

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum kombinierten Walzen und Strangpressen

vorgelegt von
M. Sc.
Christoph Heinzel

an der Fakultät III - Prozesswissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. John Banhart
Gutachter: Priv.-Doz. Dr.-Ing. Sören Müller
Gutachter: Prof. em. Dr. Pavel Hora

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 21.07.2022

Berlin 2022

Abstract

Experimental and numerical studies on combined rolling and extrusion

The conventional manufacturing processes for aluminum long products are rolling and extrusion. Rolling mills are associated with high investment costs, large space requirements and time-consuming conversion work when changing products. The discrete character of the extrusion process is not optimal from an energetic point of view. Comparatively new, combined and continuous forming processes have the potential to reduce the investment costs of a system, reduce the space requirement, lower the energy requirements of the process and shorten the set-up times for a product change. The combined rolling and extrusion process investigated in this work belongs to this group of processes and enables the continuous production of profiled long aluminum products.

Through various experimental investigations and the use of computer-aided numerical models, the understanding of the combined rolling and extrusion process is improved in this work. A series of experimental plant tests on an industrial scale is presented. The tests are simulated by a developed simulation model based on the finite element method (FEM). Axial friction tests are used to develop a friction model, which is implemented in the simulation model. The numerical simulation of the process is then repeated. A simulated parametric study of the geometry of the forming space is presented. Through an experimental investigation of the material flow and a subsequent metallographic investigation of the sample material, further insights into the characteristics of the combined forming process are gained.

The analysis of the global process parameters of the experimental plant tests shows fundamental relationships that are effective in the process. The comparison of experimental and calculated results confirms the applicability of the FEM for the prediction of the investigated process variables. The developed friction model explains the characteristics of the interaction between rolls and workpiece. The parameter study provides information about the type and extent of the influence of individual geometric variables of the forming space on relevant process variables. The investigations into the material flow show characteristic peculiarities of the process and prove the applicability of the FEM for their prediction. Experimental and numerical results lead to a division of the forming space into four areas. Rules for the design of the forming space geometry are derived from the subdivision made. Both experimental and numerical investigations prove the existence of a dead zone.

Kurzfassung

Experimentelle und numerische Untersuchungen zum kombinierten Walzen und Strangpressen

Die konventionellen Herstellungsverfahren von Aluminiumlangprodukten sind Walzen und Strangpressen. Walzanlagen sind mit hohen Investitionskosten, großem Platzbedarf und aufwendiger Umrüstarbeit bei einem Produktwechsel verbunden. Der diskrete Charakter des Strangpressverfahrens ist aus energetischer Sicht nicht optimal. Vergleichsweise neue, kombinierte und kontinuierliche Umformverfahren bürden das Potential die Investitionskosten einer Anlage zu reduzieren, den Platzbedarf zu verringern, den Energiebedarf des Prozesses zu senken und die Rüstzeiten bei einem Produktwechsel zu verkürzen. Der in dieser Arbeit untersuchte kombinierte Walz- und Strangpressprozess gehört zu dieser Verfahrensgruppe und ermöglicht die kontinuierliche Herstellung von profilierten Aluminiumlangprodukten.

Durch verschiedene experimentelle Untersuchungen und den Einsatz von computer-gestützten numerischen Modellen, wird das Verständnis zum kombinierten Walz- und Strangpressprozess in dieser Arbeit verbessert. Eine Reihe experimenteller Anlagenversuche im industriellen Maßstab wird hierzu vorgestellt. Die Versuche werden durch ein entwickeltes Simulationsmodell auf der Grundlage der Finiten-Elemente Methode (FEM) nachgebildet. Axiale Reibtests dienen der Entwicklung eines Reibmodells, welches in das Simulationsmodell implementiert wird. Die numerische Nachbildung des Prozesses wird anschließend wiederholt. Eine simulierte Parameterstudie zur Geometrie des Umformraums wird vorgestellt. Durch eine experimentelle Untersuchung des Materialflusses und eine anschließende metallografische Untersuchung des Probenmaterials werden weitere Erkenntnisse über die Charakteristik des kombinierten Umformprozesses erarbeitet.

Die Analyse der globalen Prozessgrößen der experimentellen Anlagenversuche zeigt grundlegende, im Prozess wirkende Zusammenhänge. Der Vergleich von experimentellen und berechneten Ergebnissen bestätigt die Anwendbarkeit der FEM zur Vorhersage der untersuchten Prozessgrößen. Das entwickelte Reibmodell erklärt die Charakteristik der Wechselwirkung zwischen Walzen und Werkstück. Die Parameterstudie gibt Aufschluss über Art und Höhe der Einflussnahme einzelner geometrischer Größen des Umformraumes auf relevante Prozessgrößen. Die Untersuchungen zum Materialfluss zeigen charakteristische Eigenarten des Prozesses und belegen die Anwendbarkeit der FEM zu deren Vorhersage. Experimentelle und numerische Ergebnisse führen zu einer Unterteilung des Umformraumes in vier Bereiche. Durch die getroffene Unterteilung werden Regeln zur Auslegung der Umformraumgeometrie abgeleitet. Sowohl experimentelle als auch numerische Untersuchungen belegen die Existenz einer Toten Zone.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	X
Abkürzungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
2 Stand der Erkenntnisse	3
2.1 Aluminium als Konstruktionswerkstoff	3
2.2 Aluminium in der Warmumformung	4
2.3 Reibung in der Warmumformung	7
2.4 Verfahren zur Herstellung von Aluminiumlangprodukten	8
2.4.1 Walzen	8
2.4.2 Strangpressen	10
2.4.3 Conform-Prozess	11
2.4.4 Kombiniertes Walzen und Strangpressen	12
2.5 Numerische Simulation von Umformprozessen	15
3 Zielsetzung	18
4 Experimentelle Grundlagen	19
4.1 Kombiniertes Walzen und Strangpressen	19
4.2 Axialer Reibtest	20
4.3 Statistische Versuchsplanung	21
4.4 Computertomographie	22
5 Durchführung	24
5.1 Experimentelle Anlagenversuche	24
5.2 Numerische Umformsimulation	25
5.3 Axialer Reibtest	29
5.4 Simulierte Parameterstudie zur Geometrie des Umformraums	31
5.5 Untersuchung des Materialflusses	33
5.5.1 Präparation des Versuchsmaterials	33
5.5.2 Versuchsdurchführung	38
5.5.3 Computertomographie	40
5.5.4 Mikrostrukturuntersuchung	41

6	Versuchsergebnisse	43
6.1	Ergebnisse der Anlagenversuche	43
6.1.1	Phänomenologische Beobachtungen der experimentellen Versuche	43
6.1.2	Gemessene Prozessgrößen der experimentellen Versuche	44
6.1.3	Errechnete Prozessgrößen der simulierten Versuche	48
6.1.4	Kontaktsituation der simulierten Versuche bei Haftreibung	55
6.2	Ergebnisse der axialen Reibversuche	57
6.2.1	Gemessene Reibspannungen der experimentellen Versuche	57
6.2.2	Ermittelte Reibfaktoren der experimentellen Versuche	59
6.2.3	Mathematische Formulierung der wirkenden Reibung	60
6.2.4	Errechnete Prozessgrößen der simulierten Anlagenversuche unter Verwendung des Reibmodells	61
6.2.5	Kontaktsituation und Reibkoeffizienten der simulierten Versuche unter Anwendung des Reibmodells	63
6.3	Ergebnisse der Parameterstudie	65
6.3.1	Simulationsergebnisse der Parameterstudie	65
6.3.2	Koeffizienten der Regressionsgleichungen	67
6.4	Materialflussuntersuchung	68
6.4.1	Ergebnisse der numerischen Simulation	68
6.4.2	Computertomographie des Probenmaterials	70
6.4.3	Computertomographie des Drahtes	73
6.4.4	Ergebnisse der Metallographie	74
7	Diskussion der Versuchsergebnisse	82
7.1	Ursachen der phänomenologischen Beobachtungen	82
7.1.1	Unterteilung der Umformzone nach Kaliberfüllung	82
7.1.2	Kinematische Zusammenhänge zwischen den Kontaktpartnern	84
7.2	Anwendbarkeit der FEM zur Prozessbeschreibung	86
7.2.1	Gemessene und berechnete Drehmomente	86
7.2.2	Gemessene und berechnete Temperaturen	90
7.2.3	Gemessene und berechnete Geschwindigkeiten	91
7.2.4	Ermittelter und errechneter Materialfluss	93
7.3	Einfluss der Geometrie der Umformung auf Prozessgrößen	101
7.3.1	Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf das Drehmoment	101
7.3.2	Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die Drahtgeschwindigkeit	104
7.3.3	Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die radiale Walzkraft	106
7.3.4	Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die axiale Walzkraft	108
7.3.5	Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die Matrizenkraft	110
7.3.6	Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die Kontaktfläche	112
8	Zusammenfassung	115

Abbildungsverzeichnis

1.1	CO_2 -Emissionen von Brennstoffen und Zement	1
2.1	Übersicht der Zugfestigkeitsbereiche von Aluminiumlegierungen	3
2.2	Kubisch-flächenzentrierte Elementarzelle von Aluminium mit beispielhafter Darstellung einer Gleitebene	5
2.3	Vergleich zweier typischer Fließkurvenverläufe von Aluminiumwerkstoffen	6
2.4	Formänderungsgeschwindigkeiten verschiedener Verfahren zur Aluminiumverarbeitung	6
2.5	Schematische Darstellung des Walzens	9
2.6	Schematische Darstellung des kontinuierlichen Drahtwalzprozesses der Firma Properzi	9
2.7	Schematische Darstellung des direkten und indirekten Strangpressens und Gegenüberstellung der sich ausbildenden Umformzonen	10
2.8	Schematische Darstellung des Conform-Prozesses	12
2.9	Schematische Darstellung kombiniertes Walzen und Strangpressen	13
2.10	Geometrie des kombinierten Walzen und Strangpressens	14
2.11	Eindimensionales Beispiel der Werkstück- und Netzbewegung nach der Beschreibungsmethode nach Euler und Lagrange	16
4.1	Versuchsanlage zum kombinierten Walzen und Strangpressen im industriellen Maßstab	19
4.2	Darstellung des Versuchsaufbaus des axialen Reibtests und dessen schematische Beschreibung	20
4.3	Schematische Darstellung eines zu untersuchenden Systems	21
4.4	Prinzipieller Aufbau eines Computertomographen für industrielle Anwendungen	22
5.1	Vorbereitung der Anlagenversuche	24
5.2	Aufbau des Simulationsmodells und Darstellung der Symmetrieebene	26
5.3	Geometrie der Hohlzylinder für den axialen Reibtest	30

5.4	Positionierung der Kupferstäbe in den Versuchskörpern	34
5.5	Temperaturverlauf und Zunderbildung bei der Wärmebehandlung der Kupferstifte	35
5.6	Vergleich der Fließspannungen von Al 99,5 und dem Cu-ETP der Kupferstifte vor und nach der Wärmebehandlung	36
5.7	Herstellungsschritte der Versuchsstücke für die Materialflussuntersuchung	37
5.8	Simulierte Aufheizkurven (links) an unterschiedlichen Positionen im Querschnitt des Versuchsmaterials (rechts)	38
5.9	Verformte und entnommene Probe der experimentellen Materialflussuntersuchung	39
5.10	Aufbau zur computertomographischen Vermessung des umgeformten Versuchsmaterials	40
5.11	Darstellung der Sägeschnitte der Probenentnahme zur anschließenden metallographischen Untersuchung	41
5.12	Darstellung der gesägten Proben zur anschließenden metallographischen Untersuchung	42
6.1	Aluminiumanhaftungen an den Arbeitswalzen	43
6.2	Aus der Umformkammer herausgepresstes Aluminium	44
6.3	Vergleich der gemessenen Drehmomente der Versuchsreihe 1	45
6.4	Darstellung aller gemessenen Drehmomente der experimentellen Anlagenversuche als Boxplot-Diagramm	46
6.5	Gemessene Ein- und Ausgangstemperaturen und Drahtaustrittsgeschwindigkeiten der Anlagenversuche	47
6.6	Beispielhafter simulierter Verlauf des Antriebsmomentes	48
6.7	Temperaturverteilung innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 1,8 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1	49
6.8	Temperaturverteilung innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 2,0 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1	50
6.9	Temperaturverteilung innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 2,2 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1	50
6.10	Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 1,8 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1	51

6.11 Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 2,0 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1	52
6.12 Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 2,2 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1	52
6.13 Simulierte Drehmomente zu den Anlagenversuchen unter der Annahme von Haftreibung	53
6.14 Übersicht der simulierten Austrittstemperaturen des Werkstückes und der Ein- und Auslauftemperaturen der Anlagenversuche	54
6.15 Kontaktsituation bei der Simulation der Anlagenversuche	56
6.16 Gemessene Reibspannungen der axialen Reibversuche über den Reibweg .	57
6.17 Zusammenfassung der gemessenen Reibspannungen über dem Kontaktdruck in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit	58
6.18 Berechnete Reibfaktoren über den Kontaktdruck in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und deren Mittelwert	59
6.19 Darstellung der gemessenen (a) und berechneten (b) Reibfaktoren in Abhängigkeit von Druck und Temperatur	60
6.20 Übersicht der simulierten Drehmomente der Anlagenversuche unter Verwendung des experimentell ermittelten Reibmodells	61
6.21 Übersicht der simulierten Austrittstemperaturen des Werkstückes und der Ein- und Auslauftemperaturen der Anlagenversuche unter Verwendung des Reibmodells	62
6.22 Kontaktsituation und Reibkoeffizienten bei der Simulation der Anlagenversuche unter Anwendung des Reibmodells	64
6.23 Materialfluss der Simulation aus der linken und rechten Ansicht	69
6.24 Materialfluss der Simulation aus der Ansicht von oben und unten	70
6.25 Linke Ansicht der Computertomographie des Versuchsmaterials	71
6.26 Rechte Ansicht der Computertomographie des Versuchsmaterials	71
6.27 Ansicht der Computertomographie des Versuchsmaterials von oben	72
6.28 Ansicht der Computertomographie des Versuchsmaterials von unten	73
6.29 Computertomographische Untersuchung des erzeugten Drahtes	74
6.30 Lichtbildaufnahme von Flachscliff 1	75
6.31 Lichtbildaufnahme von Flachscliff 2	75

6.32	Lichtbildaufnahme von Flachschliff 3	76
6.33	Lichtbildaufnahme von Längsschliff 1	77
6.34	Lichtbildaufnahme von Längsschliff 2	77
6.35	Lichtbildaufnahme von Längsschliff 3	78
6.36	Lichtbildaufnahme von Querschliff 1	78
6.37	Lichtbildaufnahme von Querschliff 2	79
6.38	Lichtbildaufnahme von Querschliff 3	80
6.39	Lichtbildaufnahme von Querschliff 4	80
6.40	Lichtbildaufnahme von Querschliff 5	81
7.1	Zonen beim kombinierten Walz- und Strangpressen bezogen auf Über- und Unterfüllung der Umformkammer	82
7.2	Unterteilung der Umformzone nach den Geschwindigkeitsverhältnissen zwischen Walze und Werkstück	84
7.3	Arbeitswalzenflächen beim kombinierten Walzen und Strangpressen . . .	85
7.4	Vergleich der gemessenen und berechneten Drehmomentverläufe	87
7.5	Gegenüberstellung der experimentellen und simulierten Untersuchungen des Materialflusses aus der rechten Ansicht mit Unterteilung der Umformzone	94
7.6	Gegenüberstellung der experimentellen und simulierten Untersuchungen des Materialflusses aus der linken Ansicht	95
7.7	Gegenüberstellung der experimentellen und simulierten Untersuchungen des Materialflusses aus der Ansicht von oben	97
7.8	Gegenüberstellung der experimentellen und simulierten Untersuchungen des Materialflusses aus der Ansicht unten	99
7.9	Simulierte Verteilung der Werkstückgeschwindigkeit in Prozessrichtung zur experimentell durchgeführten Materialflussuntersuchung im mittigen Längsschnitt und Gegenüberstellung mit der toten Zone aus der metallografischen Untersuchung	100
7.10	Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf das Antriebsmoment beim kombinierten Walzen und Strangpressen	102

7.11	Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf das Antriebsmoment beim kombinierten Walzen und Strangpressen	103
7.12	Wechselwirkungsdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf das Antriebsmoment beim kombinierten Walzen und Strangpressen . . .	103
7.13	Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Drahtgeschwindigkeit beim kombinierten Walzen und Strangpressen	104
7.14	Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Drahtgeschwindigkeit beim kombinierten Walzen und Strangpressen . . .	105
7.15	Wechselwirkungsdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Drahtgeschwindigkeit beim kombinierten Walzen und Strangpressen .	105
7.16	Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die radiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen	106
7.17	Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die radiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen	107
7.18	Wechselwirkungsdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die radiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen	108
7.19	Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die axiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen	109
7.20	Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die axiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen	110
7.21	Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Matrizenkraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen	111
7.22	Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Matrizenkraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen	112
7.23	Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Kontaktfläche beim kombinierten Walzen und Strangpressen	113
7.24	Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Kontaktfläche beim kombinierten Walzen und Strangpressen	114
7.25	Wechselwirkungsdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Kontaktfläche beim kombinierten Walzen und Strangpressen	114

