sollen erst übergreifende Parameter und deren Auswirkungen auf die Einsatzfähigkeit des Verfahrens erläutert werden. Dazu zählt unter anderem die Vorschubkraft. Diese hat einen enormen Einfluss auf den Umformprozess und setzt sich aus vielen Einzelkomponenten zusammen. Diese sind der Biegeradius am Biegekopf, der Reibungskoeffizient, die Art der Profilverformung und der Werkstoff. Der Werkstoff oder die Werkstofffestigkeit an sich ist kein direkter Parameter, sondern eher als ein Bezugswert zu sehen, zu dem die Vorschubkraft und weitere Parameter ins Verhältnis gesetzt werden können. Ändern sich die Werkstofffestigkeit und die Vorschubkraft im gleichen Verhältnis wie die Werkstofffestigkeit, so ist mit keinen nennenswerten Veränderungen zu rechnen. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass bei gleichbleibenden Randbedingungen der Einsatz festerer Werkstoffe meist einer leichten relativen Reduktion der Vorschubkraft gleichkommt. Bei diesem Verfahren entspricht die Vorschubkraft der Streckung im Profil zwischen Auslauf-Biegekopf und Einspannung/Anlegestelle der Stützstelle in der Werkzeugform. Für einen erfolgreichen Prozess darf diese weder zu groß noch zu klein werden. Daher ist prozessbedingt immer ein Optimum zu bestimmen. Damit handelt es sich bei der Vorschubkraft um einen zentralen Parameter, der nahezu von jedem Parameter mit verändert wird und einen deutlichen Einfluss auf das Biegeergebnis hat.

6.5.2 Prozessgrenzen durch Biegekopf

Der Biegekopf und seine Gestaltung ist ein zentrales Element dieses Verfahrens. Durch die Doppelbiegung unterscheidet es sich deutlich von den anderen am Markt verfügbaren Methoden. Durch die Doppelbiegung wird die Bandbreite möglicher Profile eingeschränkt, vor allem weil oft enge Radien notwendig sind, um den Gesamtdurchmesser des Biegekopfs in einem praktikablen Bereich zu halten. In den Experimenten wurden Verhältnisse von 1-2 x D getestet.

Dabei hat sich gezeigt, dass ein Verhältnis von etwa $\frac{\text{Biegeradius}}{\text{Profildurchmesser}} \geq 2$ gut für einfache Vollmaterialprofile ist. Dadurch sind auch geringe Abstände zwischen und zu den Stützstellen möglich. Die Querschnittsdeformation und Ausdünnung durch die Doppelbiegung sind dabei akzeptabel. Dagegen erfordern komplexere Profile, offene Profile oder solche mit dünneren Wandstärken einen deutlich größeren Biegeradius, um die Querschnittsdeformation um die Ausdünnung auf einem akzeptablen Niveau zu halten. Dabei ist zu erwähnen, dass sich der Biegeradius am Biegekopf, je nach Ausführung, zwei- bis vierfach auf den Gesamtdurchmesser auswirkt.

Weitere Aspekte sind die Art der Führung und die Reibung, da diese oft zusammenhängen. Dabei ist zwischen Biegeköpfen mit oder ohne Vorschub/Bremse zu unterscheiden. Während bei Ausführungen ohne Vorschub/Bremse meist Profilabschnitte mit fester Länge eingesetzt werden, wird hier die benötigte Vorschubkraft durch die Reibung und einen engen Biegeradius erzeugt. Dies führt z. B. dazu, dass bei 3D-Geometrien Biegeköpfe mit einer Rolle (**Bild 4.7**), aufgrund der zu geringen Reibung nicht eingesetzt werden können. Eine Rolle kann nur dann eingesetzt werden, wenn durch den Vorschub/die Bremse die benötigte Streckung des Profils erzeugt werden kann.

Die Steifigkeit und die Lagerung des Biegekopfs sind weitere Prozessgrenzen. Mit zunehmender Höhe der zu fertigenden Geometrie nimmt die notwendige Länge für den Biegekopf zu. Gleiches gilt für die vertikale Anordnung übereinander angeordneter Abschnitte. Damit steigt die seitliche Biegung des Biegekopfs. Dadurch steigt die Gefahr der Kollision mit der Werkzeugform oder den Stützstellen. Dabei verändert sich der Biegekopf in zwei Richtungen. Das Offensichtliche dabei ist die Biegung zur Seite, die durch eine Anpassung der Kinematik kompensiert werden muss. Zusätzlich ändert sich der vertikale Abstand zum Werkzeugboden. Während die Seite, die Richtung Umformzone zeigt, durch den Winkel etwas angehoben wird, sinkt die entgegengesetzte Seite etwas ab und kommt damit dem Werkzeugboden näher. Dadurch sind nahe aneinander liegende Geometrieabschnitte bei zu starkem Verbiegen des Biegekopfs nicht möglich, da es zu einer Kollision mit dem bereits abgelegten Profil kommen kann.

Der Grund für die reduzierte Steifigkeit liegt unter anderem in der Lagerung des Biegekopfes. Das Inkrementelle Biegen im Gesenk erfordert einen mitdrehenden Biegekopf oder das Mitdrehen der vollständigen Profilführungseinheit. Durch die Lagerung nimmt die Steifigkeit der Einheit tendenziell ab. Eine stabilere Lagerung und höhere Steifigkeit des Biegekopfes führen in der Regel zu einer Zunahme des Gesamtdurchmessers des Biegekopfes. Dadurch ist hier immer ein Kompromiss zu finden. Eine mögliche Maßnahme, dem entgegenzuwirken, ist die Freistellung des untersten Abschnitts des Biegekopfes und eine Versteifung des oberen Abschnitts (Kapitel 6.3 und **Bild 6.9**).

6.5.3 Prozessgrenzen durch Kinematik

Die Kinematik ist ein Parameter, dessen Grenzen sich schwer beschreiben lassen, insbesondere weil hier auch der Aufwand für die Umsetzung mitberücksichtigt werden muss. Durch eine aufwendige Gestaltung der Stützstellen und Kinematik lassen sich Geometrie herstellen, die auf

den ersten Blick unmöglich erscheinen. Am Ende wird in der Praxis immer eine Kosten-Nutzen-Entscheidung getroffen, daher wird hier auf die Problemstellungen eingegangen und nicht auf die expliziten Prozessgrenzen. Dabei gelten folgende Kriterien als relevante Prozessgrenzen:

- Gerader-positiver-Z-Aufstieg und
- mehrfach kurze aufeinanderfolgende Richtungswechsel (Einbuchtungen).

Höhenänderungen stellen das Verfahren vor Herausforderungen. So sind Höhenverläufe in negativer Z-Richtung (Z-Abstieg) grundsätzlich versagensfrei herstellbar (**Bild 6.16a**). Es ist aber eine zusätzliche Abstützung notwendig, um das Herausziehen des abgelegten Profils aus der Nut zu verhindern. Es ist zwar denkbar eine zuschaltbare Abstützung anzubringen, diese kann aber erst aktiv werden, wenn der Biegekopf ausreichend vorgefahren ist und den Platz dafür freigibt. Dadurch kann ein Teil des Profils aus der Nut gezogen werden und muss durch die zuschaltbare Abstützung wieder auf Position gebracht werden. Dies erfordert eine zusätzliche Mechanik, die die Abstützung im richtigen Moment positioniert.

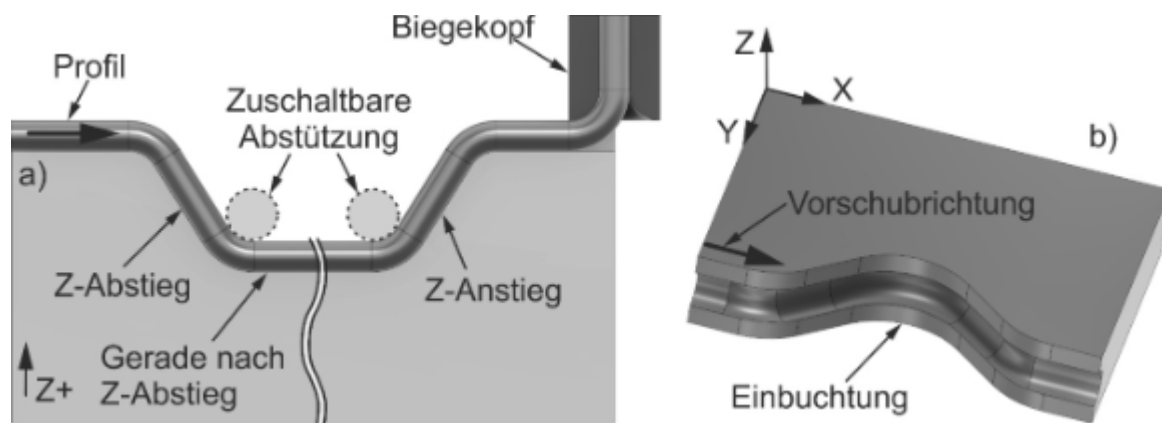


Bild 6.16: Zusätzliche Abstützung a) höhen Wechsel, b) Einbuchtung

Ähnlich verhält es sich mit dem Z-Anstieg. Hier kann es durch die Form des Biegekopfes zu Beginn des Anstiegs zur Kollision mit der Werkzeugform kommen, da der Biegekopf meist Rotationssymmetrisch ist und sich zum Teil vor der Umformzone befindet. Eine Möglichkeit ist dabei wieder eine zuschaltbare Abstützung anzubringen, die das Profil an dieser Stelle runterzieht und fixiert. Dadurch wird der zusätzliche Werkzeugaufwand höher, da diesmal der Biegekopf die Positionierung behindert.

Weitere Herausforderungen stellen Einbuchtungen in der Ebene bei 3D-Geometrie dar (**Bild 6.16b**). Bei 2D-Geometrien kann durch das Anbringen einer Nut das Profil problemlos in beide Seiten abgestützt werden. Bei 3D-Geometrien kann eine seitliche Abstützung nicht immer in beide Richtungen gewährleistet werden. Vor allem Geometrien mit kurzen Einbuchtungen, die kleiner als der Biegekopfradius sind, stellen eine Herausforderung dar. Beim Abfahren solcher Geometrien kann das Profil nicht ohne Kollision verlegt werden, da der Versatz und die Anpassung der Kinematik dies verhindern (**Bild 6.1**).

6.5.4 Prozessgrenzen durch Stützstelle

Die Gestaltung der Stützstellen ist von der zu fertigenden Geometrie abhängig und wird dadurch stark eingeschränkt. Trotzdem lassen sich auch hier Grenzen feststellen. Ein gutes Beispiel dafür ist der Radius der Stützstelle, der gleichzeitig auch den Biegeradius für B3 darstellt. Dieser ist zusätzlich auch querschnittsabhängig. Dabei lassen sich einfache Vollmaterialprofile, ähnlich wie beim Biegekopfradius, bis zu einem Stützstellenradius von $2xD$ in einer angemessenen Qualität fertigen. Dabei ist zu erwähnen, dass hier bei rechteckähnlichen Geometrien zu einer Querschnittsdeformationen in Form von Aufstauchungen im Innenbogen und Ausdünnungen im Außenbogen kommt. Dagegen weisen kreisrunde Querschnitte Abflachungen des Querschnitts im Innenbogen durch das Anpressen an die Stützstelle auf (**Bild 5.13**). Dagegen sind für Hohlprofile wie Rohre Biegeradien von $>3xD$ zu empfehlen. Bei kleineren Biegeradien kann der Querschnitt kollabieren. Durch Füllmaterial kann dieser stabilisiert werden, dass im Anschluss z. B. wieder ausgeschmolzen oder entfernt werden kann.

Eine weitere Prozessgrenze stellt die Ausführung der Abstützung dar. Hier gibt es einen Parameter, dessen beide Auswirkungen aufeinander angepasst werden müssen: die Tiefe der Abstützung. Auf der einen Seite ermöglicht eine profilgerechte Abstützung, in Form einer Nut in den Stützstellen, eine Minimierung der Querschnittsdeformation und eine gute Führung des Profils und damit auch eine gute Geometriegenauigkeit. Auch lassen sich dadurch Schwankungen der Vorschubbewegung und Ungenauigkeiten gut kompensieren. Auf der anderen Seite wird durch eine tiefe Nut die Entnahme des fertigegebenen Bauteils erschwert oder sogar unmöglich gemacht. Bei einigen wenigen Geometrien kann das durch die Entnahme der Stützstelle vermieden werden, dies ist sehr aufwendig und für die Praxis oder hohe Stückzahlen nicht tauglich. Dagegen kommen glatte Stützstellen ohne eine profilierte Abstützung des Profilquerschnitts beim aktuellen Stand des Verfahrens nicht wirklich in Frage, da entweder die Querschnittsdeformation das Bauteil unbrauchbar macht oder das Bauteil zu leicht verrutscht, z. B. durch das kurzfristige Stoppen der Werkzeugachsen bei Richtungswechsel. Die einzige Ausnahme stellen hier simple 2D-Geometrien dar. Daher ist hier immer ein Kompromiss zu treffen, was gleichzeitig auch eine Prozessgrenze für das Verfahren darstellt. In den meisten Experimenten wurde daher die Einkerbung für das Profil nur so tief eingebracht, dass das Profil durch das Auffedern nach Ende des Umformprozesses herausgenommen werden konnte. Bei einem Profildurchmesser von 5 mm lag diese zwischen 0,25-0,5 mm.

6.5.5 Prozessgrenzen durch Reibung

Reibung ist ein wichtiger Parameter für das inkrementelle Biegen ins Gesenk und stellt auch eine klare Prozessgrenze für das Verfahren dar. Wenn es um die Werkzeugform und die Stützstellen geht, ist die Reibung wichtig, um das Profil nach dem Ablegen in Position zu halten. Vor allem durch die Verdrillung oder Maßnahmen zu deren Vermeidung wird elastische Energie im Profil gespeichert, die bei zu geringer Reibung dazu führen kann, dass das Profil sich langsam über die Stützstelle verdrillt und im Anschluss mitgezogen wird (**Bild 5.7**). Daher wird bei Werkzeugformelementen und Stützstellen, an denen sich das Profil abstützt, ein möglichst

hoher Reibungskoeffizient empfohlen. Eine in den Experimenten bewährte Methode ist das Sandstrahlen.

Ein weiterer Aspekt ist die Reibung im Biegekopf. Hier liegt das Bestreben in einer Ausbalancierung. Durch die Reibung wird die Vorschubkraft beeinflusst. Zu geringe Reibung reduziert diese so, dass

- die Anpresskraft an der Stützstelle abnimmt und das Profil über diese gezogen werden kann;
- die Rückfederung aufgrund der geringeren Streckung des Profils zunimmt;
- die Position in der Stützstelle nicht korrekt eingehalten wird und schwanken/verrutschen kann. Dies betrifft vor allem 3D-Geometrien.

Die Reibung ist ein wesentlicher Parameter für den Betrag der Vorschubkraft. Für einen erfolgreichen Prozess wird eine ausreichende Vorschubkraft benötigt, die zu einem guten Anteil durch die Reibung erzeugt wird. Darüber hinaus kommt es durch eine zu hohe Reibung zum erhöhten Verschleiß des Profils und einem erhöhten Anstieg der Vorschubkraft. Diese bewirkt dann eine erhöhte Ausdünnung des Profils, bis zum Riss. Daher ist hier immer ein Optimum zu finden.

Hierbei ist zu erwähnen, dass die Reibung auch durch ein gezieltes Abbremsen durch den Vorschub erzeugt werden kann. Diese Methode liefert die besten Ergebnisse, da dadurch der Verschleiß in der Umformzone reduziert und die Spannungsüberlagerung situationsgerecht eingebracht werden kann.

6.6 Entwurf eines erweiterten Biegekopfes mit angetriebener Höhenverstellung

Neben der Bahnplanung ist der Biegekopf ein entscheidender Aspekt für die Umsetzung des Verfahrens in der Praxis, daher wurde ein erweiterter Biegekopf mit Profilführungseinheit und einer angetriebenen Höhenverstellung entwickelt (**Bild 6.17**). Diese Einheit wurde so entwickelt, dass sie an die unterschiedlichsten maschinellen Konzepte mit minimalem Aufwand angepasst werden kann. Über einen Lochkreis kann die Vorrichtung z. B. an einen Portalroboter befestigt werden. Der verwendete Antrieb kann die Positionierung in der Z-Achse übernehmen, sodass für eine praktische Umsetzung nur zwei weitere Achsen benötigt werden, z. B. ein Kreuztisch.