Tabellenverzeichnis

4.1	Versuchsplanbeispiel mit drei Faktoren zu je zwei Stufen	22
5.1	Unveränderliche Größen des Umformraumes der Anlagenversuche	25
5.2	Versuchsplan der experimentellen Anlagenversuche	25
5.3	Gültigkeitsbereiche der Fließkurvenbeschreibung durch den Warmumformansatz 2	27
5.4	Parametersätze der verwendeten Fließkurvenbeschreibung für Al 99,5 für verschiedene Kombinationen aus Temperaturen und Dehnungen	28
5.5	Mechanische Eigenschaften der Werkstoffbeschreibung für Al 99,5	28
5.6	Thermische Eigenschaften der Werkstoffbeschreibung für Al 99,5	29
5.7	Versuchsplan der experimentellen axialen Reibtests	30
5.8	Feste Geometrieparameter der Umformraumgeometrie	32
5.9	Variable Parameter der Umformraumgeometrie und deren verwendete Ausprägungen	32
5.10	Wirkungsflächenversuchsplan der Parameterstudie zur Untersuchung der Einflüsse einzelner geometrischer Größen des Umformraumes	33
6.1	Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Anlagenversuche	47
6.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der simulierten Anlagenversuche	55
6.3	Parameter des Reibmodells	60
6.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der simulierten Anlagenversuche unter Anwendung des entwickelten Reibmodells	63
6.5	Anpassungen des Versuchsplans der Parameterstudie zur Untersuchung der Einflüsse einzelner geometrischer Größen des Umformraumes	66
6.6	Simulationsergebnisse der Parameterstudie	66
6.6	Fortsetzung der Simulationsergebnisse der Parameterstudie	67
6.7	Koeffizienten zu den einzelnen Termen der Regressionsgleichungen	68
7.1	Vergleich der unterschiedlich ermittelten Drehmomente und Abweichungen der berechneten zu den gemessenen Werten	89

7.2	Vergleich der unterschiedlich ermittelten Ausgangstemperaturen und Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Bereichen	91
7.3	Vergleich der unterschiedlich ermittelten Drahtaustrittsgeschwindigkeiten	93

Abkürzungsverzeichnis

A_0	Querschnittsfläche am Eingang der Umformzone
A_1	Querschnittsfläche im Walzspalt
A_2	Querschnittsfläche an der Matrizenstirnseite
A_3	Querschnittsfläche des Fertigproduktes
AA	Aluminium Association
Al	Aluminium
b_0	Breite am Eingang der Umformzone
b_1	Breite im Walzspalt
b_2	Breite an der Matrizenstirnseite
b_3	Breite des Fertigproduktes
c	Spezifische Wärmekapazität
DIN	Deutsches Institut für Normung
E	Elastizitätsmodul
F_G	Gesamtkraft
F_N	Normalkraft
F_N	Reibkraft
FEM	Finite Elemente Methode
h_0	Höhe am Eingang der Umformzone
h_1	Höhe im Walzspalt
h_2	Höhe an der Matrizenstirnseite
h_3	Höhe des Fertigproduktes
ISO	International Standardization Organisation
k	Schubfließgrenze
k_f	Fließgrenze
kfz	kubisch-flächenzentriert
l_d	Gedrückte Länge

M	Drehmoment
m	Reibfaktor
Mg	Magnesium
n	Drehzahl
r	Radius
R_m	Zugfestigkeit
r_W	Radius der Arbeitswalzen
SFE	Stapelfehlerenergie
St	Stahl
T	Temperatur
Ti	Titan
U	Umdrehungen
v_0	Stranggeschwindigkeit am Eingang der Umformzone
v_1	Stranggeschwindigkeit im Walzspalt
v_2	Stranggeschwindigkeit an der Matrizenstirnseite
v_3	Stranggeschwindigkeit des Fertigproduktes
v_W	Bahngeschwindigkeit der axialen Kontaktfläche der Arbeitswalzen
α	Wärmeleitkoeffizient
φ	Umformgrad
$\dot{\varphi}$	Dehnrage
λ	Spezifischer Wärmeausdehnungskoeffizient
μ	Reibbeiwert
ν	Querkontraktionszahl
ρ	Dichte
τ	Reibschubspannung

1 Einleitung

Die heute allgegenwärtigen Themen Nachhaltigkeit und Energieeffizienz gewinnen auch in der metallverarbeitenden Industrie zunehmend an Bedeutung [oV91] [Sto13]. Die Abbildung 1.1 veranschaulicht die seit Jahren anwachsenden CO_2 -Emissionen als einen wichtigen Grund dieser zunehmenden Relevanz. Durch den Einsatz des Leichtbauwerkstoffes Aluminium kann in verschiedenen Industriesektoren eine signifikante Reduktion der klimaschädlichen Emissionen bewirkt werden. Diesem Argument sind die gute Verfügbarkeit [Fri17] und die gute Einstellbarkeit der mechanischen und technologischen Eigenschaften des Werkstoffes als Ursache des bis heute stetigen Anstiegs des Produktionsvolumens von Aluminium hinzuzufügen. Mit dem weltweiten Anstieg des Produktionsvolumens von Aluminium [Kam99] erhöht sich ebenfalls das hergestellte Volumen profilierter Aluminiumlangprodukte. In diesem Zusammenhang ist eine Zunahme des Aufbaus der vom Markt geforderten kleineren und flexibleren Produktionslinien zu erkennen [Dov15] [Sid05]. Verglichen mit den konventionellen Verfahren Walzen und Strangpressen besitzen neue, kombinierte und kontinuierlich gestaltete Umformverfahren das Potential, diese Marktanforderungen besser zu erfüllen. Es werden niedrigere Investitionskosten erforderlich, der notwendige Platzbedarf wird verringert, der Energiebedarf des Prozesses wird signifikant reduziert und die erforderlichen Rüstzeiten werden verkürzt [Sid05] [Ded13] [Sok15].

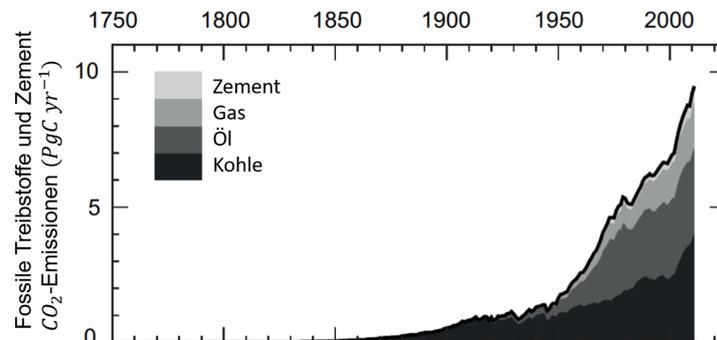


Abbildung 1.1: CO_2 -Emissionen von Brennstoffen und Zement [Sto13]

Die konventionellen und in der industriellen Anwendung am meisten verbreiteten Herstellungsverfahren von Aluminiumlangprodukten sind das Walzen und Strangpressen [Dov15] [Zas10]. Die Anschaffung konventioneller Walzanlagen ist mit hohen Investitionskosten, großem Platzbedarf und aufwendigen Umrüstarbeiten zur Umstellung der Anlage auf die Herstellung anderer Produkte verbunden. Der diskrete Charakter des Strangpressverfahrens entspricht aus energetischer Sicht nicht den heutigen ökologischen Anforderungen. Der gegossene Strang kühlt ab, wird mechanisch bearbeitet, erneut energieaufwendig erwärmt und schlussendlich zum Endprodukt extrudiert.

In den siebziger Jahren wurden viele Bemühungen unternommen, Verfahren zu entwickeln, welche das konventionelle Strangpressen kontinuierlich gestalten [Ale80b] [Sok15]. Aus diesen Arbeiten resultierende kontinuierliche Umformprozesse zur Herstellung von Aluminiumlangprodukten sind unter anderem Conform, Extrolling und Linex. Neue und bezüglich der gesamten Prozesskette weiter vorne ansetzende Verfahren kombinieren darüber hinaus den Gießprozess zusätzlich zum Walzen und Extrudieren. Castex und Caster können als Beispiele derartiger Verfahren genannt werden [Dov15]. Die Kosteneffizienz dieser kontinuierlichen Verfahren kann im Vergleich zu deren herkömmlichen Pendanten um 30 – 50 % gesteigert und die Produktivität um den Faktor 2 – 3 erhöht werden.

Das in dieser Arbeit untersuchte kontinuierliche Umformverfahren ist die Kombination aus Walzen und Strangpressen. Der Energiebedarf dieses Verfahrens ist im Vergleich zum Strangpressen um den Faktor 10 und im direkten Vergleich zum Konkurrenzverfahren Conform um den Faktor 4 – 5 niedriger. Die mechanischen Eigenschaften der hergestellten Erzeugnisse unterscheiden sich von denen der konventionell produzierten Gegenstücke [Ale80b]. Hinsichtlich der resultierenden Materialeigenschaften ist das kombinierte Walzen und Strangpressen verglichen mit dem Walzen der bessere Prozess. Als Grund hierfür wurden die hohen Scherungen in Kombination mit dem hohem Druck in der Region vor der Matrize benannt [Sta85].

Die konventionellen Umformprozesse Walzen und Strangpressen sind wissenschaftlich intensiv untersucht und haben sich in der industriellen Praxis bereits seit vielen Jahren bewährt. Beim kombinierten Walz- und Strangpressverfahren ist der allgemeine Stand der Technik bezogen auf wissenschaftliche Untersuchungen sowie industrielle Anwendungserfahrung im Vergleich zu den etablierten Verfahren gering [Sok15].

Die Anwendbarkeit der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Nachbildung des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses ist verglichen mit den etablierten Umformprozessen weniger belegt. Es existiert kein Modell zur Beschreibung der im Prozess wirkenden Reibung zwischen Arbeitswalzen und Werkstück in Abhängigkeit vom Kontaktdruck und von der Temperatur. Ein Verständnis zu den quantitativen Einflüssen einzelner geometrischer Größen des Umformraumes auf globale Prozessgrößen liegt nicht vor und die zwischen diesen Geometrieparametern vorliegenden Abhängigkeiten wurden bisher nicht systematisch untersucht. Die Erkenntnisse über den vorherrschenden Materialfluss während der Umformung sind gering. Ebenso ist die Einsetzbarkeit numerischer Simulationsmodelle zur Vorhersage des Materialflusses nicht experimentell nachgewiesen.

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Aluminium als Konstruktionswerkstoff

Die Dichte von Aluminium liegt mit $\rho_{Al} = 2,7 \frac{g}{cm^3}$ bei Raumtemperatur [Alt13] deutlich unterhalb der Dichte von Stahl mit $\rho_{St} = 7,8 \frac{g}{cm^3}$ [Boe08]. Im Vergleich zu anderen Leichtbauwerkstoffen mit noch geringerer Dichte wie bspw. Titan mit $\rho_{Ti} = 4,5 \frac{g}{cm^3}$ oder Magnesium mit $\rho_{Mg} = 1,74 \frac{g}{cm^3}$ [Mue07] ist Aluminium signifikant günstiger. Aus diesem Grund wird Aluminium heute für ein breites Spektrum an Anwendungen eingesetzt und ist nach Stahl das am häufigsten verwendete Metall. Die weltweite Jahresproduktion von Primäraluminium verdreifachte sich von 20 000 t im Jahr 1990 auf 60 000 t im Jahr 2016 [Dro18]. Das stetige Wachstum der weltweiten Herstellung des Werkstoffes ist ein Beleg für die zunehmende Bedeutung des Nichteisenmetalls in der weltweiten Nutzung.

In den meisten Einsatzfällen kommt Aluminium nicht in seiner reinen Form zur Anwendung. Durch die Zugabe verschiedener Legierungselemente und den Einsatz gesteuerter Wärmebehandlungsprozesse können verschiedene Eigenschaften des Leichtbauwerkstoffes gezielt eingestellt werden [Kam98]. Hierdurch wird das Spektrum der Anwendungsfälle des Werkstoffes enorm erhöht. Die Abbildung 2.1 gibt eine Übersicht der Zugfestigkeitsbereiche unterschiedlicher Aluminiumlegierungen und zeigt beispielhaft die Einstellbarkeit mechanisch-technologischer Eigenschaften des Werkstoffes in Abhängigkeit von den verwendeten Legierungselementen. Die in der Darstellung vorgenommene Differenzierung in Guss- und Knetlegierungen entspricht der Unterteilung der Werkstoffgüten in der industriellen Anwendung.

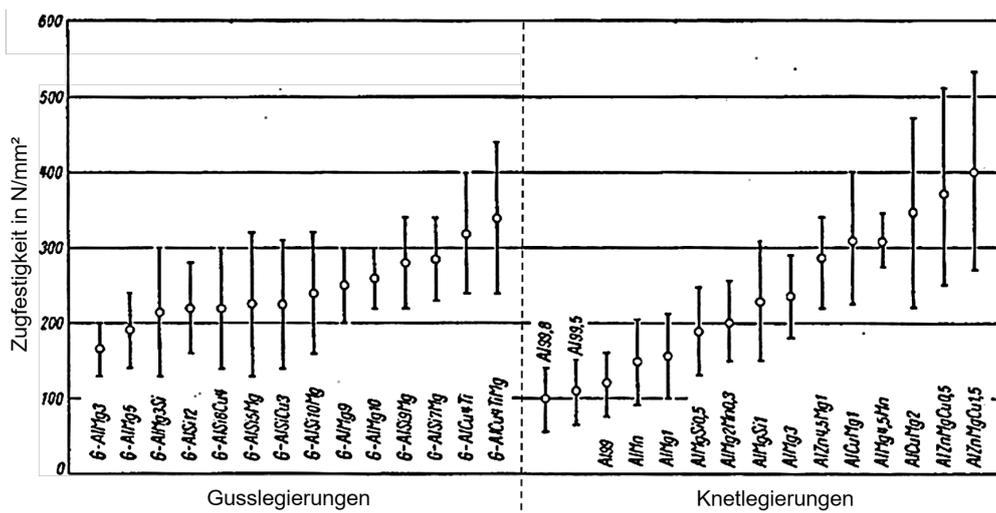


Abbildung 2.1: Übersicht der Zugfestigkeitsbereiche von Aluminiumlegierungen [Kam98]

Die Nomenklatur der Aluminiumlegierungen innerhalb Europas wendet die eingeführte Unterteilung in Guss- und Knetwerkstoffe an. Das europäische Bezeichnungssystem der Gusswerkstoffe wurde mit der DIN EN 1780:2002 gegenüber dem internationalen Bezeichnungssystem eigens entwickelt. Es wird ein System aus fünf Ziffern zur Legierungsbeschreibung eingesetzt. Die erste Ziffer beschreibt das Hauptlegierungselement, die zweite den Legierungstyp. Es schließt sich mit der dritten Ziffer eine willkürliche Kodierung der chemischen Zusammensetzung an, gefolgt von der vierten, im Allgemeinen mit einer Null besetzten Stelle. Die fünfte und letzte Ziffer ist, mit Ausnahme von Legierungen für die Luftfahrt, immer Null. Zusätzliche Buchstabenkürzel in der Bezeichnung geben Auskunft über Gießverfahren und Wärmebehandlung [Ost14]. Beispielhafte Bezeichnungen sind EN AC-21100 und EN AC-48000.

Die Aluminiumknetlegierungen werden nach dem 1954 durch die nordamerikanische Aluminum Association (AA) begründeten Bezeichnungssystem benannt. Die International Organization of Standardization (ISO) führte das System 1970 auf internationaler Ebene mit der ISO/DIN 209 ein. Die erste der vier Ziffern des Bezeichnungssystems benennt die Legierungsgruppe des Werkstoffes. Die nachfolgende Stelle gibt Auskunft über eine mögliche Legierungsmodifikation oder einen höheren Reinheitsgrad. Die letzten beiden Ziffern charakterisieren die jeweilige Legierung. In den Bezeichnungssystemen von Guss- und Knetlegierungen ähnelt sich die erste Ziffer zur Beschreibung der Legierungsgruppe [Ost14]. Beispielhafte Bezeichnungen sind EN AW-3003 und EN AW-6082.

Ein weiteres häufig zur Anwendung kommendes Bezeichnungssystem orientiert sich an der chemischen Zusammensetzung des Werkstoffes. Als Beispiele können Al Zn5Mg und Al Mg3 genannt werden. Zu erwähnen bleibt die Existenz diverser weiterer Bezeichnungsarten aus den Normenwerken anderer Länder.

2.2 Aluminium in der Warmumformung

Um einen Werkstoff zu verformen, muss dessen Fließgrenze k_f überschritten werden. Die plastische Verformung von Metallen im Allgemeinen und speziell bei Aluminium basiert auf dem Versetzungsgleiten. Wie alle metallischen Werkstoffe besitzt auch Aluminium einen kristallinen Aufbau und weist ein kubisch-flächenzentriertes (kfz) Raumgitter auf. Eine kfz-Gitterstruktur ist mit einem Atom auf jeder Würfecke und je einem Atom auf den Würfelflächen besetzt. Aus der Atomanordnung der Elementarzelle resultieren 12 gleichwertige Gleitebenen. Diese, im Vergleich zu anderen metallischen Werkstoffen, hohe Anzahl an Gleitebenen erklärt die gute Umformbarkeit des Leichtbauwerkstoffes. Die Abbildung 2.2 zeigt den atomaren Aufbau einer kfz-Elementarzelle. Die blauen Punkte stehen für die Positionen der Atome. Die grau eingezeichnete Ebene stellt eines der 12 möglichen Gleitsysteme beispielhaft dar.

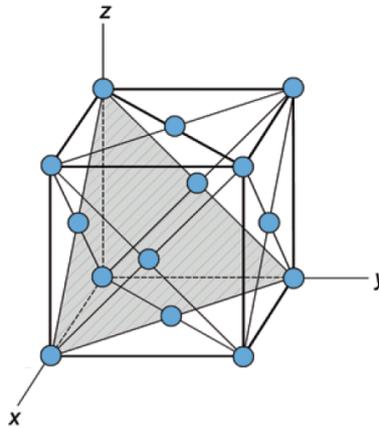


Abbildung 2.2: Kubisch-flächenzentrierte Elementarzelle von Aluminium mit beispielhafter Darstellung einer Gleitebene [Ost14]

Bei der Kaltumformung von Aluminium bestimmt hauptsächlich der Umformgrad φ die Umformfestigkeit k_f des Werkstoffes. Es gilt der durch Formel 2.1 beschriebene Zusammenhang.

$$k_f = k_f(\varphi) \quad (2.1)$$

Bei der Warmumformung kommen Abhängigkeiten zur Temperatur T und zur Formänderungsgeschwindigkeit $\dot{\varphi}$ hinzu. Die Formulierung des Zusammenhangs in der Kaltumformung erweitert sich zu Gleichung 2.2.

$$k_f = k_f(\dot{\varphi}, \varphi, T) \quad (2.2)$$

Weiter beeinflussen Überlagerungseffekte wie die thermisch aktivierte Entfestigung und möglicherweise eintretende Erholungs- und Rekristallisationsprozesse das Verhalten des Werkstoffes im Warmumformprozess.