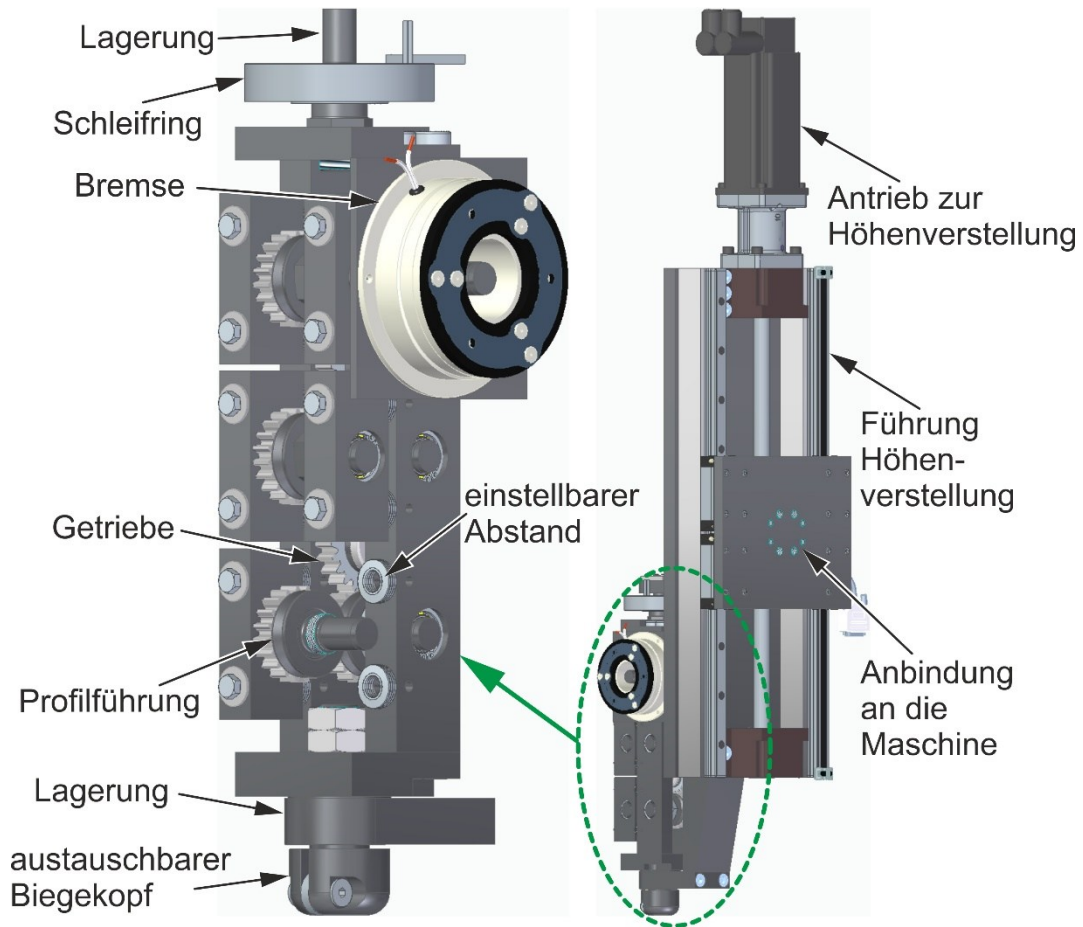


Bild 6.17: Erweiterter Biegekopf mit angetriebener Höhenverstellung nach Helwig (2021)

Die Profilführungseinheit ist drehbar gelagert. Über einen Schleifring ist eine drehbare Stromübertragung an die Bremse möglich. Dadurch kann das verwendete Getriebe eine Bremswirkung auf die Rollen übertragen und damit den Vorschub des Profils bremsen. Sie soll dazu verwendet werden, eine Spannungsüberlagerung aufzubringen und so den Umformprozess gezielt zu beeinflussen.

Die Vorrichtung ist so konstruiert, dass sie aus einer festen und einer einstellbaren Hälfte besteht. Dabei bildet die im Bild rechte Seite das Festlager und die linke das einstellbare Loslager. Damit kann der Druck auf das Profil gezielt eingestellt werden. Der Biegekopf ist zusätzlich drehbar gelagert und kann bei Bedarf ausgetauscht werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die Metallverarbeitende Industrie steht kontinuierlich vor der Herausforderung komplexe Geometrieverläufe herzustellen, die die aktuellen Biegeverfahren an ihre Grenzen bringen. Dies führt dazu, dass immer wieder neuartige und innovative Verfahren entwickelt werden, die für definierte Anwendungsfälle spezialisiert sind. Das Inkrementelle Biegen im Gesenk gehört zu diesen Verfahren. Durch seine Kinematik ermöglicht es die Herstellung überlappenden Geometrien die sich berühren oder nahekommen können. Der größte Vorteil liegt in der neuartigen Gestaltung des Biegekopfes und der Bahnkinematik. Bei den meisten klassischen Biegeverfahren entsteht die Geometrie dadurch, dass das Profil von einer Vorschubeinheit durch einen Biegekopf gefördert wird, der nur leicht schwenken und verkippen kann oder so positioniert wird, dass er um eine Biegeform gebogen werden kann. Dadurch kann es bei Geometrieabschnitten, die sich nahekommen oder sich kreuzen zur Kollision mit dem Biegekopf und/oder den Maschinenelementen kommen. Durch das Inkrementelle Biegen im Gesenk werden nun solche Geometrien ermöglicht. Beim Inkrementellen Biegen im Gesenk entsteht die Geometrieerzeugung durch das Abfahren der Geometrie mit dem Biegekopf, während das Profils dabei in eine Werkzeugform oder um eine Stützstelle abgelegt/umgeformt wird. Diese Art der Geometrieerzeugung ist mit keinem der bekannten Verfahren vergleichbar, daher wurde mit dieser Arbeit eine Grundlage für dieses recht unbekanntes Verfahren erarbeitet.

Um ein grundlegendes Verständnis für das neuartige Verfahren und seinen Ablauf zu schaffen, wurde anhand eines Beispiels der grundlegende Prozessaufbau und Prozessablauf dargestellt. Dazu gehörten die Gestaltung der Kinematik und der Werkzeugform. Dabei wurden der verwendete Versuchsaufbau und die verwendeten Werkzeugelemente dargestellt. Damit wurde gezeigt, wie flexibel man auf die unterschiedliche Umformsituation reagieren kann. Es wurden die untersuchten Geometrien und Werkstoffe dargestellt, darunter Rohrquerschnitte, Kreisquerschnitte und Vierkantquerschnitte. Es wurden wichtige und einzigartige Prozessparameter wie Versatz, Verdrehung und Verdrillung eingeführt und definiert, die für das Verständnis des Verfahrens wichtig sind.

Anschließend wurden der Versuchsaufbau und das FE-Modell erläutert, dass zur Analyse des Inkrementellen Biegens im Gesenk als zentraler Bestandteil dieser Arbeit entwickelt und verwendet wurde. Anhand des Modells konnten Prozessparameter erläutert werden, die die Grundlage für das Prozessverständnis bilden.

Anhand der Experimente und der FE-Untersuchungen wurden Mechanismen und spezifische Eigenschaften des Inkrementellen Biegens im Gesenk dargestellt. Hierbei wurden die Mechanismen in drei Hauptkategorien entsprechend den Freiheitsgraden des Biegekopfes unterteilt: 1D-, 2D- und 3D-Bewegungen, die jeweils aufeinander aufbauen. Mit steigendem Freiheitsgrad wurden die betrachtete Umformzone und der Einflussbereich vergrößert, um die Auswirkungen auf das gefertigte Bauteil umfänglich zu beschreiben.

1D beschränkte sich im Wesentlichen auf die Doppelbiegung am Biegekopfaustritt. Die Mechanismen wurden dabei durch die Wechselwirkungen einzelner Einflussparameter beschrieben. Bei 1D waren es der Biegekopfradius, die Reibung zwischen Profil und Werkzeug, sowie die Materialeigenschaften des Werkstücks. Diese Faktoren spielen eine entscheidende Rolle bei

der Kontrolle der Biegemomente und der resultierenden Kräfte, was letztlich die Genauigkeit und Qualität der gebogenen Profile beeinflusste.

Bei 2D wurden die betrachtete Umformzone bis auf die angrenzende Stützstelle erweitert und es kam eine weitere meist seitliche Biegung hinzu, da es zwischen horizontaler und vertikaler Umformung unterschieden werden muss. Es wurde ausführlich beschrieben wie durch die Änderung des Versatzes zwischen Biegekopf-Mittelachse und der Mittelachse der Sollgeometrie die Biegequalität und die Verdrillung des Profils beeinflusst werden kann. Dabei konnte der Versatz als ein zentraler Parameter identifiziert werden, da er auch dafür verantwortlich ist, dass es zur Wechselwirkung zwischen Biegezone 2 und Biegezone 3 kommt. Es konnte gezeigt werden dass eine Mindest-Reibungskoeffizient zwischen Profil und Stützstelle notwendig ist, damit das Profil nach der Umformung hinter der Stützstelle liegen bleibt, anstatt sich über diese nach dem Weiterfahren des Biegekopfes zu verdrehen. Des Weiteren wird dargestellt, dass der verwendete Werkstoff kaum Einfluss auf die Mechanismen hat, sondern dass dadurch nur die Belastung des Biegekopfes und die Rückfederung sich verändert.

Mit 3D kam ein zusätzlicher Versatz in vertikaler Richtung und ein Sicherheitsabstand zwischen Biegekopf und Stützstelle hinzu, da hierbei nun die Abstützung durch den Werkzeugboden wegfällt und der Biegekopf sich um die Stützstellen drum herum bewegt statt oben drüber. Des Weiteren vergrößerte sich dadurch der Versatz zwischen Biegezone 2 und Biegezone 3, so dass die Wechselwirkungen der beiden Bereiche sich reduzierten. Dadurch entfielen einige unter 2D bekannte Prozessparameter, allerdings kamen neue hinzu, die aus der veränderten Kinematik entstehen.

Im Folgenden wurden analytische Ansätze zur Berechnung des Versatzes und der Vorschubkräfte, mit und ohne Spannungsüberlagerung, dargestellt. Diese Berechnungen sind notwendig, um die optimalen Prozessparameter zu bestimmen, die zu den besten Umformergebnissen führen. Auch wurden sie benötigt um die Kinematik und die Antriebsleistungen auszulegen. Die Berechnung der Vorschubkräfte basierte dabei auf dem Ansatz, dass durch die Doppelbiegung im Biegekopf zwei Biegemomente entstehen, die durch den Kontakt mit dem Biegekopf zu weiteren Reibkräften führen. Daraus konnte anschließend das entsprechende Gleichgewicht gebildet und so die auftretenden Kräfte und Momente berechnet werden. Für die Betrachtung einer Spannungsüberlagerung wird das Biegemoment mit einer konstanten Spannung überlagert, so dass das Biegemoment in zwei unterschiedliche Teile zerlegt wird. Diese konnten anschließend unabhängig voneinander berechnet werden, so dass ein neues Kräfte- und Momentengleichgewicht entstand, das ebenfalls gelöst wurde. Die aufgestellten Ansätze konnten mit einer guten Übereinstimmung zu dem FE-Modell und den aus den Experimenten aufgezeichneten Kräften gegenübergestellt werden.

Es wurden Grundlagen zur Prozessauslegung, Werkzeuggestaltung und Bahnplanung für 2D und 3D Geometrien geschaffen und dargestellt. Es wurde erklärt, wie bei 2D-Geometrien die Einlegezone und der Richtungswechsel angepasst werden muss, um Abweichungen der programmierten Bahn von der Sollgeometrie zu vermeiden. Ein VBA-Programm, integriert in Excel, wurde vorgestellt, um die Berechnung und Anpassung der Kinematik zu automatisieren.

Bei der 3D-Bahnplanung wurde ein besonderer Fokus auf die Kollisionsvermeidung gelegt. Es wurde gezeigt wie die Kreisbahnen um die Stützstellen berechnet und wie diese abgefahren

werden. Ein weiteres VBA-Programm wird vorgestellt und es wurde gezeigt, wie damit die Geometrie für die Berechnung optimiert werden, um die Berechnung in akzeptabler Rechenzeit durchführen zu können. Mit beiden Programmen kann ein fertiges CNC-Programm für die Umformung und die Bahn des Biegekopfes für die FE-Simulationen in Abaqus erstellt werden.

Des Weiteren wurden weiterführende Möglichkeiten zur kinematischen Optimierung der Bahnplanung beschrieben, insbesondere für 3D-Geometrien. Es wurden folgende Ansätze erläutert:

- konstruktive Anpassung des Biegekopfs, dadurch konnte die Kreisbahn um die Stützstelle und der Mindestabstand zwischen Stützstellen verringert und unerwünschte Deformationen reduziert werden.
- Zweistufige-Kreisbahn-Kinematik, dadurch wurde die Bahn in kleine Abschnitte aufgeteilt, um die Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Biegezonen zu minimieren. So konnte die Verdrillung des Profils verringert und die Geometriegenauigkeit im Innenbogen, insbesondere für nicht kreisrunde Querschnitte, verbessert werden.
- Z-Offset Feinanpassung, dadurch konnte das Höhenversatzprobleme durch ein systematisches Überbiegen des Profils in die negative Z-Richtung ausgeglichen und dadurch der Höhenfehler korrigiert werden.

Diese Optimierungen zielten darauf ab, die Genauigkeit und Qualität der gebogenen Bauteile zu verbessern.

Beim Inkrementelle Biegen im Gesenk wird grundsätzlich zwischen der Umformung von kreisrunden und nicht kreisrunden Profilen unterschieden. Bei nicht kreisrunden Querschnitten muss das Verdrillen unterbunden werden, daher wurden Maßnahmen und Strategien vorgestellt, um dies zu erreichen.

Wie alle Biegeverfahren verfügt auch das Inkrementelle Biegen im Gesenk über individuelle und spezifische Prozessgrenzen. So wird gezeigt, dass diese sich zum größten Teil aus der Verwendung spezifischer Profilgeometrien, der Steifigkeit des Biegekopfs und der Kinematik ergeben. Diese Grenzen bestimmen die Eignung des Verfahrens für die Anwendungen und beeinflussen die Qualität und Genauigkeit der produzierten Profile.

Ferner wurde zum Ende der Arbeit ein Ausblick gegeben, wie anwendungstaugliche Werkzeuge gestaltet werden können. Dazu wurde ein erweiterter Biegekopf mit angetriebener Höhenverstellung vorgestellt. Dieser kann sehr flexibel an die unterschiedlichsten Antriebskonzepte adaptiert werden. Dank der analytischen Ansätze können die Antriebskräfte ermittelt und so die Vorrichtung skaliert werden. Die Beschreibung der einzelnen Parameter ermöglicht ein gezieltes Planen des Umformprozesses und mit dem FE-Modell kann der Umformprozess im Voraus bei Bedarf simuliert werden. Damit wurde eine solide Basis für eine praktische und sogar industrielle Umsetzung des Verfahrens geschaffen. Insbesondere für die Herstellung von komplexen Geometrien mit Überschneidungen, kleinen Durchmessern und kreisrunden Querschnitten wird hier ein besonders hohes Potenzial gesehen. Das bereits bei kleinen Stückzahlen. Auch für die Entwicklung von Prototypen wird ein großes Potenzial gesehen, da das Antriebskonzept und die werkzeugtechnische Umsetzung sehr kostengünstig sind und man dazu auf Maschinen zurückgreifen kann, die in vielen industriellen Unternehmen bereits vorhanden sind.

Literaturverzeichnis

- Becker, C., 2014. Inkrementelles Rohrumformen von hochfesten Werkstoffen, Dr.-Ing. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen.
- Becker, C., Quintana, G., Hermes, M., Cavallini, B., Tekkaya, A. E., 2012. Prediction of surface roughness due to spinning in the incremental tube forming process, *Production Engineering* 7, S. 153-166.
- Becker, C., Tekkaya, A. E., Kleiner, M., 2014. Fundamentals of the incremental tube forming process, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63, Heft 1, S. 253-256.
- Beulich, N. V., 2022. Entwicklung einer Methodik zur Auslegung und Absicherung des Freiformbiegens mit bewegter Matrize für dreidimensionale Biegegeometrien, Dr.-Ing. Dissertation, TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.
- Bhundiya, H. G., Cordero, Z. C., 2023. Bend-Forming: A CNC deformation process for fabricating 3D wireframe structures, *Additive Manufacturing Letters* 6, 100146.
- Birkert, A., Haage, S., Straub, M., 2013. Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-34669-9.
- Borchmann, L., Frohn-Sörensen, P., Engel, B., 2020. In situ detection and control of wrinkle formation during rotary draw bending, *Procedia Manufacturing* 50, S. 589-596.
- Borchmann, L., Heftrich, C., Knoche, J., Michael, S., Engel, B., 2023. Control of material flow using measuring methods for wrinkle and crack detection during rotary draw bending, *Procedia CIRP* 118, S. 857-862.
- Burkhardt, B., 2008. Enger geht es kaum. In *Band Rohre Profile*, Jahrgang 55, Nr 10, S. 28-29.
- Chatti, S. 1998. Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen, Dr.-Ing. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen.
- Chatti, S., 2006. Production of Profiles for Lightweight, Habilitation Thesis, Structures, BoD - Books on Demand.
- Chatti, S., Hermes, M., Tekkaya, A. E., Kleiner, M., 2010. The new TSS bending process: 3D bending of profiles with arbitrary cross-sections, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59, S. 315-318
- Chena, H., Wang, H., El-Aty, A. A., Qin, Y., Li, J., Zhang, Y., Li, T., Gu, X., 2021. Impact of bending dies with different friction forms on forming force and quality of tubes manufactured by free bending technology, *Chinese Journal of Aeronautics* 34, Heft 4, S. 253-264.
- Cheng-long, Y., Xiao-qiang, L., 2011. Theoretical analysis on springback of L-section extrusion in rotary stretch bending process, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 21, Heft 12, S. 2705-2710.
- Christofilis, J. T., Grapsas, S. C., Devices, systems and methods for automated wire bending. United States Patent, US 2010/0147048 A1, 17.01.2010.