Grundsätzlich können Aluminiumfließkurven in zwei verschiedene Typen unterteilt werden, welche in Abbildung 2.3 in Abhängigkeit von der Stapelfehlerenergie (SFE) dargestellt sind. Während bei Reinaluminium (links) kaum eine Entfestigung zu erkennen ist, führen bei der Aluminiumlegierung (rechts) die Erholungs- und Rekristallisationsprozesse zu einer Entfestigung bei steigendem Umformgrad.

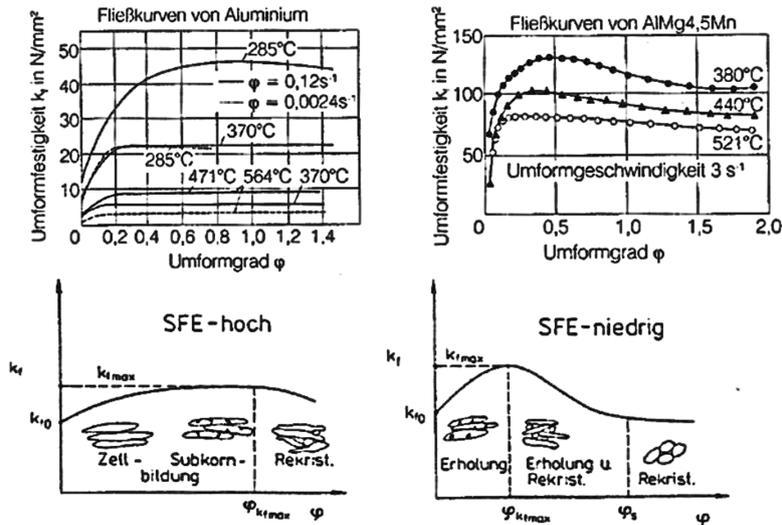


Abbildung 2.3: Vergleich der Fließkurvenverläufe von Reinaluminium (links) und AlMg4,5Mn (rechts) [Kam99]

Für den jeweiligen Umformprozess typische und auf den Fließwiderstand k_f Einfluss nehmende Formänderungsgeschwindigkeiten $\dot{\varphi}$ sind in Abbildung 2.4 dargestellt. Die Dehnraten beim kombinierten Walzen und Strangpressen entsprechen den kombinierten konventionellen Verfahren Walzen und Strangpressen. Drahtwalzen erfolgt in einem Dehnratenbereich von $10^{-1} \frac{1}{s} \leq \dot{\varphi} \leq 10^2 \frac{1}{s}$. Eine schnellere Formänderung erfolgt beim Strangpressen. Die Formänderungsgeschwindigkeit dieses Umformprozesses liegt im Bereich $10^0 \frac{1}{s} \leq \dot{\varphi} \leq 10^3 \frac{1}{s}$.

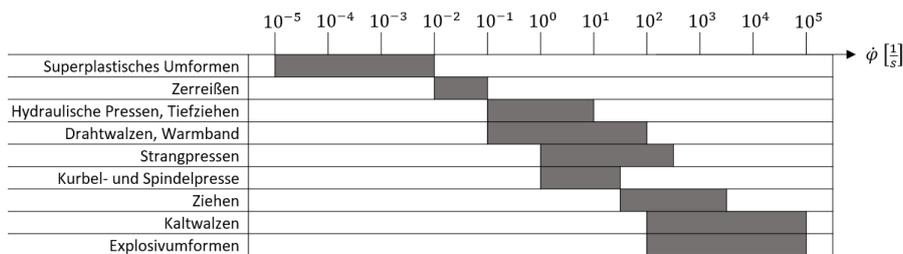


Abbildung 2.4: Formänderungsgeschwindigkeiten verschiedener Verfahren zur Aluminiumverarbeitung [Kam99]

2.3 Reibung in der Warmumformung

Bei allen Prozessen der Warmumformung von Aluminium entsteht Reibung zwischen dem Werkstück, einem eventuell zum Einsatz kommenden Schmierstoff und den formgebenden Werkzeugen. Hervorgerufen werden die Reibung und die aus ihr resultierenden Spannungen in den Kontaktflächen durch Wechselwirkungseffekte, resultierend aus der Relativbewegung und dem Kontaktdruck zwischen den beiden Kontaktpartnern. Zwischen den nachfolgend erläuterten Wechselwirkungseffekten wird unterschieden:

Festkörperreibung Die Reibung zweier Festkörper ohne Zwischenschicht wird ausschließlich durch die chemisch- physikalischen Eigenschaften der Reibpartner bestimmt.

Grenzreibung Bei der Grenzreibung sorgt eine dünne Zwischenschicht dafür, dass hauptsächlich die Grenzschichten der Reibpartner aufeinander gleiten.

Mischreibung Die Mischreibung ist durch das gemeinsame Auftreten von Effekten der Grenzreibung und der hydrodynamischen Reibung gekennzeichnet.

hydrodynamische Reibung Die vollständige Trennung der beiden Reibpartner durch die eingesetzte Zwischenschicht kennzeichnet die hydrodynamische Reibung.

Die Vorhersage von Prozessgrößen und die gezielte Beeinflussung des Werkstoffflusses setzen eine hinreichend genaue Kenntnis über die im Prozess vorherrschende Reibungsart und deren quantitative Ausprägung voraus. Eine exakte Bestimmung des Betrags der wirkenden Reibung erfordert eine Berücksichtigung der Fließgrenze des Werkstoffes, der Relativbewegung zwischen beiden Kontaktpartnern sowie Kenntnis über den Kontaktdruck am jeweiligen Ort der Betrachtung. Die beschriebenen Größen liegen in der Regel nicht konstant über die Kontaktfläche vor, sondern sind örtlich aufgelöst.

Zur Beschreibung der im Prozess vorherrschenden Reibung existieren verschiedene Berechnungsmethoden. Die Bestimmung der Reibkraft nach Coulomb ist eine der am meisten verbreiteten Methoden in umformtechnischen Anwendungen [Ger07].

$$F_R = \mu * F_N \quad (2.3)$$

Hierbei wird die Reibkraft F_R durch die Multiplikation der Normalkraft F_N mit dem sogenannten Reibbeiwert μ errechnet. Die anzuwendenden Reibbeiwerte können für eine Vielzahl von Reibpaarungen, -arten und Umformprozessen der Literatur entnommen (bspw. [Dal13] [Doe10]) oder für den jeweiligen Anwendungsfall experimentell ermittelt werden. Das Reibmodell nach Coulomb wird in der Regel dann angewendet, wenn der Kontaktdruck zwischen Werkstück und Werkzeug nicht größer ist als die Fließspannung des Werkstücks.

Liegt der Kontaktdruck zwischen Werkstück und Werkzeug im Prozess über der Fließgrenze des Werkstückes, hat sich die Anwendung des Beschreibungsmodells von Tresca in Wissenschaft und Industrie etabliert. Die zwischen den beiden Reibpartnern wirkende Reibschubspannung τ wird als Produkt aus einem Reibfaktor m und der Schubfließgrenze k des Werkstoffes berechnet. Zwischen der Schubfließgrenze und der Fließgrenze besteht der in Gleichung 2.5 beschriebene Zusammenhang und die Ermittlung der Reibschubspannung erfolgt nach Formel 2.5 [Bir13].

$$k = \frac{k_f}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

$$\tau = m * \frac{k_f}{\sqrt{3}} \quad (2.5)$$

Neben den beiden vorgestellten Modellen werden in der Praxis diverse auf den jeweiligen Umformprozess optimierte Beschreibungsformen angewendet. Hierbei können die Modelle nach Coulomb und Tresca kombiniert und oder in deren Vorfaktoren in Abhängigkeit von den benannten Größen dargestellt werden, die Einfluss auf die im Prozess wirkende Reibung haben.

2.4 Verfahren zur Herstellung von Aluminiumlangprodukten

2.4.1 Walzen

Längswalzen ist eine der am meisten verbreiteten Methoden des kontinuierlichen Metallformens [Dov15]. Entsprechend der DIN 8582 [oV03], welche Umformverfahren nach ihrem Spannungszustand unterteilt, gehört das Walzen zum Druckumformen. Das stetige oder schrittweise Umformverfahren kann mit einer oder mehreren rotierenden Walzen ohne oder mit Gegenwerkzeug erfolgen [Spu12]. Beim Walzen von Aluminiumdraht werden mehrere Walzgerüste hintereinander geschaltet, um den Werkstoff in die gewünschte Form zu bringen. Entgegen dem Flachwalzen, welches eine eindimensionale Formänderung in das Werkstück einbringt, wird beim Aludrahtwalzen durch den Einsatz von Profilwalzen, die das Werkstück umschließen, eine zweidimensionale Formänderung erzwungen.

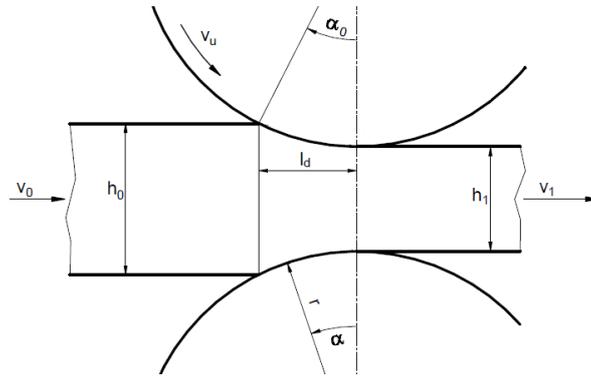


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung des Walzens [Kop99]

Die Abbildung 2.5 zeigt eine schematische Darstellung des Flachwalzens. Einige relevante Größen des Flachwalzens können auf das Walzen von Profilen übertragen werden. Das in der Mitte befindliche Werkstück mit der Ausgangshöhe h_0 wird durch die beiden mit der Umfangsgeschwindigkeit v_U rotierenden Walzen des Radius r gegriffen, durch den Walzspalt gezogen und auf die Endhöhe h_1 heruntergewalzt. Die für das Werkstück geltende Volumenkonstanz vor und hinter dem Umformprozess bedingt eine höhere Geschwindigkeit v_1 am Ausgang des Prozesses im Vergleich zur Startgeschwindigkeit v_0 . Aus der konstanten Umfangsgeschwindigkeit der Walzen resultiert eine nicht konstante Geschwindigkeitskomponente der Walzenoberfläche in Prozessrichtung. Diese in Prozessrichtung nicht konstante Geschwindigkeitskomponente der Arbeitswalzenoberfläche und die zunehmende Geschwindigkeit des Werkstückes über die gedrückte Länge l_d haben eine Relativbewegung beider Kontaktpartner zueinander zur Folge. Man spricht von einer Voreilzone, einer Fließscheide und einer Nacheilzone.

Mit den theoretischen Ausarbeitungen des Flachwalzprozesses von Karman im Jahr 1925 und den weiterführenden Arbeiten von Orowan aus dem Jahr 1943 existieren analytische Ansätze zur Prozessbeschreibung und -auslegung [Ale80a]. Die Anwendung dieser Ansätze ist in der industriellen Nutzung für die Beschreibung globaler Prozessgrößen etabliert. Eine umfängliche analytische Theorie zum Profilwalzen, welches in dieser Arbeit mit dem Strangpressen kombiniert wird, liegt bis heute nicht vor [Ove18].

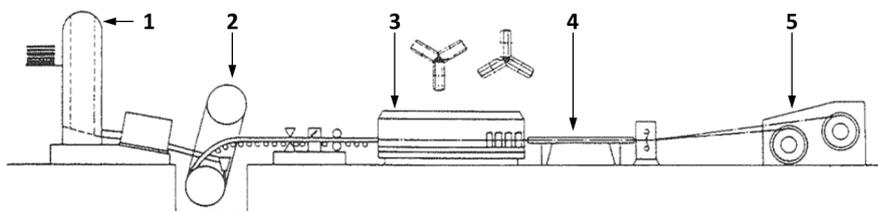


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung des kontinuierlichen Properzi-Aluminiumdrahtwalzprozesses [Kam99]

Die Abbildung 2.6 zeigt ein Beispiel einer Aluminiumwalzanlage. Die sogenannte Properzi-Gieß- und-Walzstraße verarbeitet flüssiges Aluminium in kontinuierlichem Betrieb in Fertigdraht. Das aus dem Ofen (1) kommende flüssige Aluminium wird durch ein Gießrad (2) in seine erstarrte Vorform gegossen. Anschließend wird der Werkstoff in 12- bis 17-Dreiwälzengerüsten (3) auf seine finalen Drahtabmessungen gewalzt. Nach der anschließenden Kühlung des Drahtes (4) wird das fertige Produkt durch die Haspeln (5) der Anlage zu Coils gewickelt. Das Nutzen der Hitze aus dem Gießprozess bietet entgegen dem üblichen Abkühlen und erneuten Erwärmen einen energetischen Vorteil. Properzi-Gieß-Walzstraßen können eine Tonnage von $12,5 \frac{t}{h}$ erreichen.

2.4.2 Strangpressen

Die am weitesten verbreitete Methode der Herstellung von Langprodukten aus Aluminium und Aluminiumlegierung ist das Strangpressen durch ein Kammerwerkzeug [Zas10]. Das Sortiment extrudierter Produkte aus Aluminiumprofilen beinhaltet Zehntausende verschiedene Profile (Stand 2005) unterschiedlicher Formen und Größen [Sid05].

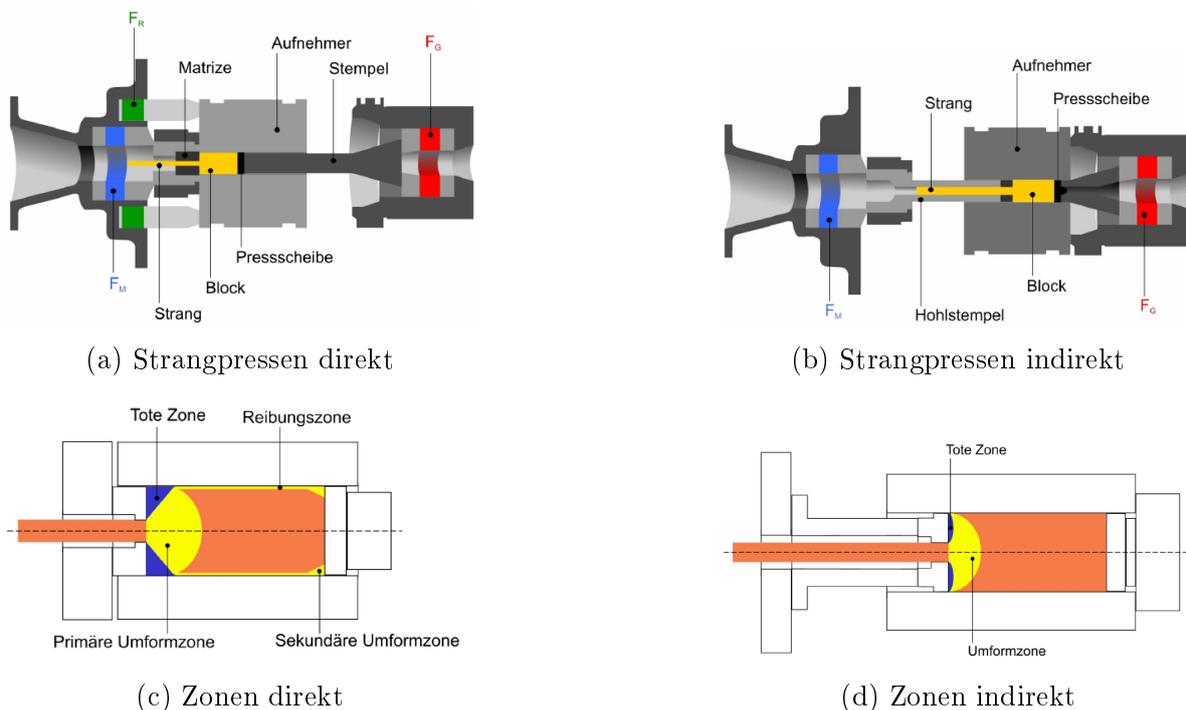


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung des direkten und indirekten Strangpressens und Gegenüberstellung der sich ausbildenden Umformzonen [Gal12] [Mue07]

Die Abbildung 2.7 zeigt eine schematische Darstellung des direkten 2.7a und des indirekten 2.7b Strangpressens. Bei beiden Verfahren wird der zu verpressende Block von Aufnehmer, Matrize und Pressscheibe umschlossen. Durch die Verkleinerung der Presskammer entsteht ein hoher hydrostatischer Druck und der Block wird durch die Matrizenöffnung gepresst [Kam10]. Der Unterschied beider Verfahren liegt in der Relativbewegung zwischen Block und Aufnehmer. Während beim direkten Strangpressen die Pressscheibe vom Stempel durch den Aufnehmer mit der Kraft F_G gedrückt wird, ist es beim indirekten Strangpressen hingegen die Matrize, die mittels Hohlstempel mit der Matrizen- oder auch Umformkraft F_M durch den Aufnehmer gedrückt wird. Der Aufbau des direkten Strangpressens führt zu einer Relativbewegung zwischen Block und Aufnehmer. Es entsteht eine Reibkraft F_R , welche zum Verpressen des Blocks überwunden werden muss. Diese Komponente der Gesamtkraft F_G entsteht nicht beim indirekten Strangpressen und kann als Vorteil des indirekten Verfahrens bezeichnet werden [Kam10].