- Deng, T., Li, D., Li, X., Ding, P., Zhao, K., 2014. Hot Stretch Bending and Creep Forming of Titanium Alloy Profile, *Procedia Engineering* 81, S. 1792-1798.
- Deutsches Institut für Normung e.V., 1983/DIN 66025 Teil 1. Programmaufbau für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen, Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., 1991/DIN ISO 2768 Teil 1. Allgemeintoleranzen Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung Teil 1, Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., 2003/DIN 8580:2003-09. Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung, Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., 2003/DIN 8582:2003-09. Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht, Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., 2003/DIN 8586:2003-09. Fertigungsverfahren Biegeumformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., 2019/DIN EN 12449. Kupfer und Kupferlegierungen - Nahtlose Rundrohre zur allgemeinen Verwendung, Einteilung, Beuth Verlag, Berlin.
- Deutsches Institut für Normung e.V., 2024/ DIN EN 13480-4. Metallische industrielle Rohrleitungen - Teil 4: Fertigung und Verlegung, Beuth Verlag, Berlin.
- Doege, E., Behrens, B. A., 2010. Handbuch Umformtechnik - Grundlagen, Technologien, Maschinen. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-04248-5.
- Doege, E., Meyer-Nolkemper, H., Saeed, I., 1986. Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe, Hanser Verlag München Wien, ISBN 3-446-14427-7.
- Elsing, F., 2014. Verfahren der Rohr- und Profilbiegetechnik, Bachelorarbeit, Technische Universität Dortmund.
- Engel, B., Gerlach, C., Cordes, S., 2008. Biegemomentenabschätzung des Dornbiegeverfahrens, www.utfscience.de.
- Fechler, S., Fels, I., Hub, S., 2012. Materialmodellierung bei der FE-Simulation von Karosserieziehprozessen, Interne Projektarbeit (Masterprojekt), Hochschule Heilbronn.
- Finkenstein, E., Kleiner, M., 1995. Berichte zum Forschungsvorhaben "Erhöhung der Flexibilität beim Profilbiegen durch Entwicklung eines neuen Biegeverfahrens", Lehrstuhl für Umformende Fertigungsverfahren, Universität Dortmund.
- Gantner, P., Bauer, H., Harrison, D. K., De Silva, Anjali, K. M., 2005. Free-Bending - A new bending technique in the hydroforming process chain, *Journal of Materials Processing Technology* 167, S. 302-308.
- Geiger, M., Sprenger, A., 1998. Fehlertolerantes Biegen von Aluminium-Strangpreßprofilen, *Blech Rohre Profile* 12/4, S. 38-42.
- Geleji, A., 1967. Bildsame Formgebung der Metalle, Akademie Verlag GmbH, Berlin.

- Gerlach, C., 2010. Ein Beitrag zur Herstellung definierter Freiformbiegegeometrien bei Rohren und Profilen, Dr.-Ing. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen.
- Ghiotti, A., Simonetto, E., Bruschi, S., Bariani, P. F., 2017. Springback measurement in three roll push bending process of hollow structural sections, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 66, Heft 1, S. 289-292.
- Groth, S., Frohn, P., Engel, B., 2019. Product planning system for manufacture-oriented modeling of freeform bend tubes produced by three-roll-push-bending, *Procedia Manufacturing* 34, S. 10-18.
- Gu, Z., Lü, M., Li, X, Xu, H., 2016. Stretch bending of Z-section stainless steel profile. *Journal of Iron and Steel Research International* 23, Heft 6, S. 525-530.
- Guo, X., Ma, Y., Chen, W., Xiong, H., Xu, Y., El-Aty, A. A., Jin, K., 2018. Simulation and experimental research of the free bending process of a spatial tube, *Journal of Materials Processing Technology* 255, S. 137-149.
- He, Y., Henga, L., Zhiyonga, Z., Meia, Z., Jinga, L., Guangjunb, L., 2012. Advances and Trends on Tube Bending Forming Technologies, *Chinese Journal of Aeronautics* 25, Heft 1, S. 1-12.
- He, Y., Jing, Y., Mei, Z., Heng, L., Yongle, K., 2009. 3D numerical study on wrinkling characteristics in NC bending of aluminum alloy thin-walled tubes with large diameters under multi-die constraints, *Computational Materials Science* 45, Heft 4, S. 1052-1067.
- Helwig, M., 2021. Entwurf und Ausarbeitung eines Konzepts bezüglich einer Vorrichtung zum Inkrementellen Biegen im Gesenk, Projektarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.
- Heng, L., He, Y., 2011. A Study on Multi-defect Constrained Bendability of Thin-walled Tube NC Bending Under Different Clearance, *Chinese Journal of Aeronautics* 24, Heft 1, S. 102-112.
- Heng, L., He, Y., Mei, Z., Rui-Jie, G., 2006. Forming characteristics of thin-walled tube bending process with small bending radius, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 16, Sonderheft 2, S. 613-623.
- Heng, L., He, Y., Mei, Z., Zhichao, S., Ruijie, G., 2007. Role of mandrel in NC precision bending process of thin-walled tube, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 47, Heft 7-8, S. 1164-1175.
- Heng, L., He, Y., Zhiyong, Z., Zekang, W., 2013. 'Size effect' related bending formability of thin-walled aluminum alloy tube, *Chinese Journal of Aeronautics* 26, Heft 1, S. 230-241.
- Hermes, M., 2011. Neue Verfahren zum rollenbasierten 3D-Biegen von Profilen, Dr.-Ing. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen.
- Hermes, M., Chatti, S., Weinrich, A., Tekkaya, A. E., 2008. Three-Dimensional Bending of Profiles with Stress Superposition, *International Journal of Material Forming*, Sonderheft 1, S. 133-136.
- Hermes, M., Holstein, V., 2021. Investigation of an Integrated Process for Bending and Cross-Section Forming of Tubular Lightweight Parts Based on a Working Media Made of Materials

with High Plasticity. Forming the Future - Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity. The Minerals, Metals & Materials Series, Cham, 11 July, ISBN 978-3-030-75380-1.

Hermes, M., Holstein, V., 2022. Innovative Process chain for complex profile forming on adapted rotary draw bending machine, SCT2022 - International Conference on Steels in Cars and Trucks, Milan, Italy, 19-23 June.

Hermes, M., Holstein, V., Conze, H., Verfahren zur Herstellung von gebogenen Profilen aus Blech, insbesondere Leichtbauprofilen, auf einer Biegemaschine sowie eine Werkzeuganordnung an einer Biegemaschine zur Herstellung von gebogenen Profilen, DE102019006796A1, 29.09.2019.

Hermes, M., Holstein, V., Verfahren und Vorrichtung zur Herstellung von komplex geformten Profilbauteilen mit gebogener Längsachse und variierendem Profilquerschnitt mittels plastischer Wirkmedien, DE102021003711A1, 20.07.2021.

Hermes, M., Kleiner, M., Vorrichtung zum Profilbiegen, DE102007013902A1, 25.09.2008.

Hermes, M., Kurze, B., Verfahren und Vorrichtung zur Umformung eines Stangenmaterials, DE102007046870A1, 09.04.2009.

Hermes, M., Staupendahl, D., Becker, C., Tekkaya, A. E., 2011. Innovative machine concepts for 3D bending of tubes and profiles, Key Engineering Materials 473, S. 37-42.

Hinchy, E. P., Carcagno, C., O'Dowd N. P., McCarthy, C. T., 2020. Using finite element analysis to develop a digital twin of a manufacturing bending operation, Procedia CIRP 93, S. 568-574.

Hockett, J. E., Sherby O. D., 1975. Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 23, Heft 2, S. 87-98.

Hoffmann, H., Neugebauer, R., Spur, G., 2012. Handbuch Umformen, Carl Hanser Verlag, München, ISBN 978-3-446-42778-5.

Holstein, V., Hermes, M., 2017. Vorschlag für einen Qualitätsstandard für Profilbiegebauteile, Umformtechnik.net Whitepaper, Meisenbach Verlag, Bamberg.

Holstein, V., Hermes, M., 2018. Normvorschlag für Profil-Biegeteile, Draht, Meisenbach Verlag, Bamberg, Heft 3, S. 12-13.

Holstein, V., Hermes, M., Tekkaya, A. E., 2020. Analysis of incremental die bending of wires and tubes, Production Engineering 14, Heft 2, S. 265-274.

Horlacher, H. B., Helbig, U., 2016. Rohrleitungen 1, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg, ISBN 978-3-642-39842-1.

Hosford, W. F., Caddell, R. M., 2007. Metal forming - mechanics and metallurgy, Cambridge University Press, ISBN 100511354533.

Kahl, K. W., 1982. Automatisierung von Umformmaschinen - Vorausbestimmung des Biege- winkels, Industrieanzeiger 85, S. 22-24.

- Kuhnen, C., Mathes, C., Engel, B., Hermes, M., Tekkaya, A. E., Gerlach, C., 2013. Standards machen Anwendern und Biegeexperten das Leben leichter, *MM - Maschinenmarkt*, Ausgabe 11, Würzburg, S 24-28.
- Kursetz, E., 1970. Maschinen für das Kaltbiegen und Streckformen von Rohren und Profilen aus Aluminiumwerkstoffen, *Fachzeitschrift für Walzwerkstechnik, Blechbearbeitung, gezogene und geschweisste Rohre*, Michael Tritsch Verlag Düsseldorf, Jahrgang 11, Heft 9, S. 447-454.
- Kyriakides, S., Corona, E., 2007. *Pipe and Tube Manufacturing Processes, Mechanics of Off-shore Pipelines*. Elsevier, S. 59-88, ISBN: 9780128168592.
- Lafou, M., Mathieu, L., Pois, S., Alochet, M., 2016. Manufacturing System Flexibility: Product Flexibility Assessment, *Procedia CIRP* 41, S. 99 - 104.
- Lange, K., 1990. *Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 3: Blechbearbeitung*, 2. Auflage, Springer, Berlin, ISBN 978-3-662-10687-7.
- Li, H., Yang, H., Song, F. F., Zhan, M., Li, G.J., 2012. Springback characterization and behaviors of high-strength Ti-3Al-2.5V tube in cold rotary draw bending, *Journal of Materials Processing Technology* 212, Heft 9, S. 1973-1987.
- Li, H., Yang, H., Zhan, M., Kou, Y. L., 2010. Deformation behaviors of thin-walled tube in rotary draw bending under push assistant loading conditions, *Journal of Materials Processing Technology* 210, Heft 1, S. 143-158.
- Liu, T., Wang, Y., Wu, J., Xia, X., Wang, J., Wang, W., Wang, S., 2015. Springback analysis of Z & T-section 2196-T8511 and 2099-T83 Al-Li alloys extrusions in displacement controlled cold stretch bending, *Journal of Materials Processing Technology* 225, S. 295-309.
- Ludwik, P., 1903. *Technologische Studie über Blechbiegung - ein Beitrag zur Mechanik der Formänderungen*, *Technische Blätter - Zeitschrift des Deutschen Polytechnischen Vereins in Böhmen*, S. 133-159.
- Ludwik, P., 1909. *Elemente der technologischen Mechanik*, Springer-Verlag, Berlin.
- Lv, G., Zhang, S., Song, L., Ma, F., Wang, Z., Liu, Y., 2023. Influence of auxiliary mold stretch-bend forming on the forming quality for L-section aluminum alloy profile, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 6, Heft 2, S. 254-263.
- Ma, J., Tronvoll, S. A., Welo, T., 2023. Prediction and analysis of real-time forces in novel 3D flexible rotary stretch forming of complex profiles, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 43, S. 158-169.
- Murata, M., Aoki, Y., 1996. Analysis of circular tube bending by MOS bending method, *Advanced technology of plasticity* 1, S. 505-508.
- Nadai, A., 1927. *Der bildsame Zustand der Werkstoffe*, Verlag. J. Springer, Berlin.
- Nadai, A., Wahl, M., 1931. *Plasticity*, McGraw Hill, New York.
- Nazari, E., Staupendahl, D., Löbke, C., Tekkaya, A. E., 2019. Bending moment in incremental tube forming, *International Journal of Material Forming* 12, Heft 1, S. 113-122.

- Neugebauer, R., 2007. Hydro-Umformung, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg ISBN 3-540-21171-3.
- Neugebauer, R., Drossel, W. G., Lorenz, U., Luetz, N., 2002. Hexabend - A New Concept for 3D-free-form Bending of Tubes and Profiles to Preform Hydroforming Parts and Endform Space-frame-components, *Advanced Technology of Plasticity 2*, S. 1465-1470.
- Nölke, T., 2016. Konstruktion eines Drahtvorschubes für ein Biegewerkzeug zum Inkrementellen-Drahtbiegen im Gesenk, Projektarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.
- Oehler, G. Kaiser, F., 1966. Schnitt-, Stanz- und Ziehwerkzeuge, Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, ISBN 978-3-662-12969-2
- Oehler, G., 1963. Biegen unter Pressen, Abkantpressen, Abkantmaschinen, Walzenrundbiegemaschinen, Profilwalzmaschinen, Carl Hanser Verlag, München.
- Oehler, G., 1963. Biegen, Carl Hanser Verlag, München, Wien.
- Reihle, M., 1961. Verfahren zur Ermittlung der Fließkurve von Stahl aus der Gleichmaßdehnung und der Zugfestigkeit, *Blech*, S. 828-833.
- Rosenkranz, D., 2018. Entwicklung eines Prozessplanungssystems für 2D IGB von Profilen, Projektarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.
- Rosenkranz, D., 2019. Entwicklung eines 3D Prozessplanungssystems für einen neuartigen Profilbiegeprozess, Bachelorarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.
- Schenk, H., 2023. Erweiterung des Versuchsaufbaus und Durchführung von Untersuchungen zum inkrementellen 3D-Biegen in gestützten Konturen, Bachelorarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.
- Schenk, H., 2023. Inkrementelles Biegen von Vierkantprofilen, Projektarbeit, Fachhochschule Südwestfalen.
- Schiller, M., Heftrich, C., Engel, B., 2021. Remote Production, *Procedia CIRP 99*, S. 242-247.
- Schmidt-Offhaus, E., 1993. Neue Space-Frame-Technik für Karosserien aus Aluminium, *ATZ/MTZ-Sonderheft Fertigungstechnik '93*, S. 7-9.
- Schuler GmbH, 1996. Handbuch der Umformtechnik, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Shimada, N., Tomizawaa, A., Kubotaa, H., Moria, H., Harab, M., Kuwayama, S., 2014. Development of three-dimensional hot bending and direct quench technology, 11th International Conference on Technology of Plasticity, ICTP, 19-24 October, Nagoya, Japan.
- Shiqiang, L., Jun, F., Kelu, W., 2016. Plastic deformation analysis and forming quality prediction of tube NC bending, *Chinese Journal of Aeronautics 29*, Heft 5, S. 1436-1444.
- Simonetto, E., Ghiotti, A., Bruschi, S., 2017. Dynamic detection of tubes wrinkling in three roll push bending, *Procedia Engineering 207*, S. 2316-2321.
- Simonetto, E., Ghiotti, A., Bruschi, S., Gemignani, R., 2017. Dynamic Detection of Instability Defects in tube Rotary Draw Bending, *Procedia Manufacturing 10*, S. 319-328.

- Sprenger, A., 1998. Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen, Dr.-Ing. Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg.
- Staupendahl, D., 2021. 3D Profile Bending with Five Controlled Degrees of Freedom, Dr.-Ing. Dissertation, Shaker Verlag, Aachen.
- Staupendahl, D., Hermes, M., Tekkaya, A. E., Verfahren und Vorrichtung zur inkrementellen Herstellung von gebogenen Drähten, Rohren, Profilen oder dgl. aus stangenförmigen metallischen Materialien, WO2015/144103AI, 25.03.2014.
- Staupendahl, D., Tekkaya, A. E., 2017. The reciprocal effects of bending and torsion on springback during 3D bending of profiles, *Procedia Engineering* 207, S. 2322-2327.
- Staupendahl, D., Tekkaya, A. E., 2018. Mechanics of the reciprocal effects of bending and torsion during 3D bending of profiles, *Journal of Materials Processing Technology* 262, S. 650-659.
- Swift, H. W., 1952. Plastic instability under plane stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 1, Heft 1, Pergamon Press Ltd., London, S. 1-18.
- Vatter, P. H., Plettke, R., 2013. Process model for the design of bent 3-dimensional free-form geometries for the three-roll-push-bending process, *Procedia CIRP* 7, S. 240 - 245.
- Vatter, P., 2015. Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode, Dr.-Ing. Dissertation, Meisenbach Verlag, Bamberg.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2014/VDI 3430. Rotationszugbiegen von Profilen, Beuth Verlag, Berlin.
- Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2016/VDI 3431. Biegen von Profilen Prüfhinweise für Profilbiegebauteile, Beuth Verlag, Berlin.
- Vipavc, D., 2018. Eine Simulationemethode für das 3-Rollen-Schubbiegen, Dr.-Ing. Dissertation, FAU University Press, Erlangen.
- Wang, T. H., 1998. Tube plastic processing technology, Beijing: China Machine Press.
- Wehner, F., 1997. Das Innovationspotential von Al-Strangpreßprofilen im Automobilbau, Arbeitskreis "Automobil-Werkstoffe 1997", Reihe Praxis-Forum, S. 147-159.
- Weippert, R. G., 1997. Das adaptive Streckbiegen von Aluminiumhohlprofilen, ein Beitrag zum integrierten Technologie- und Innovationsmanagement, Dr.-Ing. Dissertation, ETH Zürich.
- Welo, T., Ma, J., Blindheim, J., Ha, T., Ringen, G., 2020. Flexible 3D stretch bending of aluminium alloy profiles: an experimental and numerical study, *Procedia Manufacturing* 50, S. 37-44.
- Wu, J., Zhang, Z., 2021. An improved procedure for manufacture of 3D tubes with springback concerned in flexible bending process, *Chinese Journal of Aeronautics* 34, Heft 11, S. 267-276.
- Xue, X., Liao, J., Vincze, G., Gracio, J., 2014. Twist Springback of Asymmetric Thin-walled Tube in Mandrel Rotary Draw Bending Process, *Procedia Engineering* 81, S. 2177-2183.

Yang, D. Y., Bambach, M., Cao, J., Duflou, J. R., Groche, P., Kuboki, T., Sterzing, A., Tekkaya, A. E., Lee, C. W., 2018. Flexibility in metal forming, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 67, Heft 2, S. 743-765.

Zener, C., Hollomon, J. H., 1944. Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel. *Journal of Applied Physics* 15, Heft 1, S. 22-32.

Zhan, M., Wang, Y., Yang, H., Long, H., 2016. An analytic model for tube bending springback considering different parameter variations of Ti-alloy tubes, *Journal of Materials Processing Technology* 236, S. 123-137.