Ein charakteristisches Merkmal des Strangpressens ist neben dem hohen hydrostatischen Druck [Kam10] das Ausbilden einer Scherzone, welche die Zone der Verformung und die sogenannte tote Zone voneinander trennt [Kam10]. Die Auswirkung der unterschiedlichen Ausprägung der Reibung beider Verfahrensarten auf den Materialfluss wird bei dem Vergleich beider Umformzonen des direkten 2.7c und des indirekten 2.7d Verfahrens ersichtlich und ist charakteristisch für die jeweilige Prozessvariante. Während die in Blau dargestellte tote Zone des direkten Verfahrens eine dreieckige Gestalt aufweist, bildet sich dieser Bereich beim indirekten Verfahren halbkreisförmig aus. Die sich ausbildende Größe der toten Zone ist bei der indirekten Verfahrensvariante deutlich geringer als bei der direkten Variante. Weiter kann erkannt werden, dass die Umformzonen beider Verfahren in ihrer Ausprägung ähnlich sind. Beim direkten Strangpressen kann zusätzlich die Ausbildung einer Reibungszone sowie einer sekundären Umformzone beobachtet werden. Diese Zonen entstehen nicht bei der indirekten Verfahrensvariante.

Analytische Ansätze zur Bestimmung der erforderlichen Presskraft sind in verschiedenen Veröffentlichungen zu finden. Bereits 1976 wurde eine Vielzahl dieser Ansätze auf ihre Gültigkeitsbereiche hin untersucht [Kop76]. Früherer Fachliteratur und wissenschaftlichen Werken können solche Ansätze entnommen werden, die sich im wissenschaftlichen Umfeld und in der industriellen Praxis etabliert haben [Kop99] [Mue07].

2.4.3 Conform-Prozess

Der Conform-Prozess wurde im Jahr 1971 von der United Kingdom Atomic Energy Authority (UKAEA) entwickelt und ist der in der Industrie am weitesten verbreitete kontinuierliche Extrusionsprozess [Len02]. Er wird bspw. seit 1992 bei Hitachi Cable, Ltd. zur Herstellung von Aluminiumprofilen verwendet [Ton02]. Nur der Conform-Prozess war bisher in der Lage, Langprodukte aus Querschnittsprofilen zu erzeugen. Dieser technologische Vorsprung resultiert hauptsächlich aus der Einfachheit des Aufbaus [Ale80b].

Die Vorteile des Prozesses liegen zum einen in der schnellen Umrüstbarkeit der Anlage auf andere Abmessungen sowie zum anderen in dessen kontinuierlichem Charakter [Ost14]. Der Drahtdurchmesser des Ausgangsmaterials ist beim Conform-Prozess mit $\varnothing = 32 \text{ mm}$ und einer daraus folgenden Ausgangsquerschnittsfläche von $A_0 = 800 \text{ mm}^2$ begrenzt [Ost14].

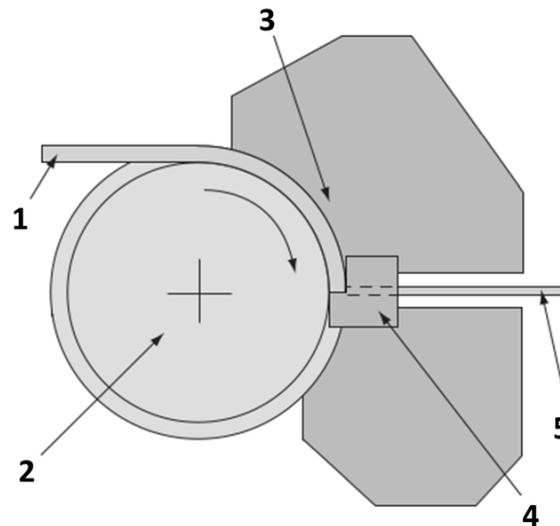


Abbildung 2.8: Schematische Darstellung des Conform-Prozesses [Ton02]

Die Abbildung 2.8 zeigt den schematischen Aufbau des Conform-Prozesses. Das Werkstück (1) wird zwischen der rotierenden Walze (2) und dem feststehenden Reibschuh (3) in Richtung der Umformkammer (4) befördert. Durch die Reibung zwischen Walze und Reibschuh erwärmt sich das Werkstück und sein Formänderungswiderstand sinkt. Aufgrund des aus der Walzenrotation resultierenden Vorschubes des Werkstücks wird dieses durch die Matrizenöffnung der Umformkammer gepresst und das gewünschte Endprodukt (5) wird erzeugt.

2.4.4 Kombiniertes Walzen und Strangpressen

Das Umformverfahren Extrolling wurde im Jahr 1975 von Avitzur erfunden [Ale80a] und eignet sich grundsätzlich für die Herstellung von Langprodukten mit komplizierten Querschnitten [Ale80b]. Dieses kombinierte Verfahren bestehend aus den Umformprozessen Walzen und Strangpressen unterscheidet sich lediglich durch die Platzierung der Matrize von dem in dieser Arbeit untersuchten Prozess. Während sich die Matrize beim Extrolling im Walzspalt bzw. sehr nah am Walzspalt befindet, wird dieser Abstand in dem hier untersuchten Prozess deutlich vergrößert und der Prozess so gezielt beeinflusst. Die Abbildung 2.9 zeigt eine schematische Darstellung des kombinierten Walz- und Strang-

pressprozesses. Der einlaufende Strang (5) wird durch die beiden rotierenden Arbeitswalzen (1 & 4) umschlossen (dargestellt durch die vergrößerte Querschnittsdarstellung in der roten Box), durch die Matrize (2) gepresst und hierdurch zum Endprodukt (3) umgeformt. Der Vorteil des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses gegenüber dem etablierten Conform-Prozess liegt darin, dass keine zusätzliche Energie für die Reibung des feststehenden Sattels aufgewendet werden muss [Ale80a]. Die Limitierung des Prozesses bestimmt der Anteil an Energie, welcher sich von den Walzen auf das Werkstück übertragen lässt, um den erforderlichen Pressdruck zum Extrudieren des Werkstückes durch die Matrize zu erzeugen [Ale80a] [Sta85].

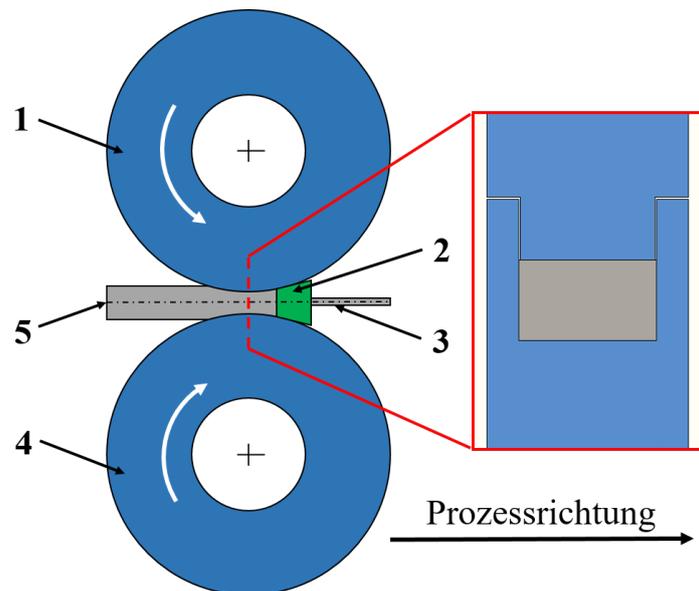
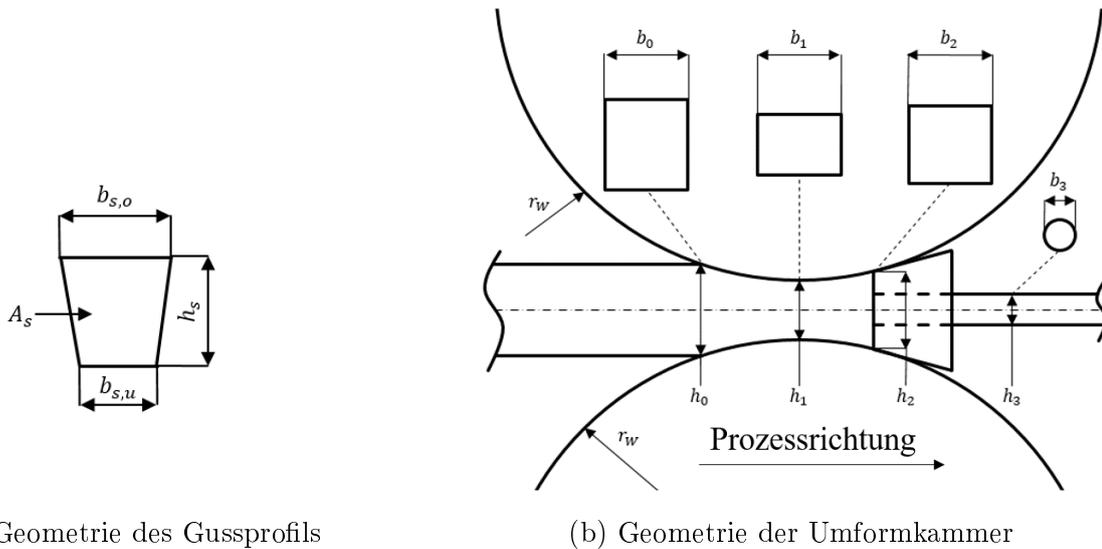


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung kombiniertes Walzen und Strangpressen

Eine weiterführende Beschreibung der geometrischen Zusammenhänge des kombinierten Umformprozesses wird durch Abbildung 2.10 ermöglicht. Die trapezförmige Querschnittsfläche A_s des gegossenen Strangprofils aus Darstellung 2.10a wird durch dessen obere Breite $b_{s,o}$, untere Breite $b_{s,u}$ und Höhe h_s definiert. Die Stranghöhe h_s bestimmt ebenfalls den Ort des Erstkontaktes zwischen den Arbeitswalzen und dem Werkstück. Ab dieser in Darstellung 2.10b mit h_0 gekennzeichneten Position wird das Eingangsprofil von den Arbeitswalzen gegriffen und in seiner Höhe reduziert. Aufgrund der trapezförmigen Gestalt des Gussstrangs breitet sich dieser so lange, bis dessen Querschnittsfläche der Querschnittsfläche der Umformkammer entspricht. Sobald dieser Fall eintritt, kann von Vollkontakt zwischen Werkstück und Arbeitswalzen gesprochen werden. Bis zur Walzenachse wird die Höhe des Werkstücks bis auf den Wert h_1 reduziert. Hinter dem Walzspalt nimmt die Höhe der Umformkammer bis zum Wert h_2 an der Matrizenstirnseite zu. Abschließend wird das Werkstück durch die Matrizenöffnung mit dem Radius r_3 extrudiert.



(a) Geometrie des Gussprofils

(b) Geometrie der Umformkammer

Abbildung 2.10: Geometrie des kombinierten Walzen und Strangpressens

Die Abbildung 2.10b zeigt die Umformkammer des Prozesses und die Größen, welche deren geometrische Verhältnisse vollständig beschreiben. Der trapezförmige Eingangsquerschnitt in Abbildung 2.10a ist eine vereinfachte Beschreibungsform des in der Realität einlaufenden Gussprofils. Während sich das Gussprofil in Richtung der Walzenachse bewegt, wird es gestaucht und beginnt zu breiten. Im Verlauf dieser Breitung nimmt der Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug an den Walzenflanken so weit zu, bis das von den Walzen geschlossene Profil vollständig gefüllt ist. Die in der Walzenachse dargestellte Höhe h_1 bzw. deren Verhältnis zur Ausgangshöhe h_0 bestimmt die Abnahme des Walzprozesses. Die Breite b_1 gibt die Breite der Prozesskammer an und entscheidet darüber, wie viel Breitung des Ausgangsmaterials zugelassen wird. Nach der für den Walzprozess üblichen Beschreibung des Walzspalts folgt beim kombinierten Walzen und Strangpressen eine durch die Matrizenstirnseite mit der Höhe h_2 in ihrer Größe definierte Kammer. Diese als Spreizkammer bezeichnete Zone des Umformprozesses erlaubt eine Aufweitung des verarbeiteten Materials. Für die Breite der Matrizenstirnseite gilt $b_2 = b_1$. Die Spreizkammer ist vollständig mit Material gefüllt. In der Folge sind die Walzenflanken in diesem Bereich vollständig mit dem Werkstoff in Kontakt. Die beiden Größen h_3 und b_3 bestimmen die Höhe bzw. die Breite des durch den Prozess erzeugten Produktes. In der Regel werden kreisrunde Querschnittsprofile mit $h_3 = b_3$ erzeugt. Bei der mittels numerischer Simulation durchgeführten Parameterstudie zur Untersuchung der Einflüsse der einzelnen geometrischen Größen wurde das Verhältnis von h_3 und b_3 geändert und die Herstellung eines ovalen Produktes betrachtet.

Die Entwicklung analytischer Modelle zur Berechnung globaler Prozessgrößen des vergleichbaren Extrolling-Prozesses begann 1980 [Ale80b]. In den folgenden Jahren wurden verschiedene Ansätze zur Prozessbeschreibung genutzt und mit experimentellen Ergeb-

nissen verglichen. Weiterführende Arbeiten von Alexander kombinieren theoretische Ansätze zum Walzen [Ale72] und Strangpressen [Hir58]. Die experimentell resultierenden Versuchskräfte waren im Vergleich zu den berechneten Kräften aus den analytischen Modellen immer höher [Ale0j]. Zurückgeführt wurde die Differenz auf die abfallende Werkstücktemperatur aufgrund des Wärmeaustauschs zwischen dem Werkstück und den kälteren Arbeitswalzen, auf die Reibung an der Matrizenoberfläche sowie auf den entstehenden Ausschuss aufgrund der Spalte zwischen den Walzen und der Matrize. Später wurde die Aufstellung der Energiebilanz des Prozesses als Grundlage der analytischen Beschreibung des Extrolling-Prozesses herangezogen [Sid05]. Die durchgeführten Vergleiche von experimentell ermittelten Prozessgrößen und denen der Anwendung des analytischen Beschreibungsmodells zeigten gute Übereinstimmung [Sid05].

2.5 Numerische Simulation von Umformprozessen

Bei der Auslegung und Entwicklung von Umformprozessen ist der Einsatz numerischer Simulationsmodelle Stand der Technik in Wissenschaft und Industrie [Mue10]. Mit dem Ziel, Werkzeug- und Materialkosten zu senken, eine sichere Prozessgestaltung zu verwirklichen und Entwicklungszeiten kurz zu halten, nimmt der Einsatz solcher Modelle bei der Entwicklung und Optimierung von Umformprozessen zu [Alf10] [Kan13].

Bei der kontinuumsmechanischen Modellierung von Umformprozessen mittels der FEM wird zwischen der Euler- und der Lagrange-Beschreibungsmethode unterschieden. Die Gegenüberstellung der Werkstück- und Knotenbewegung beider Methoden im eindimensionalen Beispiel in Abbildung 2.11 veranschaulicht deren Unterschiede. In der Beschreibung nach Euler ändert sich die Position der Knoten vom Zeitpunkt t_n zum Zeitpunkt t_{n+1} nicht. Das unveränderliche Netz definiert ein ortsfestes Kontrollvolumen. Orts- und Zustandsänderungen des Werkstücks zwischen den beiden Zeitpunkten werden durch diesen Beobachter gemessen und beschrieben [Neg17]. Bei der Methode von Lagrange sind Werkstückpunkte und Netzknoten miteinander verbunden. Diese Beschreibungsform verwendet einen ortsfesten Beobachter in einem global definierten Koordinatensystem. Dieser beobachtet und beschreibt die Orts- und Zustandsänderung des diskretisierten Werkstücks zwischen den beiden Zeitpunkten.

Die einfache Form der Beschreibung von stationären und quasistationären Problemen gilt als Vorteil der Modellbeschreibung nach Euler. Sie wird vornehmlich bei der Beschreibung fluidmechanischer Probleme verwendet [Bat02]. Bei einem vergleichsweise geringen Einsatz von Rechenkapazität können Zustandsgrößen eines Prozesses über eine lange Prozesszeit ermittelt werden. Die Änderung geometrischer Randbedingungen des zu beschreibenden Problems ist bei dem Einsatz der Methode nach Euler nur eingeschränkt möglich [Kle10].

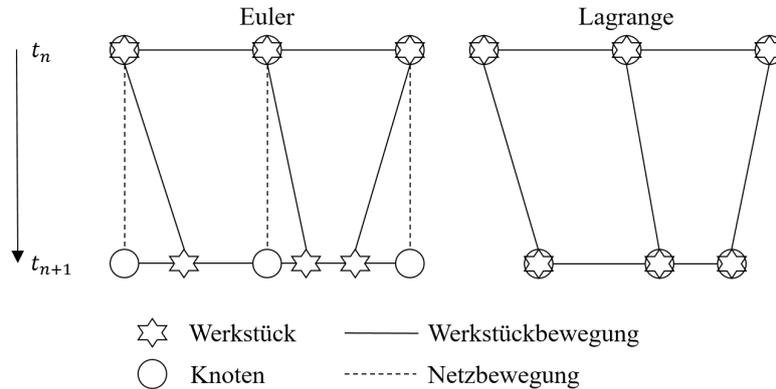


Abbildung 2.11: Eindimensionales Beispiel der Werkstück- und Netzbewegung nach der Beschreibungsmethode nach Euler und Lagrange [Ste18]

Der Vorteil der Modellbeschreibung nach der Methode von Lagrange liegt in der Einfachheit bei der Vorgabe der veränderlichen Gebietsränder und Randbedingungen. Dem steht der Nachteil der eingeschränkten Beschreibung großer Deformationen des FE-Netzes gegenüber. Kommt es in der Berechnung des Prozesses zu großen Deformationen des Netzes, wird der Einsatz rechen- und somit zeitintensiver Maßnahmen erforderlich. Eine Neuvernetzung des Werkstücks wird nötig. Hierbei werden die vorhergehenden Zustandsdaten des FE-Netzes auf das neue FE-Netz übertragen [Sch06] [Val10].