Zhang, J. Z., Bhundiya, H. G., Overby, K. D., Royer, F., Lang, J. H., Cordero, Z. C., 2024. Electrostatically Actuated X-Band Mesh Reflector with Bend-Formed Support Structure, *Journal of Spacecraft and Rockets* 61, Heft 6, S. 1519-1528.

Zhao, J., Zhai, R., Qian, Z., Ma, R., 2013. A study on springback of profile plane stretchbending in the loading method of pretension and moment, *International Journal of Mechanical Sciences* 75, S. 45-54.

Zhu, Y. X., Liu, Y. L., Li, H. P., Yang, H., 2013. Springback prediction for rotary-draw bending of rectangular H96 tube based on isotropic, mixed and Yoshida-Uemori two-surface hardening models, *Materials & Design* 47, S. 200-209.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Viktor Holstein
Geburtsdatum: 21 Juni 1983
Geburtsort: Werchnije Sergi (Russland)

Praktisch Erfahrung

Seit 11/2014 Fachhochschule Südwestfalen, Standort Meschede
Wissenschaftlicher Mitarbeiter
10/2010 – 04/2011 VOLKSWAGEN AG, Baunatal
Praxissemester im Bereich Forschung und Entwicklung
04/2005 – 09/2005 Linnenbrink Technik Warburg
CNC Fräser

Akademische Ausbildung

09/2017 – 11/2025 Technische Universität Dortmund
Promotion, Maschinenbau
10/2006 – 07/2014 Universität Kassel
Maschinenbau Studium, Diplom

Schul- und Berufsbildung

09/2005 – 06/2006 Berufliche Schulen des Landkreis Waldeck – Frankenberg
Fachhochschulreife, Technik - Schwerpunkt Maschinenbau
08/2001 – 01/2005 Hans Bartholomey GmbH
Berufsausbildung: Werkzeugmechaniker
05/1995 – 07/2001 Mittelpunktschule Adorf
Fachoberschulreife

Aus der Dortmunder Umformtechnik sind im Shaker Verlag bisher erschienen:

- A. Adelhof: Komponenten einer flexiblen Fertigung beim Profilrunden.
ISBN 3-86111-601-4
- G. Reil: Prozeßregelung numerisch gesteuerter Umformmaschinen mit Fuzzy Logic. ISBN 3-86111-862-9
- F. Maevus: Rechnerintegrierte Blechteilefertigung am Beispiel des Gesenkbiegens. ISBN 3-8265-0104-7
- R. Warstat: Optimierung der Produktqualität und Steigerung der Flexibilität beim CNC-Schwenkbiegen. ISBN 3-8265-1170-0
- H. Sulaiman: Erweiterung der Einsetzbarkeit von Gesenkbiegepressen durch die Entwicklung von Sonderwerkzeugen. ISBN 3-8265-1443-2
- Ch. Smatloch: Entwicklung eines numerisch einstellbaren Werkzeugsystems für das Tief- und Streckziehen. ISBN 3-8265-1465-3
- T. Straßmann: Prozeßführung für das Walzrunden auf der Basis Neuronaler Netze. ISBN 3-8265-1966-3
- L. Keßler: Simulation der Umformung organisch beschichteter Feinbleche und Verbundwerkstoffe mit der FEM. ISBN 3-8265-2256-7
- E. Szücs: Einsatz der Prozeßsimulation bei der Entwicklung eines neuen Umformverfahrens - der Hochdruckblechumformung. ISBN 3-8265-3119-1
- S. Chatti: Optimierung der Fertigungsgenauigkeit beim Profilbiegen.
ISBN 3-8265-3534-0
- F. Haase: Eigenspannungen an dünnwandigen Bauteilen und Schichtverbunden. ISBN 3-8265-4312-2
- N. Austerhoff: Integrierte Produkt- und Prozeßgestaltung für die Herstellung von Blechbiegteilen. ISBN 3-8265-6613-0
- D. Arendes: Direkte Fertigung gerundeter Aluminiumprofile beim Strangpressen. ISBN 3-8265-6442-1
- R. Kolleck: Finite-Element-Simulation wirkmedienbasierter Blechumformverfahren als Teil einer virtuellen Fertigung. ISBN 3-8265-6566-5
- T. Weidner: Untersuchungen zu Verfahren und Werkzeugsystemen der wirkmedienbasierten Blechumformung. ISBN 3-8265-6602-5
- W. Homberg: Untersuchungen zur Hochdruckblechumformung und deren Verfahrenskomponenten. ISBN 3-8265-8684-0

M. Rohleder: Simulation rückfederungsbedingter Formabweichungen im Produktentstehungsprozess von Blechformteilen. ISBN 3-8265-9977-2

V. Hellinger: Untersuchungen zur Methodik der Berechnung und Herstellung von leichten Stützkernverbunden. ISBN 3-8322-0104-1

A. Klaus: Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit und der Prozesssicherheit des Rundens beim Strangpressen. ISBN 3-8322-0208-0

B. Heller: Halbanalytische Prozess-Simulation des Freibiegens von Fein- und Grobblechen. ISBN 3-8322-0923-9

A. Wellendorf: Untersuchungen zum konventionellen und wirkmedienbasierten Umformen von komplexen Feinstblechbauteilen. ISBN 3-8322-2435-1

C. Klimmek: Statistisch unterstützte Methodenplanung für die Hochdruck-Blechumformung. ISBN 3-8322-2994-9

R. Krux: Herstellung eigenschaftsoptimierter Bauteile mit der Hochdruck-Blechumformung und Analyse der induzierten Eigenspannungen. ISBN 3-8322-3551-5

S. Jadhav: Basic Investigations of the Incremental Sheet Metal Forming Process on a CNC Milling Machine. ISBN 3-8322-3732-1

C. Beerwald: Grundlagen der Prozessauslegung und -gestaltung bei der elektromagnetischen Umformung. ISBN 3-8322-4421-2

A. Brosius: Verfahren zur Ermittlung dehnratenabhängiger Fließkurven mittels elektromagnetischer Rohrumformung und iterativer Finite-Element-Analysen. ISBN 3-8322-4835-8

R. Ewers: Prozessauslegung und Optimierung des CNC-gesteuerten Formdrückens. ISBN 3-8322-5177-4

T. Langhammer: Untersuchungen zu neuen Konzepten für PKW-Kraftstoffbehälter. ISBN 3-8322-5300-9

M. Schikorra: Modellierung und simulationsgestützte Analyse des Verbundstrangpressens. ISBN 3-8322-5506-0

M. Schomäcker: Verbundstrangpressen von Aluminiumprofilen mit endlosen metallischen Verstärkungselementen. ISBN 978-3-8322-6039-2

N. Ridane: FEM-gestützte Prozessregelung des Freibiegens. ISBN 978-3-8322-7253-1

R. Shankar: Surface Reconstruction and Tool Path Strategies for Incremental Sheet Metal Forming. ISBN 978-3-8322-7314-9

- U. Dirksen: Testumgebung für Prozessregelungen zum Drei-Rollen-Profilbiegen mit virtuellem und realem Biegeprozess.
ISBN 978-3-8322-7673-7
- D. Risch: Energietransfer und Analyse der Einflussparameter der formgebundenen elektromagnetischen Blechumformung.
ISBN 978-3-8322-8360-5
- M. Marré: Grundlagen der Prozessgestaltung für das Fügen durch Weiten mit Innenhochdruck. ISBN 978-3-8322-8361-2
- D. Becker: Strangpressen 3D-gekrümmter Leichtmetallprofile.
ISBN 978-3-8322-8488-6
- V. Psyk: Prozesskette Krümmen - Elektromagnetisch Komprimieren - Innenhochdruckumformen für Rohre und profilmörmige Bauteile.
ISBN 978-3-8322-9026-9
- M. Trompeter: Hochdruckblechumformung großflächiger Blechformteile.
ISBN 978-3-8322-9080-1
- H. Karbasian: Formgenauigkeit und mechanische Eigenschaften pressgehärteter Bauteile. ISBN 978-3-8322-9250-8
- M. J. Gösling: Metamodell unterstützte Simulation und Kompensation von Rückfederungen in der Blechumformung. ISBN 978-3-8322-9355-0
- H. Pham: Process Design for the Forming of Organically Coated Sheet Metal.
ISBN 978-3-8440-0309-3
- B. Rauscher: Formschlüssig verbundene Metall-Kunststoff-Hybridbauteile durch Integration von Blechumformung und Spritzgießen.
ISBN 978-3-8440-0655-1
- T. Cwiekala: Entwicklung einer Simulationemethode zur zeiteffizienten Berechnung von Tiefziehprozessen.
ISBN 978-3-8440-0701-5
- M. Hermes: Neue Verfahren zum rollenbasierten 3D-Biegen von Profilen.
ISBN 978-3-8440-0793-0
- N. Ben Khalifa: Strangpressen schraubenförmiger Profile am Beispiel von Schraubenrotoren.
ISBN 978-3-8440-0969-9
- J. Kolbe: Thermisch beschichtete, faserverstärkte Polymerwerkzeuge für die Umformung höherfester Blechwerkstoffe.
ISBN 978-3-8440-1353-5