Das Materialverhalten bzw. der Formänderungswiderstand des Werkstoffes hat bei der Simulation von Umformprozessen hohen Einfluss auf die globalen Ergebnisgrößen und ist von großer Bedeutung bei der diesbezüglichen Modellbeschreibung [Fre02]. Er ist entsprechend der Realität abhängig von Temperatur, Dehnung und Dehnrate zu modellieren. Diese Modellierung kann entweder in tabellarischer Form erfolgen, wobei Zwischenzustände der einzelnen Punkte meist linear interpoliert werden, oder es werden kontinuierliche, mathematische Formulierungen (sogenannte Approximationen) zur Beschreibung des meist nicht linearen Materialverhaltens genutzt. Es existiert eine Vielzahl solcher Beschreibungsansätze [Hen78].

Neben der Modellierung des Materialverhaltens ist der große Einfluss der Reibung zwischen Werkzeugen und Werkstück bei der Erstellung numerischer Prozessmodelle zu benennen. Neben ihrem direkten Einfluss auf globale Ergebnisgrößen ist sie mitverantwortlich für den sich im Prozess ausbildenden Materialfluss [Hor07] [Rin07]. Zur möglichst realitätsnahen Beschreibung der Reibung wird deren Modellierung in Abhängigkeit vom vorherrschenden Kontaktdruck, von der Temperatur und der Relativgeschwindigkeit zwischen Werkstück und Werkzeugen empfohlen [Kar10].

Zur Bestimmung globaler Prozessgrößen von Strangpressprozessen ist die numerische Simulation hilfreich [Mis10]. Alfaro konnte eine gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen seiner FE-Berechnungen und experimentell ermittelten Prozessdaten erzielen [Alf10]. Wie bei der numerischen Simulation von Walzprozessen steht auch beim Strangpressen der höhere Aufwand bei der Durchführung den im Vergleich zu den analytischen Ansätzen detaillierteren Ergebnissen gegenüber. Bereits 1989 wurde die FEM zur Simulation des kombinierten Walzens und Strangpressens eingesetzt [Ger89]. Aus dem Vergleich dieser frühen Simulationsergebnisse und neuerer numerischer Untersuchungen können die enorme Steigerung der zur Verfügung stehenden Rechenleistung und die Erhöhung des Umfangs und der Qualität der berechneten Prozessgrößen entnommen werden [Sok15] [Gal17].

3 Zielsetzung

In der industriellen Praxis werden Aluminiumlangprodukte üblicherweise durch die konventionellen Umformverfahren Strangpressen und Walzen hergestellt. Die Kombination dieser beiden Verfahren bietet hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Aspekte diverse Vorteile. Die umfängliche Nutzung aller Vorteile dieses Prozesses wird erst dann möglich, wenn die technologischen Einflussgrößen und deren bestehende Wechselwirkungen umfänglich verstanden werden. Ziel dieser Arbeit ist es, durch experimentelle und numerische Untersuchungen verschiedener Aspekte des kombinierten Verfahrens einen Beitrag zum besseren Prozessverständnis zu leisten.

Zur Untersuchung globaler Prozessgrößen und zur Validierung der numerischen Simulationsmodelle wird eine Reihe experimenteller Untersuchungen an einer kombinierten Walz- und Strangpressanlage im industriellen Maßstab durchgeführt. Die durchgeführten Anlagenversuche werden anschließend simuliert. Der Vergleich der Prozessgrößen aus den Anlagenversuchen und den Simulationen gibt Aufschluss über die Anwendbarkeit numerischer Simulationsmodelle zur Vorhersage globaler Prozessgrößen.

Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der zwischen Arbeitswalzen und Werkstück wirkenden Reibung wird entwickelt. Eine Reihe experimenteller Versuche bildet die Grundlage dieser mathematischen Beschreibung. Das von Temperatur und Druck abhängige Modell hilft bei der Auslegung des Prozesses, erhöht das Prozessverständnis und verbessert die Genauigkeit der Simulationsmodelle.

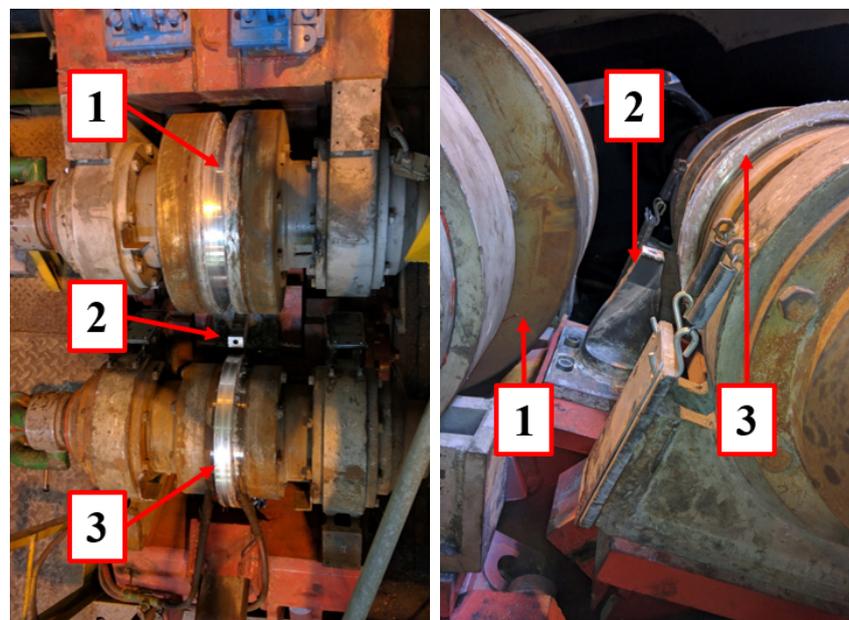
In einer Parameterstudie mit Variation verschiedener geometrischer Größen des Umformraumes werden sowohl deren quantitative Einflüsse auf globale Prozessgrößen untersucht wie auch die zwischen ihnen wirkenden Abhängigkeiten erkennbar.

Zum allgemeinen Prozessverständnis und zwecks der zukünftigen Herstellung komplexer Profile durch das kombinierte Walzen und Strangpressen wird der im Prozess vorherrschende Materialfluss experimentell und virtuell untersucht. Der Vergleich beider Ergebnisse ermöglicht es zusätzlich, Aussagen über die Anwendbarkeit der FEM zur Vorhersage des im Prozess vorherrschenden Werkstoffverhaltens treffen zu können.

4 Experimentelle Grundlagen

4.1 Kombiniertes Walzen und Strangpressen

Die im Rahmen dieser Arbeit angestellten experimentellen Versuche zum kombinierten Walzen und Strangpressen wurden an einer produktiv eingesetzten Anlage im industriellen Maßstab durchgeführt. Die Maschine ist im Besitz des russischen Unternehmens United Company RUSAL PLC und befindet sich an dessen Produktionsstandort im sibirischen Irkutsk. Die vorliegenden und sich von Laborbedingungen unterscheidenden industriellen Gegebenheiten sind bei der Betrachtung der durchgeführten Versuche, den Beschreibungen von deren Randbedingungen und den resultierenden Ergebnisgrößen zu berücksichtigen.



(a) Draufsicht

(b) Seitenansicht

Abbildung 4.1: Versuchsanlage zum kombinierten Walzen und Strangpressen im industriellen Maßstab

Die Abbildung 4.1 zeigt die für die experimentellen Versuche genutzte Versuchsanlage zum kombinierten Walzen in der Draufsicht (Abbildung 4.1a) und der Seitenansicht (Abbildung 4.1b). In beiden Darstellungen sind die obere U-Walze (1) und die untere I-Walze (3) im geöffneten Anlagenzustand zu erkennen. Zwischen den beiden Arbeitswalzen befindet sich die Matrize (3).

4.2 Axialer Reibtest

Der axiale Reibtest wurde am Forschungszentrum Strangpressen der Technischen Universität Berlin entwickelt und dient der Untersuchung der vorherrschenden Reibung zwischen zwei Kontaktpartnern bei einstellbaren Werten für Temperatur, Kontaktdruck und Relativgeschwindigkeit. Die Ergebnisse einer Kampagne derartiger Reibversuche können zur Entwicklung einer mathematischen Modellierung des Reibfaktors nach Tresca in Abhängigkeit von den einstellbaren Größen verwendet werden [San13].

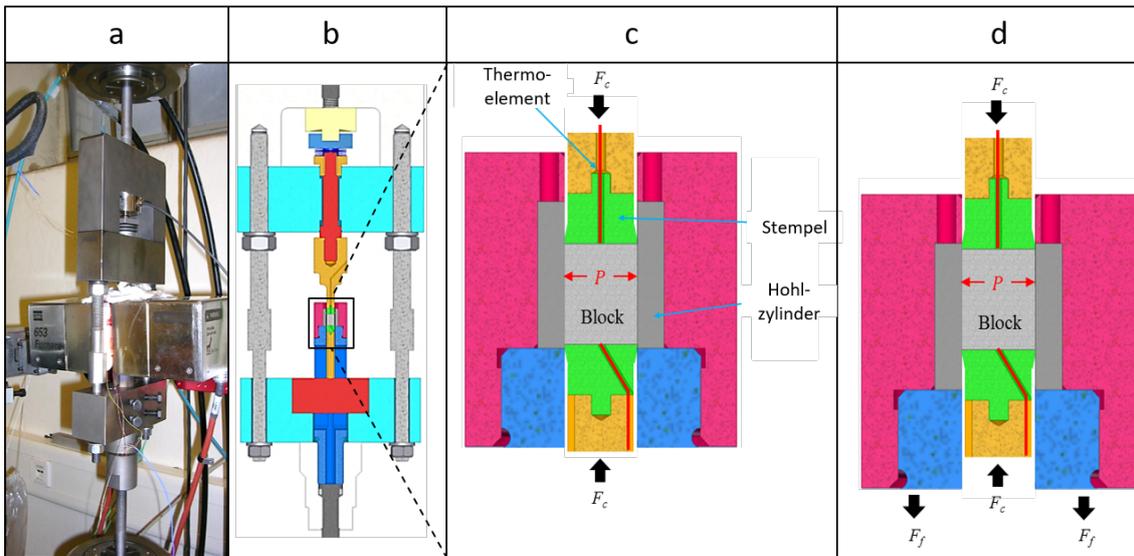


Abbildung 4.2: Darstellung des Versuchsaufbaus des axialen Reibtests (a) und dessen schematische Beschreibung (b, c, d)

Der Aufbau und das Prinzip des axialen Reibtests werden in Abbildung 4.2 dargestellt. Der Versuchsaufbau kann der linken Darstellung (a) entnommen werden. Das daneben gegebene Bild (b) liefert eine schematische Darstellung dieses Aufbaus. Anschließend wird das Versuchsprinzip durch eine vergrößerte Darstellung des relevanten Bereiches des Versuchsaufbaus deutlich gemacht. Der zylindrische Block wird über die oben und unten befindlichen Stempel mit der einstellbaren Kraft F_c innerhalb des Hohlzylinders zusammengedrückt. Anschließend wird der Hohlzylinder durch das Aufbringen der Kraft F_f relativ zum eingespannten Block bewegt. Die Messung der Kraft F_f ermöglicht Rückschlüsse auf die sich zwischen den Versuchsstücken ergebende Reibung und gestattet die Bestimmung einer von den Anfangsbedingungen abhängigen mathematischen Formulierung des Reibkoeffizienten m gemäß Rechenvorschrift 4.1.

$$m = \frac{\tau}{\tau_{haften}} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{P}{\gamma}\right)^\beta} \quad (4.1)$$

Der Einfluss des Kontaktdrucks P ist direkt erkennbar. Die Ermittlung des Koeffizienten β ist Ziel der Entwicklung des mathematischen Beschreibungsmodells. Der Einfluss der Temperatur auf den Reibkoeffizienten wird durch γ nach Vorschrift 4.2 im Modell implementiert.

$$\gamma = \gamma_0 + a_1 e^{\frac{-T}{a_2}} \quad (4.2)$$

Die Größe bzw. der Umfang des Temperatureinflusses wird durch die Koeffizienten a_1 und a_2 der Formel definiert. Die Bestimmung dieser Koeffizienten ist ebenfalls Ziel der anschließenden Modellerstellung.

4.3 Statistische Versuchsplanung

Zur systematischen Untersuchung eines Systems eignet sich die Methode der statistischen Versuchsplanung. Das durch diese Methodik beschriebene Vorgehen wurde bereits um 1920 entwickelt und erstmals 1935 durch R. A. Fischer in einem Fachbuch beschrieben [Fis35]. Ihre Effizienz gegenüber der intuitiven Versuchsdurchführung wurde bereits in vielen Bereichen der Experimentaltechnik bestätigt und sie wurde erfolgreich bei der Planung von Parameterstudien mittels FEM-Untersuchungen angewandt [Hol06].

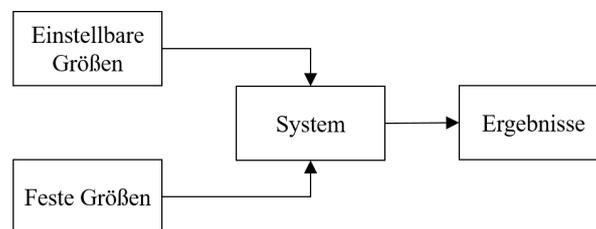


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung eines zu untersuchenden Systems [Sie10]

Die Darstellung 4.3 zeigt ein System in seiner allgemeinen Form nach Siebertz [Sie10]. Es zeichnet sich durch seine Systemgrenzen, seine veränderlichen und unveränderlichen Eingangsgrößen sowie seine erzeugten Ergebnisse aus. Die Gesamtmenge aller Eingangsgrößen wird Parameter genannt. Die im Versuch veränderlichen Größen werden als Faktoren bezeichnet. Die unterschiedlichen Zustände bzw. Einstellmöglichkeiten der Faktoren bezeichnet man als Stufen. Jeder Faktor wird auf mindestens zwei Stufen getestet.

Die Tabelle 4.1 zeigt ein Beispiel eines vollfaktoriellen Versuchsplans mit drei Faktoren, die auf je zwei Stufen eingestellt werden können. Bei einem vollfaktoriellen Versuchsplan werden alle möglichen Kombinationen getestet. Ein derartiger Versuchsplan eignet sich zur Untersuchung der Faktoreinflüsse auf das System und der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren.

Tabelle 4.1: Versuchsplanbeispiel mit drei Faktoren zu je zwei Stufen

Nr.	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

4.4 Computertomographie

In den siebziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts war die Entwicklung der Computertomographie (CT) eine bedeutsame technische Errungenschaft in der Disziplin der diagnostischen Medizin [Buz11]. Heute stellt sie eine vergleichsweise neue Technologie in der Produktionstechnik dar und wird zunehmend sowohl für zerstörungsfreie Bauteiluntersuchungen als auch für Vermessungen komplex geformter mechanischer und elektronischer Bauteile und Baugruppen verwendet [Pfe11] [Sch14]. Der prinzipielle Aufbau eines Computertomographen für industrielle Anwendungen ist in Abbildung 4.4 gegeben.

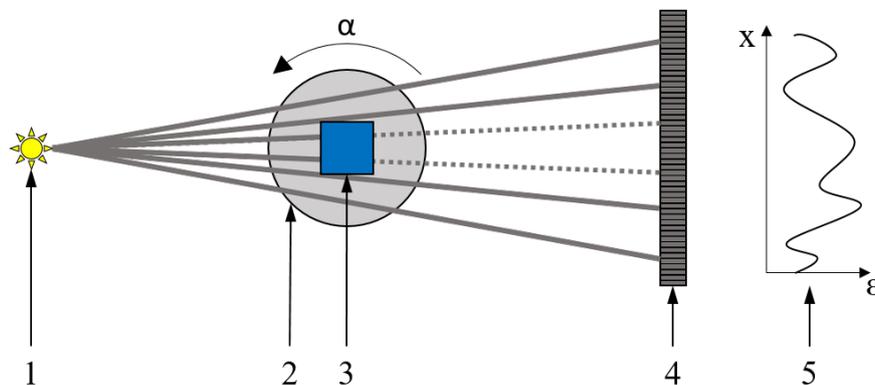


Abbildung 4.4: Prinzipieller Aufbau eines Computertomographen für industrielle Anwendungen

Zur dreidimensionalen CT-Vermessung wird der zu untersuchende Prüfling (3) auf einem drehbaren Prüftisch (2) zwischen einer Röntgenquelle (1) und einem zugehörigen Detektor (4) inkrementell um 360° gedreht. Während der Drehung werden in zuvor festgelegten Winkelstellungen (α) einzelne Röntgenaufnahmen erzeugt. Ein Rekonstruktionsalgorithmus erzeugt aus den einzelnen Messungen (5) eine dreidimensionale Verteilung der gemessenen Schwächungen der Röntgenstrahlungen durch den Prüfling [Her17].