L. Kwiatkowski: Engen dünnwandiger Rohre mittels dornlosen Drückens.
ISBN 978-3-8440-1381-8

T. Kloppenborg: Analyse- und Optimierungsmethoden für das
Verbundstrangpressen.
ISBN 978-3-8440-1384-9

A. Schuster: Charakterisierung des Faserverlaufs in umgeformten Stählen
und dessen Auswirkung auf mechanische Eigenschaften.
ISBN 978-3-8440-1581-2

A. Jäger: Strangpressen von Aluminiumprofilen mit prozessintegrierter
umformtechnischer Weiterverarbeitung.
ISBN 978-3-8440-1654-3

M. M. Hussain: Polymer Injection Sheet Metal Forming – Experiments and
Modeling.
ISBN 978-3-8440-2041-0

M. S. Aydın: Efficient Parameter Characterization for Hardening and Yield
Locus Models for Sheet Metals.
ISBN 978-3-8440-2118-9

A. Canpolat: Experimentelle und numerische Bewertung der
Fließortbestimmung mittels Kreuzzugversuch.
ISBN 978-3-8440-2126-4

V. Güley: Recycling of Aluminum Chips by Hot Extrusion.
ISBN 978-3-8440-2476-0

D. Pietzka: Erweiterung des Verbundstrangpressens zu höheren
Verstärkungsanteilen und funktionalen Verbunden.
ISBN 978-3-8440-2538-5

M. Haase: Mechanical Properties Improvement in Chip Extrusion with
Integrated Equal Channel Angular Pressing.
ISBN 978-3-8440-2571-2

Q. Yin: Verfestigungs- und Schädigungsverhalten von Blechwerkstoffen im
ebenen Torsionsversuch.
ISBN 978-3-8440-2839-3

C. Becker: Inkrementelles Rohrumformen von hochfesten Werkstoffen.
ISBN 978-3-8440-2947-5

R. Hölker: Additiv hergestellte Werkzeuge mit lokaler Innenkühlung zur
Produktivitätssteigerung beim Aluminium-Strangpressen.
ISBN 978-3-8440-3149-2

C. Weddeling: Electromagnetic Form-Fit Joining.
ISBN 978-3-8440-3405-9

A. Güner: In-situ stress analysis with X-ray diffraction for yield locus
Determination.
ISBN 978-3-8440-3414-1

A. Güzel: Microstructure Evolution during Thermomechanical Multi-Step
Processing of Extruded Aluminum Profiles.
ISBN 978-3-8440-3428-8

S. Hänisch: Verzugsanalyse kaltmassivumgeformter und wärmebehandelter
Bauteile.
ISBN 978-3-8440-3761-6

A. Foydl: Strangpressen partiell verstärkter Aluminiumprofile.
ISBN 978-3-8440-3875-0

A. Weinrich Mora: Das Freibiegen mit inkrementeller Spannungsüberlagerung.
ISBN 978-3-8440-4221-4

S. Cai: Tailored and double-direction pressure distributions for vaporizing-foil
Forming.
ISBN 978-3-8440-4255-9

G. Sebastiani: Erweiterung der Prozessgrenzen inkrementeller Blechumform-
verfahren mittels flexibler Werkzeuge.
ISBN 978-3-8440-4359-4

C. Pleul: Das Labor als Lehr-Lern-Umgebung in der Umformtechnik.
Entwicklungsstrategie und hochschuldidaktisches Modell.
ISBN 978-3-8440-4569-7

H. Hassan: Springback in deep drawing – Accurate prediction and reduction.
ISBN 978-3-8440-4924-4

L. Chen: An Investigation of Failure Mechanisms in Forming of Monolithic and
Composite Sheets.
ISBN 978-3-8440-5168-1

L. Hiegemann: Glattwalzen beschichteter Oberflächen.
ISBN 978-3-84440-5419-4

G. Georgiadis: Hot stamping of thin-walled steel components.
ISBN 978-3-8440-5435-4

S. P. Afonichev: Numerische Simulation der Umformung von
Sandwichblechen unter Berücksichtigung großer Krümmungen.
ISBN 978-3-8440-5471-2

D. May: Globally Competent Engineers. Internationalisierung der Ingenieurausbildung am Beispiel der Produktionstechnik.
ISBN 978-3-8440-5615-0

H. Chen: Granular medium-based tube press hardening.
ISBN 978-3-8440-5701-0

G. Grzanic: Verfahrensentwicklung und Grundlagenuntersuchungen zum Inkrementellen Profilverfahren.
ISBN 978-3-8440-5889-5

S. Alkas Yonan: Inkrementelle Kaltumformung von Thermoplasten.
ISBN 978-3-8404-6026-3

P. Sieczkarek: Inkrementelle Blechmassivumformung.
ISBN 978-3-8440-6118-5

S. Ossenkemper: Verbundfließpressen in konventionellen Fließpresswerkzeugen.
ISBN 978-3-8440-6175-8

K. Isik: Modelling and characterization of damage and fracture in sheet-bulk metal forming.
ISBN 978-3-8440-6278-6

S. Gies: Thermische Spulenverluste bei der elektromagnetischen Blechumformung.
ISBN 978-3-8440-6468-1

C. H. Löhbe gen. Brüggemann: Temperaturunterstütztes Biegen und Wärmebehandeln in mehrstufigen Werkzeugen.
ISBN 978-3-8440-6485-8

J. Lueg-Althoff: Fügen von Rohren durch elektromagnetische Umformung – Magnetpulsschweißen.
ISBN 978-3-8440-6558-9

C. Dahnke: Verbundstrangpressen adaptiver Leichtbaukomponenten aus Aluminium und Formgedächtnislegierungen.
ISBN 978-3-8440-6630-2

O. K. Demir: New test and interpretation of electromagnetic forming limits of sheet metal.
ISBN 978-3-8440-6986-0

M. Schwane: Entwicklung und Eigenschaften von Längspressnähten beim Aluminiumstrangpressen.
ISBN 978-3-8440-6994-5

R. Meya: Schädigungskontrolliertes Blechbiegen mittels
Druckspannungsüberlagerung.
ISBN 978-3-8440-7510-6

O. Hering: Schädigung in der Kaltmassivumformung: Entwicklung,
Auswirkungen und Kontrolle.
ISBN 978-3-8440-7525-0

H. Traphöner: Erweiterung der Anwendungsgrenzen des ebenen
Torsionsversuchs.
ISBN 978-3-8440-7737-7

O. Napierala: Tiefzieh-Verbundfließpressen: Analyse, Bauteileigenschaften
und Potentiale.
ISBN 978-3-8440-7856-5

S. Wernicke: Inkrementelle Blechmassivumformung belastungsangepasster
Funktionsbauteile.
ISBN 978-3-8440-7980-7

D. Staupendahl: 3D Profile Bending with Five Controlled Degrees of Freedom.
ISBN 978-3-8440-8006-3

S. Heibel: Schädigung und Versagensverhalten hochfester Mehrphasenstähle.
ISBN 978-3-8440-8269-2

F. Kolpak: Anisotropic Hardening in Cold Forging. Characterization,
Simulation and Consequences.
ISBN 978-3-8440-8519-8

T. Mennecart: In-situ Hybridisierung von Faser-Metall Laminaten.
ISBN 978-3-8440-8566-2

S. Rosenthal: Umformung additiv gefertigter Bleche mit strukturiertem Kern.
ISBN 978-3-8440-8948-6

A. Schulze: Bleche aus stranggepressten Aluminiumspänen:
Herstellung, Charakterisierung und Umformbarkeit.
ISBN 978-3-8440-8968-4

M. Hahn: Umformung mittels vaporisierender Aktuatoren: Experimente und
Modellierung.
ISBN 978-3-8440-9106-9

M. Kamaliev: Isotherme Innenhochdruckumformung geschlossener Profile.
ISBN 978-3-8440-9168-7

F. Maaß: Gezielte Eigenspannungseinstellung in der inkrementellen
Blechumformung.
ISBN 978-3-8440-9373-5

A. Schowtjak: Vorhersage der Porenentwicklung in der Umformtechnik.
ISBN 978-3-8440-9433-6

H. Dardaei Joghan: Hybrid additive manufacturing of metal laminated forming tools.
ISBN 978-3-8440-9481-7

A. K. Komodromos: Entwicklung und Einsatz additiv gefertigter Presshärte-
werkzeuge mit glattgewalzten Oberflächen.
ISBN 978-3-8440-9615-6

F. Schmitz: Prozessanalyse des Hochgeschwindigkeitsscherschneidens.
ISBN 978-3-8440-9979-9

J. J. Martschin: In-situ-Vorhersage und Einstellen der Produkteigenschaften
beim mehrstufigen Presshärten im Folgeverbundwerkzeug.
ISBN 978-3-8191-0337-7