Das Wirkprinzip der Computertomographie kann neben den benannten Anwendungen aus der Werkstoffprüfung auch zur umformtechnischen Untersuchung des Stoffflusses, vergleichbar mit dem Liniennetzversuch [Poe13], genutzt werden. Hierzu ist ein Versuchsmaterial mit gezielt angeordneten Stiften, bestehend aus einem Werkstoff, dessen Dichte sich signifikant von der des Versuchsmaterials unterscheidet, zu versehen. Das so präparierte Testobjekt wird dem zu untersuchenden Umformprozess unterzogen. In einer anschließenden CT-Untersuchung des verformten Versuchsmaterials können die eingebrachten Stifte aufgrund der unterschiedlichen Dichte vom restlichen Versuchsmaterial unterschieden werden.

5 Durchführung

5.1 Experimentelle Anlagenversuche

Zur Untersuchung globaler Prozessgrößen und zur Validierung der numerischen Simulationsmodelle wurden Versuche zum kombinierten Walzen und Strangpressen auf der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Anlage der Firma Rusal PLC durchgeführt. Vor der Verwendung der Anlage für die durchzuführenden Versuche musste eine Vorbereitungsprozedur durchlaufen werden. Die Arbeitswalzen wurden mit einem Gasbrenner so weit vorgeheizt (Abbildung 5.1a), bis mittels Kontaktthermometer vom Typ Center 302 Type KJ eine Temperatur $> 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen wurde. Während der Vorwärmung befanden sich die Arbeitswalzen im geöffneten Zustand und rotierten langsam bei ausgeschalteter Innenkühlung. Im Anschluss an die Vorwärmung wurde eine Schicht flüssiges Aluminium auf die Walzen gegossen. Als letzter Vorbereitungsschritt wurden mehrere Schnittstücke eines zuvor hergestellten Gussstrangs aus Aluminium vorgewärmt und durch die Anlage verfahren. Die Vorwärmung der Gussstücke erfolgte durch deren Positionierung in der Nähe einer Öffnung des Schmelzofens (Abbildung 5.1b). Geprüft wurde die Temperatur der Gussstücke durch Messung der Oberflächentemperatur mittels des zuvor beschriebenen Kontaktthermometers.



(a) Vorwärmung der Arbeitswalzen mittels Gasbrenner



(b) Vorwärmung der Schnittstücke durch deren Positionierung an einer Schmelzofenöffnung

Abbildung 5.1: Vorbereitung der Anlagenversuche

Die während der Anlagenversuchsreihe nicht veränderlichen geometrischen Größen der Umformkammer werden in Tabelle 5.1 gegeben. Ihre Angabe erfolgt gemäß der in Abbildung 2.10b eingeführten Nomenklatur.

Die Tabelle 5.2 zeigt den Versuchsplan zu den experimentellen Versuchen zum kombinierten Walzen und Strangpressen. Es werden zwei Parameter des Prozesses in den Versuchen

Tabelle 5.1: Unveränderliche Größen des Umformraumes der Anlagenversuche entsprechend Abbildung 2.10b

r_w	h_0	h_1	h_2	$b_1 = b_2 = b_3$
<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
214	35	20	31	42

variiert. Der Drahtdurchmesser h_3 variiert zwischen 15 *mm*, 12 *mm* und 9,5 *mm*. Die Drehzahl der Walzen wurde entweder auf $2,75 \frac{U}{min}$ oder $4,7 \frac{U}{min}$ eingestellt. In der Folge ergeben sich sechs Versuchsvarianten, welche in der Durchführung mindestens dreifach besetzt wurden.

Tabelle 5.2: Versuchsplan der experimentellen Anlagenversuche

Nr.	Durchläufe	h_3	n
		<i>mm</i>	U/min
1	3	15	2,75
2	3	12	2,75
3	3	9,5	2,75
4	5	15	4,7
5	5	12	4,7
6	5	9,5	4,7

Die Versuchsstücke hatten eine Länge von etwa 920 *mm* und ihre Querschnittsfläche A_0 betrug 1232 *mm*². Ihre Vorwärmung erfolgte identisch zu der Erwärmung der Schnittstücke zur Vorwärmung der Anlage nach Abbildung 5.1b durch ihre Positionierung nahe einer Öffnung des Schmelzofens. Die Eingangstemperatur der Gussstücke wurde durch die Messung der Oberflächentemperatur mittels Kontaktthermometer erfasst. Mit dem gleichen Vorgehen wurde die Ausgangstemperatur des hergestellten Drahtes gemessen. Die Durchlaufzeit und das Drehmoment der Motoren wurden durch die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) der Anlage mitgeschrieben.

5.2 Numerische Umformsimulation

Um den Umformprozess des kombinierten Walzens und Strangpressens zu simulieren, wurde die Software Simufact.Forming in den Versionen 14 & 15 verwendet. Die Abbildung 5.2 zeigt einen Ausschnitt des dreidimensionalen, nach der Methode von Lagrange beschriebenen Simulationsmodells in der Seitenansicht (oben) und die Lage der zur Anwendung kommenden Symmetrieebene durch eine Draufsicht (unten). Der Modellaufbau wird nachfolgend anhand dieser Darstellungen detailliert beschrieben.

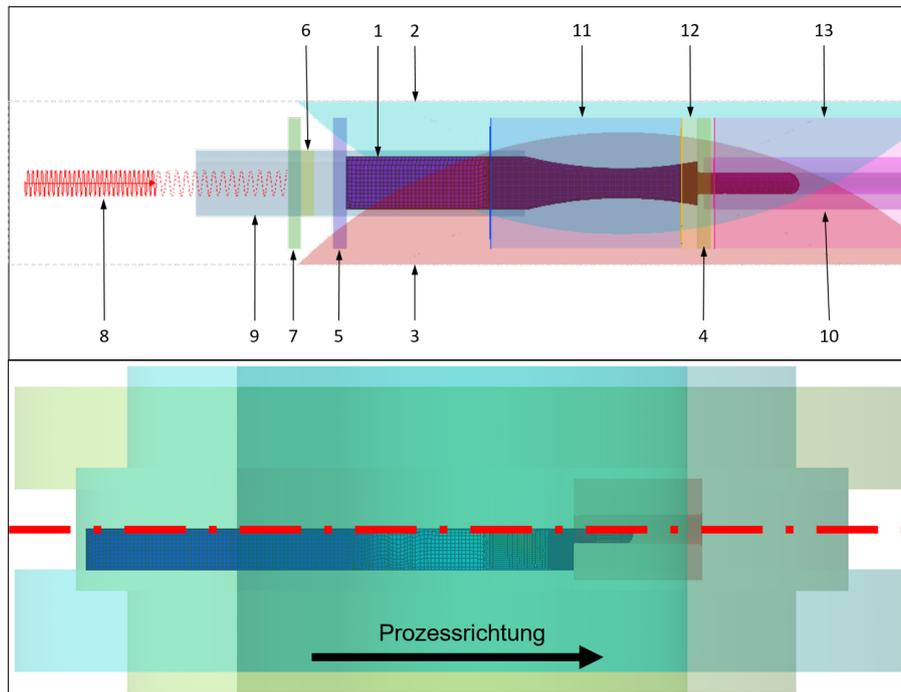


Abbildung 5.2: Aufbau des Simulationsmodells und Darstellung der einzelnen Komponenten (oben) sowie Positionierung der angewendeten Symmetrieebene zur Reduktion der Rechenzeit (unten)

In der Darstellung ist die Simulation bereits im fortgeschrittenen Zustand. Das Werkstück (1) füllt die Umformkammer vollständig aus und wurde durch die Rotation der Walzen (2 & 3) durch die Matrize (4) gepresst. Die Umformwerkzeuge wurden als starre Körper modelliert. Der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Werkstück und Werkzeugen wird in Abhängigkeit vom Kontaktdruck berechnet. Die für den Prozess erforderliche Reibung zwischen den Walzen und dem Werkstück wurde bei den durchgeführten Simulationen unterschiedlich beschrieben. Vor der Entwicklung des Reibmodells, welches die Reibung örtlich aufgelöst in Abhängigkeit von Druck, Temperatur und Relativbewegung berechnet, wurde das Schubspannungsmodell nach Tresca mit dem Faktor 1 angewendet. Zwischen dem Werkstück und der Matrize wird ein reibungsfreier Zustand angenommen.

Um den Umformprozess einzuleiten, wird die mit dem Werkstück verbundene Platte (5) in Prozessrichtung gedrückt. Hierzu ist die Platte zu Prozessbeginn mit dem Zwischenstück (6) in Kontakt, welches gemeinsam mit der Federplatte (7) eine durch die gekoppelte Feder (8) definierte Kraft auf das Werkstück ausübt. Die Ablösespannung der mit dem Werkstück verbundenen Platte und der Zwischenplatte ist gering. Greifen die Walzen das Werkstück, löst sich die Platte vom Zwischenstück und die Modellhilfe hat keinen Einfluss mehr auf den Prozess. In der Darstellung ist die Platte bereits vom Zwischenstück getrennt. Die beiden Führungsstücke (9 & 10) sollen das Modell nume-

risch stabiler machen. Zu Beginn des Prozesses bestünde ohne Führung wenig Kontakt zwischen Werkzeugen und Werkstück. Ebenso kann das frei in den Raum extrudierte Werkstück zu numerischen Problemen führen, wenn es nicht durch den Hilfskörper im Auslauf geführt würde.

Aufgrund der Symmetrie des Verfahrens kann die Modellierung des Werkstücks auf eine Hälfte reduziert werden. Die Anordnung der Symmetrieebene wird durch die rote Linie im unteren Teil der Abbildung 5.2 dargestellt. Das Werkstück wird mit Hexaederelementen diskretisiert. Die Ausgangselementgröße variiert je nach Geometrie des Prozesses zwischen 3 und 5 mm. Mittels Verfeinerungsboxen (11, 12, 13) wird die Elementgröße während des Prozessdurchlaufs beeinflusst. Kurz bevor die Walzen mit dem Werkstück in Kontakt kommen, halbiert die erste Verfeinerungsbox der Stufe 1 (11) die Ausgangselementgröße. Vor dem Verpressen des Werkstücks durch die Matrize halbiert die zweite Verfeinerungsbox der Stufe 2 (12) die Elementgröße erneut. Nachdem das Werkstück die Matrize passiert hat, wird die Diskretisierung durch die letzte Verfeinerungsbox der Stufe 1 (13) wieder vergrößert. Die notwendige Neuvernetzung während der Simulation und der Einsatz der Verfeinerungsboxen führt zu einer starken Schwankung der Anzahl der Elemente. Befindet sich das Werkstück zu Beginn der Simulation vollständig außerhalb der Verfeinerungsboxen liegt die Elementzahl bei 15000 bis 20000. Ist der Umformprozess angelaufen und im stationären Zustand, liegt die Anzahl der Elemente bei etwa 75000.

Zur Beschreibung der Fließgrenze des in allen Versuchen und Simulationen verwendeten Werkstoffes Al 99,5 wurde ein Materialmodell aus der Datenbank der verwendeten Simulationssoftware Simufact.Forming genutzt. Der Umformwiderstand wird in diesem Modell durch die Gleichung 5.1 beschrieben.

$$\sigma_F = \max(S, C * \dot{\varphi}^M) \quad (5.1)$$

Der Parameter S beschreibt die minimale Fließspannung, C ist die sogenannte Ausbringungskonstante und M der Verfestigungsgeschwindigkeitsexponent. Die Gültigkeitsbereiche des Materialmodells können der Tabelle 5.3 entnommen werden.

Tabelle 5.3: Gültigkeitsbereiche der Fließkurvenbeschreibung durch den Warmumformansatz 2 entsprechend Formel 5.1 der verwendeten Simulationssoftware Simufact.Forming

T_{\min}	T_{\max}	φ_{\min}	φ_{\max}	$\dot{\varphi}_{\min}$	$\dot{\varphi}_{\max}$
$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	–	–	$1/s$	$1/s$
240	480	0,01	2	0,001	100

Nach der Berechnungsvorschrift 5.1 ist der Umformwiderstand nur abhängig von der Dehnrage. Die fehlenden Abhängigkeiten von der Temperatur und der Dehnung werden

durch die Anwendung unterschiedlicher Ausbringungskonstanten und Verfestigungsgeschwindigkeitsexponenten für verschiedene Kombinationen aus Temperaturen und Dehnungen im Modell abgebildet. Die verwendeten Parameter werden in der Tabelle 5.4 gelistet. Die minimale Fließspannung wird in allen Fällen mit $S = 10 \text{ MPa}$ angenommen.

Tabelle 5.4: Parametersätze der verwendeten Fließkurvenbeschreibung für Al 99,5 für verschiedene Kombinationen aus Temperaturen und Dehnungen nach Gleichung 5.1 aus der Simulationssoftware Simufact.Forming

T	φ	C	M
$^{\circ}\text{C}$	—	N/mm^2	—
240	0,2	75152851,3	0,066
360	0,2	40679066,3	0,141
480	0,2	23442173,8	0,168
240	0,4	84805511,0	0,069
360	0,4	43436969,1	0,146
480	0,4	22752698,1	0,169
240	0,6	90321316,7	0,067
360	0,6	44126444,8	0,147
480	0,6	22063222,4	0,173
240	0,8	95147646,6	0,064
360	0,8	46194871,9	0,135
480	0,8	23442173,8	0,161

In der Simulation ist es notwendig, den Umformwiderstand für Temperaturen, Dehnungen und Dehnraten zu bestimmen, welche zwischen den Parametern liegen, die durch die Tabelle 5.4 vorgegeben werden. In diesen Fällen wird der Umformwiderstand mittels linearer Interpolation zwischen den umliegenden Wertepaaren ermittelt. Der Gültigkeitsbereich der Dehnungen reicht bis 2, die Parametersätze des Modells lediglich bis 0,8. Das Modell trifft die Annahme, dass keine signifikante Verfestigung zwischen den Dehnungen von 0,8 und 2 zum Tragen kommt. Verlassen die eingehenden Modellgrößen zur Berechnung der Fließspannung den Gültigkeitsbereich des Materialmodells, wird der jeweilige Minimal- bzw. Maximalwert des entsprechenden Gültigkeitsbereiches verwendet.

Tabelle 5.5: Mechanische Eigenschaften der Werkstoffbeschreibung für Al 99,5 aus der Simulationssoftware Simufact.Forming

E	ν	ρ	λ
GPa	—	kg/dm^3	$1/\text{K}$
69	0,33	2,705	$2,38 * 10^{-5}$

Die Tabelle 5.5 zeigt relevante mechanische Eigenschaften des eingesetzten Materialmodells zum Al 99,5. Das Elastizitätsmodul E beschreibt das elastische Verhalten des Werkstoffes bis zur Plastifizierung und wird in der Einheit GPa angegeben. Weiter wird die dimensionslose Querkontraktionszahl ν , die in $\frac{kg}{sm^3}$ angegebene Dichte ρ und der in $\frac{1}{K}$ angegebene Wärmeausdehnungskoeffizient als konstanter Wert dargestellt. In der Realität sind diese Werte von der Werkstofftemperatur abhängig. Die Vorgabe dieser Parameter als konstanter Wert ist für die durchzuführenden Simulationen hinreichend genau.

Tabelle 5.6: Thermische Eigenschaften der Werkstoffbeschreibung für Al 99,5 aus der Simulationssoftware Simufact.Forming

α	c	V
W/m^2K	J/gK	—
234	0,9	0,9

In der numerischen Umformsimulation werden die in Tabelle 5.6 angegebenen thermischen Eigenschaften der simulierten Aluminiumlegierung angewendet. Die Wärmeleitfähigkeit α , angegeben in $\frac{W}{m^2K}$, beschreibt das Vermögen des Werkstoffes, Wärmeenergie zu transportieren. Die spezifische Wärmekapazität c eines Werkstoffes gibt an, wie viel Wärmeenergie von einem Körper mit einer Masse von 1 kg aufgenommen bzw. abgegeben werden kann, um diesen um $1\text{ }^\circ C$ zu erwärmen bzw. abzukühlen. Der dimensionslose Verlustfaktor gibt an, wie viel der in das Werkstück eingebrachten plastischen Formänderungsarbeit in Wärmeenergie umgewandelt wird und somit zur Erwärmung des Werkstücks während der Umformung führt.

5.3 Axialer Reibtest

Die zur Durchführung der axialen Reibversuche erforderlichen Hohl- und Vollzylinder wurden auf unterschiedliche Art und Weise hergestellt. Zur Fertigung der Hohlzylinder wurden Rundstangen aus dem Walzenwerkstoff bestellt. Die Geometrie der Hohlzylinder ist in Abbildung 5.3 beschrieben. Die Rundstangen aus Warmarbeitsstahl mit hoher Zähigkeit X38CrMoV5-1 (1.2343) wurden mit einem Außendurchmesser von 15 mm im weichgeglühten bzw. homogenisierten Zustand angeliefert. Der notwendige Fertigdurchmesser außen von 14 mm wurde durch Abdrehen erreicht. Der Hohlraum als Aussparung für den Vollzylinder wurde ebenfalls durch drehende Bearbeitung erzeugt. Abschließend wurden die Probenstücke auf eine Länge von 15 mm gekürzt.

Die Vollzylinder mit einem Außendurchmesser von $7,8\text{ mm}$ und einer Höhe von $10,5\text{ mm}$ wurden aus dem umzuformenden Werkstoff Al 99,5 gefertigt. Als Grundwerkstoff zur Herstellung der Vollzylinder wurden Gussstücke der realen Versuchsanlage verwendet.

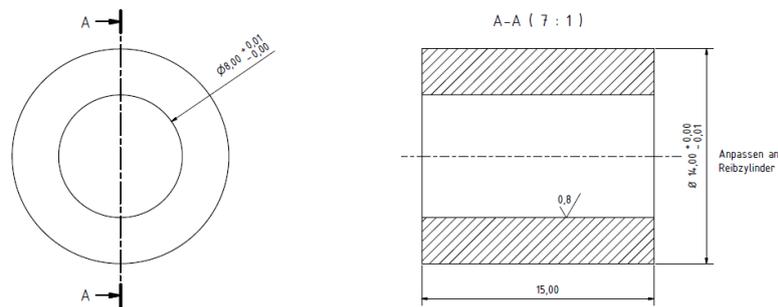


Abbildung 5.3: Geometrie der Hohlzylinder für den axialen Reibtest

Durch Kernlochbohrungen mit entsprechendem Innendurchmesser wurden die Vollzylinder erzeugt und anschließend auf einer Drehbank auf die erforderliche Höhe gekürzt.

Zur Erstellung eines Reibmodells, welches den Zusammenhang von Temperatur und Kontaktdruck auf den Reibkoeffizienten wiedergibt, wurde die in Tabelle 5.7 dargestellte Versuchsreihe mittels axialen Reibtests durchgeführt.

Tabelle 5.7: Versuchsplan der experimentellen axialen Reibtests

Nr.	T	F	v	Nr.	T	F	v	Nr.	T	F	v
	$^{\circ}C$	$x * k_f$	mm/s		$^{\circ}C$	$x * k_f$	mm/s		$^{\circ}C$	$x * k_f$	mm/s
1	200	1	0,1	14	300	3,5	0,1	27	400	1	50
2	200	1,2	0,1	15	300	1	1	28	400	1,2	50
3	200	3,5	0,1	16	300	1,2	1	29	400	3,5	50
4	200	5	0,1	17	300	3,5	1	30	200	1	0,1
5	200	12	0,1	18	300	1	50	31	200	1,2	0,1
6	200	1	1	19	300	1,2	50	32	200	3,5	0,1
7	200	1,2	1	20	300	3,5	50	33	200	1	1
8	200	3,5	1	21	400	1	0,1	34	200	1,2	1
9	200	1	50	22	400	1,2	0,1	35	200	3,5	1
10	200	1,2	50	23	400	3,5	0,1	36	200	1	50
11	200	3,5	50	24	400	1	1	37	200	1,2	50
12	300	1	0,1	25	400	1,2	1	38	200	3,5	50
13	300	1,2	0,1	26	400	3,5	1				

Die dargestellte Versuchsreihe wurde zu Beginn der Durchführung nicht vollständig festgelegt. Nach den ersten Untersuchungen wurde auf der Grundlage der erzeugten Ergebnisse der weitere Ablauf der Untersuchung angepasst. So wurde eine effiziente experimentelle Versuchsdurchführung des zu untersuchenden Temperatur- und Druckbereichs realisiert.

5.4 Simulierte Parameterstudie zur Geometrie des Umformraums

Um den Einfluss der einzelnen Größen zu untersuchen, welche den Umformraum des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses beschreiben, wurden diese gezielt variiert. Zur effizienten und systematischen Untersuchung wurde bei der Versuchsplanung die Methode der statistischen Versuchsplanung entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 4.3 angewendet. Die verschiedenen Simulationsmodelle zu den einzelnen Versuchen wurden wie in Abschnitt 5.2 beschrieben aufgebaut.

Als Werkstück wurde in allen Simulationen ein Strang aus Aluminium mit einem rechteckigen Querschnitt von $A_0 = 2000 \text{ mm}^2$ unter Anwendung einfacher Symmetrie verwendet. Die Ausgangstemperatur des Werkstücks lag bei $330 \text{ }^\circ\text{C}$. Die Diskretisierung des Ausgangsmaterials erfolgte mit Hexaederelementen. Die Ausgangselementkantenlänge von 5 mm wurde während der Simulation unter Anwendung der Verfeinerungsboxen beeinflusst. Die Box 1 halbiert die Elementkantenlänge auf $2,5 \text{ mm}$, die anschließende Box 2 halbiert erneut auf $1,25 \text{ mm}$ und die abschließende Box 3 vergrößert die Elementkantenlänge des Werkstücks zurück auf $2,5 \text{ mm}$.

In allen Simulationen rotierten die als Festkörper modellierten Walzen mit einer Geschwindigkeit von $6,3 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ und hatten eine feste Temperatur von $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Zwischen den Walzen und dem Werkstück wurde zur Beschreibung der Reibung das Modell von Tresca angewendet. Der Reibfaktor wurde hierbei mit 1 angenommen. Die Matrize wurde in allen Simulationen ebenfalls als Festkörper modelliert. Die Temperatur der Matrize wurde, aufgrund des dauerhaft wirkenden Kontaktes mit dem Werkstück, mit $300 \text{ }^\circ\text{C}$ angenommen. Zwischen der Matrize und dem Werkstück wurde der Reibfaktor 0 und folglich ein reibungsloser Zustand angenommen.

Die Tabelle 5.8 listet die unveränderlichen geometrischen Größen in der durchgeführten Parameterstudie entsprechend der Darstellung 2.10 aus Abschnitt 2.4.4.

Tabelle 5.8: Feste Geometrieparameter der Umformraumgeometrie

Parameter	Wert	Einheit
A_0	2000	mm^2
A_3	176,71	mm^2
r_W	600	mm^2

Die Tabelle 5.9 beschreibt die variablen Größen der Parameterstudie und deren unterschiedliche Ausprägungen in den Simulationsvarianten. Die Ausprägungen der einzelnen Parameter werden in Abhängigkeit von den mit ihnen im Zusammenhang stehenden Größen vorgegeben. Hierdurch wird vermieden, dass Kombinationen in der Versuchsplanung entstehen, welche unzulässige Paarungen aufweisen.

Tabelle 5.9: Variable Parameter der Umformraumgeometrie und deren verwendete Ausprägungen

Parameter	Wert min	Wert max
h_0	$0,5 * b_0$	$1 * b_0$
b_1	$1 * b_0$	$1,2 * b_0$
h_1	$0,25 * h_0$	$0,75 * h_0$
h_2	$0,75 * h_0$	$1,25 * h_0$

Bei vier variablen Größen, die in zwei Einstellungen untersucht werden, ergibt sich ein vollfaktorieller Versuchsplan mit $2^4 = 16$ Versuchen. Entsprechend der Standardreihenfolge bei der statistischen Versuchsplanung bilden die Versuchsvarianten 1 bis 16 der Tabelle 5.10 den vollfaktoriellen Versuchsplan [Her13]. In der Praxis wird bei der Durchführung von experimentellen Versuchsreihen häufig ein reduzierter, teilfaktorieller Versuchsplan eingesetzt. Grund ist die Zeit- und Kostenersparnis. Da die Simulationen vergleichsweise wenig monetären Aufwand in Anspruch nehmen, wurde in dieser Untersuchung die umfängliche Variante gewählt. Theoretisch hat jeder Faktor der Parameterstudie eine unendliche Anzahl an Einstellungsmöglichkeiten. Durch die Untersuchung der minimalen und maximalen Einstellung kann lediglich ein lineares Verhalten des Systems untersucht werden. Nichtlineare Zusammenhänge werden so vernachlässigt. Aus diesem Grund wurde der vollfaktorielle Versuchsplan mit den zwei Faktoreinstellungen um die Versuche der Nummern 17 bis 25 erweitert. Es entsteht ein sogenannter Wirkungsflächenversuchsplan. Die Ergebnisse einer derartigen Versuchsdurchführung ermöglichen Rückschlüsse auf nichtlineare Zusammenhänge zwischen den einzelnen Geometrieparametern des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses.

Tabelle 5.10: Wirkungsflächenversuchsplan der Parameterstudie zur Untersuchung der Einflüsse einzelner geometrischer Größen des Umformraumes

Nr.	Relativ				Absolut					
	h_0	b_1	h_1	h_2	h_0	b_0	h_1	b_1	h_2	b_2
					<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
1	0,5	1	0,25	0,75	31,62	63,25	7,91	63,25	23,72	63,25
2	1	1	0,25	0,75	44,72	44,72	11,18	44,72	33,54	44,72
3	0,5	1,2	0,25	0,75	31,62	63,25	7,91	75,89	23,72	75,89
4	1	1,2	0,25	0,75	44,72	44,72	11,18	53,67	33,54	53,67
5	0,5	1	0,75	0,75	31,62	63,25	23,72	63,25	23,72	63,25
6	1	1	0,75	0,75	44,72	44,72	33,54	44,72	33,54	44,72
7	0,5	1,2	0,75	0,75	31,62	63,25	23,72	75,89	23,72	75,89
8	1	1,2	0,75	0,75	44,72	44,72	33,54	53,67	33,54	53,67
9	0,5	1	0,25	1,25	31,62	63,25	7,91	63,25	39,53	63,25
10	1	1	0,25	1,25	44,72	44,72	11,18	44,72	55,9	44,72
11	0,5	1,2	0,25	1,25	31,62	63,25	7,91	75,89	39,53	75,89
12	1	1,2	0,25	1,25	44,72	44,72	11,18	53,67	55,9	53,67
13	0,5	1	0,75	1,25	31,62	63,25	23,72	63,25	39,53	63,25
14	1	1	0,75	1,25	44,72	44,72	33,54	44,72	55,9	44,72
15	0,5	1,2	0,75	1,25	31,62	63,25	23,72	75,89	39,53	75,89
16	1	1,2	0,75	1,25	44,72	44,72	33,54	53,67	55,9	53,67
17	0,5	1,1	0,5	1	31,62	63,25	15,81	69,57	31,62	69,57
18	1	1,1	0,5	1	44,72	44,72	22,36	49,19	44,72	49,19
19	0,75	1	0,5	1	38,73	51,64	19,36	51,67	38,73	51,64
20	0,75	1,2	0,5	1	38,73	51,64	19,36	61,97	38,73	61,97
21	0,75	1,1	0,25	1	38,73	51,64	9,68	56,8	38,73	56,8
22	0,75	1,1	0,75	1	38,73	51,64	29,05	56,8	38,73	56,8
23	0,75	1,1	0,5	0,75	38,73	51,64	19,36	56,8	29,05	56,8
24	0,75	1,1	0,5	1,25	38,73	51,64	19,36	56,8	48,41	56,8
25	0,75	1,1	0,5	1	38,73	51,64	19,36	56,8	38,73	56,8

5.5 Untersuchung des Materialflusses

5.5.1 Präparation des Versuchsmaterials

Zur Visualisierung des Materialflusses beim kombinierten Walzen und Strangpressen wurden Kupferstifte in ein Gussstück aus Aluminium eingebracht. Um Erkenntnisse über den Materialfluss in mehrere Raumrichtungen zu gewinnen, wurden sowohl hori-

zontale als auch vertikale Kupferstifte in die Probe eingearbeitet. Die Abbildung 5.4 stellt die Positionen und die Orientierung der 4 mm dicken Kupferstifte in dem Aluminiumgussstück dar. Dem Bohrungsquerschnitt der Darstellung 5.4a kann entnommen werden, dass eine vertikale Stiftreihe vollständig durch die Mitte des Querschnitts verläuft. Eine weitere vertikale Reihe aus Kupferstiften wurde mit einem Abstand von 6 mm neben der mittleren Bohrfolge positioniert. Weiter wurden zwei Ebenen horizontaler Kupferstifte in die Seite des Profils eingebracht. Zwischen den vertikalen, mittig angeordneten und den horizontalen Stiften wurde ein Abstand von 5 mm belassen.

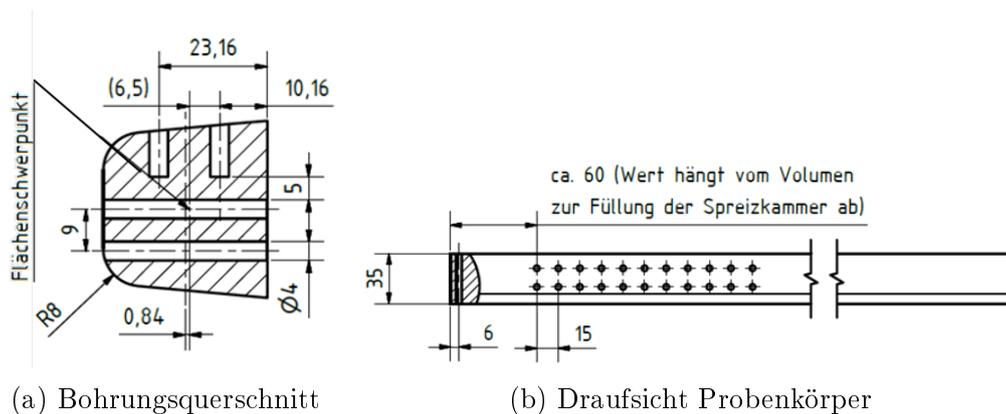
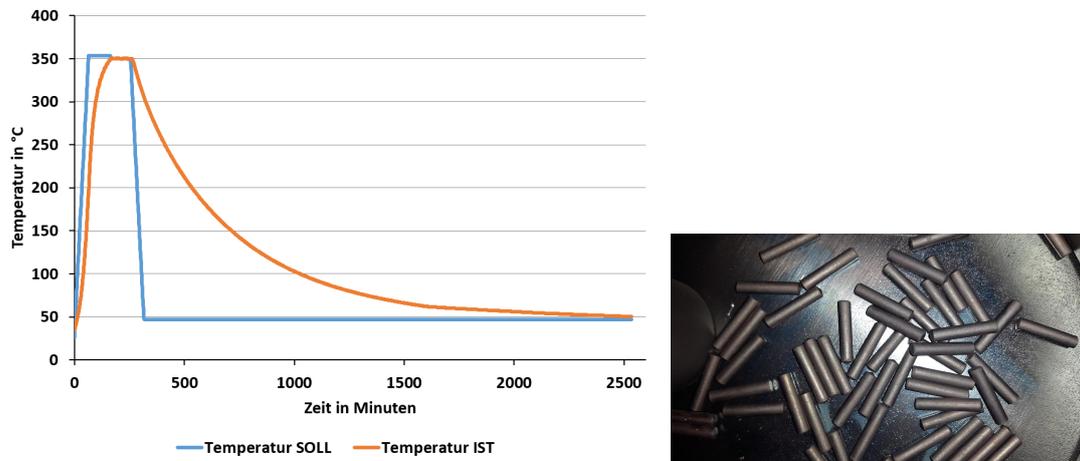


Abbildung 5.4: Positionierung der Kupferstäbe in den Versuchskörpern

Die aus Reinkupfer (Cu-ETP) bestehenden Stifte verfügen gegenüber dem gegossenen Aluminium über einen höheren Umformwiderstand. Hierfür sind zwei Gründe zu benennen. Erstens ist der Umformwiderstand von Kupfer gegenüber Aluminium von Natur aus höher, zweitens wurden die Stifte bei ihrer Herstellung ziehend umgeformt. Dieser Herstellungsprozess führt zu einer Verfestigung des Materials. Der unterschiedliche Widerstand gegenüber der Umformung beider Werkstoffe führt zu einer Verfälschung des im Versuch auftretenden Materialflusses. Um diesem Sachverhalt entgegenzuwirken, wurde die durch Vorverformung mittels Ziehprozess in den Werkstoff eingebrachte Verfestigung durch eine vorhergehende Wärmebehandlung der Kupferstifte reduziert. Nach der Vorgabe des Deutschen Kupferinstituts (DKI) muss der Werkstoff Cu-ETP zwischen 300 °C und 650 °C für 0,5 – 3 Stunden weichgeglüht werden [Kup19]. Der Glühvorgang erfolgte in einem Industrieofen der SMS group GmbH am Standort in Mönchengladbach unter Schutzgasatmosphäre aus Stickstoff.



- (a) Soll- und Ist-Temperaturverlauf des Ofens während des Weichglühens der Kupferstifte unter Stickstoffatmosphäre
- (b) Verzunderung der Kupferstifte nach dem Weichglühen unter Stickstoffatmosphäre

Abbildung 5.5: Temperaturverlauf (a) und Zunderbildung (b) bei der Wärmebehandlung der Kupferstifte

Die Teildarstellung 5.5a der Abbildung 5.5 zeigt den Soll- und Ist-Verlauf der Ofentemperatur über die Dauer der Wärmebehandlung der Kupferstifte. Die Ist-Temperatur des Ofens wurde für 1,5 Stunden auf über $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ gehalten. Das langsame Abflachen der Ist-Kurve ist der Tatsache geschuldet, dass über die Dauer der Abkühlung der Ofen geschlossen gehalten wurde. Das langsame Abkühlen der Kupferstifte soll die vollständige Erholung des Materials begünstigen und dazu beitragen, dass sich eine möglichst geringe Fließspannung einstellt. Obwohl die thermische Behandlung der Kupferstifte unter Schutzgasatmosphäre durchgeführt wurde, war eine Zunderbildung auf der Oberfläche der Proben nach der Wärmebehandlung erkennbar. Abbildung 5.5b zeigt den Zustand der Kupferstifte nach der Wärmebehandlung. Die Entfernung des entstandenen Zunders erfolgte durch Beizen der Stifte in einer Säurelösung. Als Beizlösung wurde eine auf $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhitzte Mischung aus Schwefelsäure (15 %) und Kaliumdichromat (10 %) verwendet.

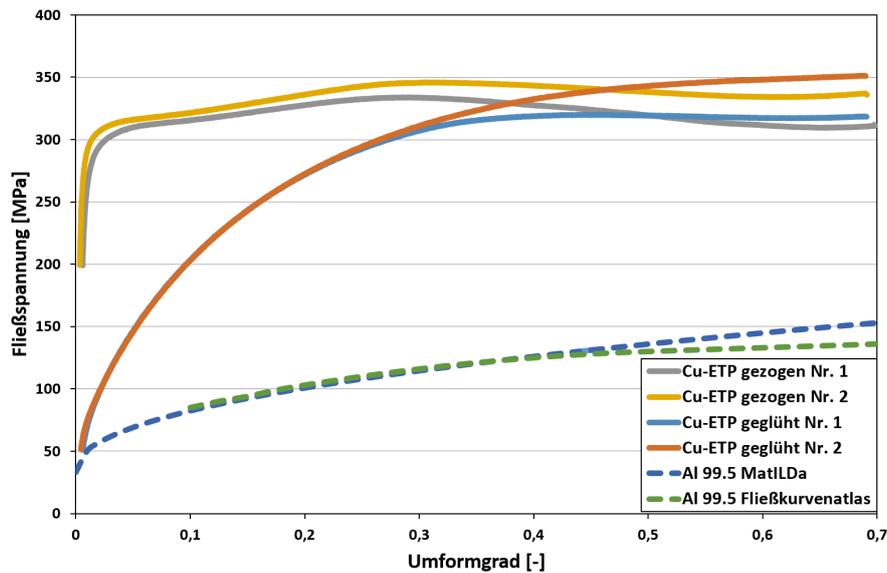


Abbildung 5.6: Vergleich der Fließspannungen von Al 99,5 und dem Cu-ETP der Kupferstifte vor und nach der Wärmebehandlung

Zur Überprüfung des Effektes der durchgeführten Wärmebehandlung auf den Umformwiderstand der Kupferstifte wurden die Fließgrenzen der Stifte vor und nach dem Weichglühen experimentell ermittelt, einander gegenübergestellt und mit der Fließgrenze des Versuchswerkstoffes Al 99,5 verglichen. Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse dieses Vergleichs. Die Fließkurven der Kupferproben wurden an einem Abschreck- und Umformdilatometer des Typs DIL 805 A/D der Firma TA Instruments aufgenommen. Zum Vergleich mit dem Al 99,5 des Versuchsmaterials wurde eine Fließkurve aus dem Fließkurvenatlas [Doe86] und eine Fließkurve aus dem Datenbestand der MatILDa Werkstoffdatenbank entnommen. Für die vergleichenden Randbedingungen von $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ und $\dot{\varphi} = \frac{1}{s}$ ist eine deutliche Reduktion der Fließgrenze des thermisch behandelten Cu-ETP gegenüber dem gezogenen Material erkennbar. Besonders im Bereich der niedrigen Umformgrade von $\varphi < 0,4$ konnte der Umformwiderstand der Versuchsstifte deutlich gesenkt werden. Zwar liegt die Fließgrenze der wärmebehandelten Kupferstifte weiterhin deutlich über den Vergleichswerten des Al 99,5, die erzielte Annäherung begünstigt aber die Durchführbarkeit und die Qualität der zu erwartenden Ergebnisse.

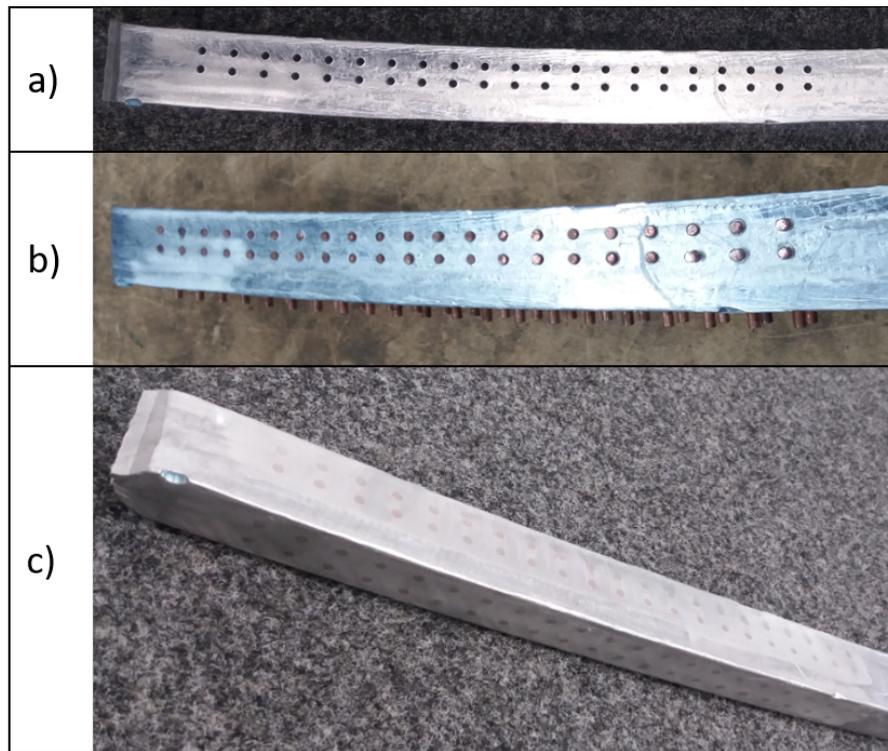


Abbildung 5.7: Herstellung der Versuchsstücke für die Materialflussuntersuchung:

- a) Gussblock mit Bohrungen
- b) Gussblock mit eingesetzten Kupferstiften
- c) Gussblock mit eingesetzten und abgeschliffenen Kupferstiften

Die Abbildung 5.7 zeigt Schritte des Herstellungsprozesses des Versuchsmaterials. Die obere Darstellung (a) zeigt das mit dem Bohrbild nach Abbildung 5.4 versehene Gussstück aus Aluminium. Um das geplante Bohrbild möglichst genau in das Gussstück einarbeiten zu können, muss die in gerader Ausführung geplante Positionierung der Kupferstäbe der Krümmung des Versuchsstücks folgen. Hierzu wurde das Gussstück in einem ersten Schritt unter Zuhilfenahme eines industriellen Messsystems vom Typ ATOS Triple Scan digitalisiert. Die Aufbereitung der gemessenen Daten und die Rückführung in ein Flächenmodell erfolgten mit der Software SpaceClaim in der Version 19.0. Mittels der Computer-aided Manufacturing (CAM) Software Tebis in der Version 4.0R5 wurde das gekrümmte Bohrbild auf das digitalisierte Gussstück aufgebracht und der erforderliche Computerized Numerical Control (CNC) Code für die automatisierte zerspanende Bearbeitung erstellt. Durchgeführt wurden die Bohrungen auf einem Bearbeitungszentrum der Firma Hedelius vom Typ RS80 5AX mit Rundtisch. Im Anschluss wurden die weichgeglühten und gebeizten Kupferstifte mit einem Hammer in die Bohrungen eingeschlagen. Die Darstellung (b) zeigt diesen Zustand. Die aus dem Gussstück herausragenden Köpfe der Kupferstifte wurden mittels Winkelschleifer und

Trennscheibe gekürzt und abschließend mit Winkelschleifer und Schruppscheibe glatt geschliffen. Die Darstellung (c) der Abbildung 5.7 zeigt das fertige Versuchsstück für die Materialflussuntersuchung beim kombinierten Walzen und Strangpressen.

5.5.2 Versuchsdurchführung

Der Versuch zur Untersuchung des Materialflusses wurde an der in Abschnitt 4.1 vorgestellten Anlage zum kombinierten Walzen und Strangpressen durchgeführt. Anlagen- und Versuchsmaterialvorbereitung sowie die Aufnahme der während des Versuchs messbaren Größen geschahen in einem industriellen Produktionsumfeld. Die Raumtemperatur lag bei $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Walzen wurden zunächst im geöffneten Zustand mit einem Gasbrenner, entsprechend Abbildung 5.1a, für $\approx 10\text{ min}$ vorgeheizt. Mit einem Kontaktthermometer der Firma CENTER vom Type 302 K J wurde eine Oberflächentemperatur von $94,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ an den Walzen gemessen. Zur weiteren Vorwärmung von Walzen und Matrizen wurden die Walzen geschlossen und sechs vorgewärmte Gussstücke aus Reinaluminium bei einer gemessenen Oberflächentemperatur von $\approx 450\text{ }^{\circ}\text{C}$ durch die Anlage umgeformt. Die anschließend gemessene Oberflächentemperatur der Walzen wurde hierdurch auf $\approx 115\text{ }^{\circ}\text{C}$ erhöht.

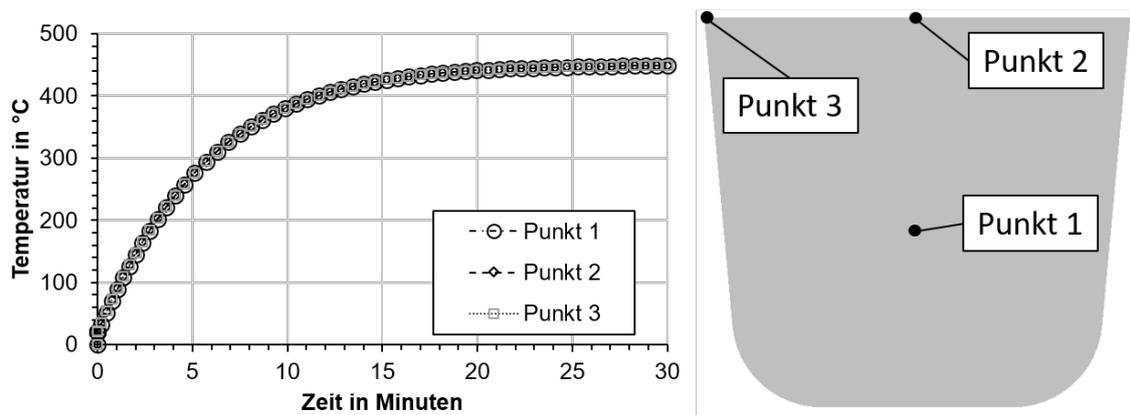


Abbildung 5.8: Simulierte Aufheizkurven (links) an unterschiedlichen Positionen im Querschnitt des Versuchsmaterials (rechts)

Um bei der Versuchsdurchführung eine homogene Temperaturverteilung im Versuchsmaterial sicherzustellen, wurde das Aufheizen der Probe simuliert. Das Versuchsmaterial wurde entsprechend der Abbildung 5.1b an einer Öffnung des Halteofens erwärmt. In der Simulation wurde angenommen, dass die Umgebungstemperatur bei $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt. Auf der zweidimensional vereinfachten Querschnittsfläche wurden drei Messpunkte aufgebracht, welche den Verlauf der Temperatur über die Aufheizdauer von 30 Minuten mitschreiben. Die linke Darstellung der Abbildung 5.8 zeigt die mitgeschriebenen Temperaturen der in der rechten Darstellung gezeigten drei Messpunkte des Querschnitts. Den Ergebnissen der Simulation kann entnommen werden, dass die Vorwärmung von $\approx 30\text{ min}$ zu einer homogenen Temperaturverteilung im Versuchsmaterial zum Beginn der Versuchsdurchführung führt. Vor der Versuchsdurchführung wurde eine Oberflächentemperatur von $442,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ mittels Kontaktthermometer gemessen.

Nachdem das Versuchsmaterial in die Anlage eingeführt worden war, konnte am Austritt der Matrize die vollständige Füllung der Umformkammer erkannt und die Walzen konnten gestoppt werden. Aufgrund der programmierten Start-/Stopp-Rampe der Walzen und der vorgegebenen Drehzahl von $1,32\frac{\text{U}}{\text{min}}$ ergibt sich bei einem Walzendurchmesser von 428 mm ein Nachlauf von $\approx 80\text{ mm}$.

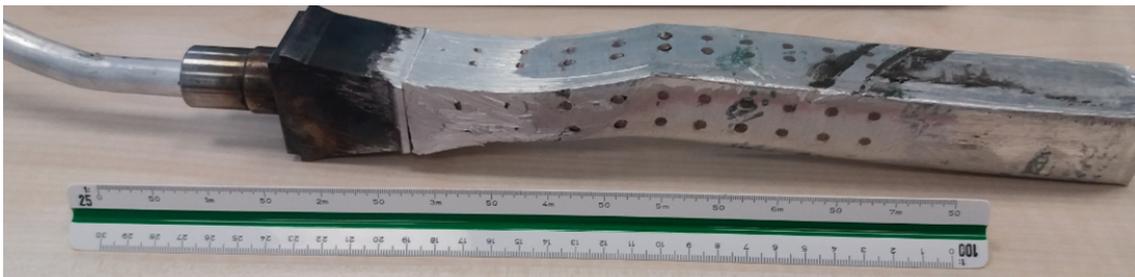


Abbildung 5.9: Verformte und entnommene Probe der experimentellen Materialflussuntersuchung

Sobald die Anlage zum Stillstand gekommen war, wurden die Arbeitswalzen geöffnet. Das verformte Versuchsmaterial musste mit der anhaftenden Matrize aus der Anlage genommen werden. Versuchsmaterial und Matrize hafteten aneinander. Die verformte und entnommene Probe ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Anhand der sichtbaren Kupferstifte im Bereich der Umformkammer und im entstandenen Draht hinter der Matrize ist erkennbar, dass die gesamte Umformkammer der Anlage mit dem Bereich des Versuchsmaterials ausgefüllt ist, welcher mit Kupferstiften versehen wurde. Der abstehende Draht wurde abschließend mit einer Handsäge abgetrennt. Die Matrize musste mit Keil und Hammerschlägen von dem Versuchsmaterial gelöst werden.

5.5.3 Computertomographie

Um die Verformung der Kupferstifte innerhalb des Versuchsmaterials einer Untersuchung unterziehen zu können, wurde die umgeformte Probe einer computertomographischen Vermessung unterzogen. Der Messaufbau wird in der Abbildung 5.10 dargestellt. Das Versuchsmaterial (1) ist in einem Aufbau aus Schaumstoff (2) auf einem Drehtisch (3) eingebettet. Dieser Drehtisch fährt für die Messung zwischen die Röntgenquelle (4) und den Detektor. Die in zuvor definierten Winkellagen entstehenden Einzelbilder werden im Anschluss an die Aufnahmen zu einem dreidimensionalen Messergebnis zusammengesetzt.

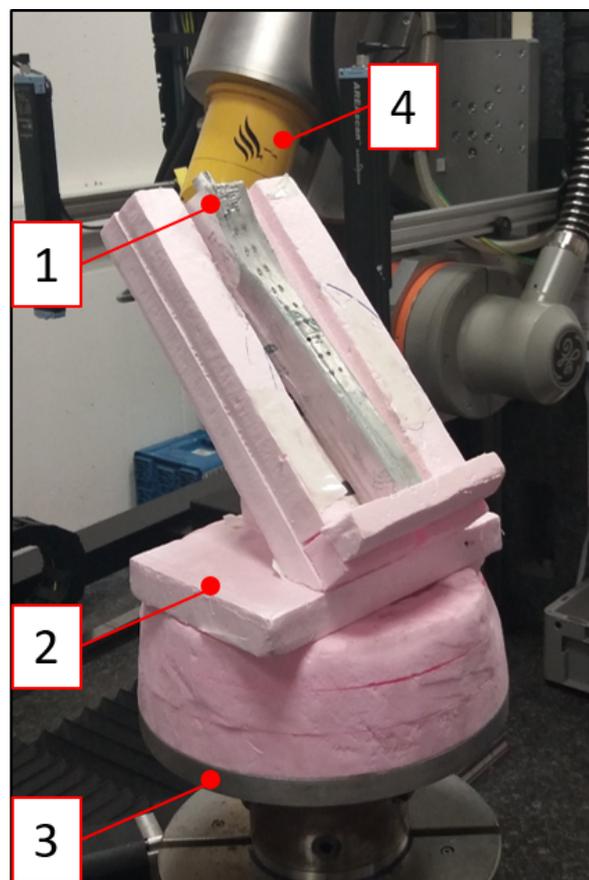


Abbildung 5.10: Aufbau zur computertomographischen Vermessung des umgeformten Versuchsmaterials

Die Messung wurde auf einem 3D-Computertomographen vom Typ Phoenix v|tome|x L 450 durchgeführt. Die Voxelgröße bzw. die resultierende Ergebnisauflösung beträgt $89,9 \mu\text{m}$. Während der Drehung von 360° des Tisches wurden 1400 Aufnahmen mit einer Belichtungszeit von $250,1 \text{ ms}$ erstellt. Das entspricht einer Aufnahme je $0,257^\circ$ Tischdrehung. Die Beschleunigungsspannung der Röntgenquelle betrug 400 kV bei einer Stromstärke von $600 \mu\text{A}$.

5.5.4 Mikrostrukturuntersuchung

Das entnommene Versuchsmaterial wurde zur weiterführenden mikrostrukturellen Untersuchung in kleinere Probenstücke zerteilt. Um bei dieser Betrachtung möglichst umfangreiche Informationen über die Ausbildung des Werkstoffgefüges zu erhalten, wurden verschiedene Richtungen des Versuchsmaterials bei der Zertrennung gewählt. Die Abbildung 5.11 stellt die eingezeichneten Trennlinien für die Sägeschnitte auf dem Versuchsmaterial dar.

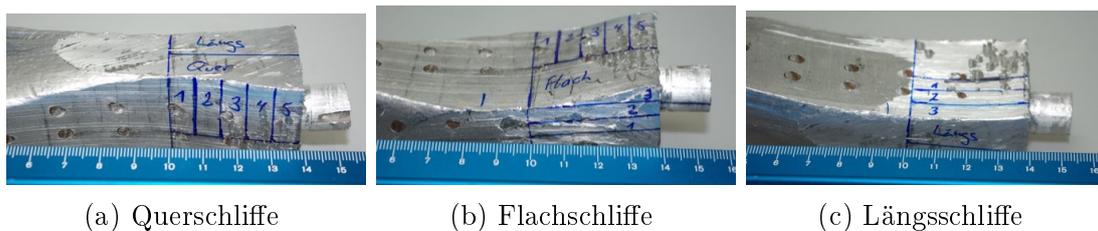


Abbildung 5.11: Darstellung der Sägeschnitte der Probenentnahme zur anschließenden metallographischen Untersuchung

Die Querschnitte der Darstellung 5.11a ermöglichen eine Untersuchung der Mikrostruktur aus der Sicht in Prozessrichtung. Die Flachschnitte der Darstellung 5.11b dienen der Untersuchung aus der Ansicht von oben auf den Prozess und die Längsschnitte der Darstellung 5.11c einer Untersuchung aus der seitlichen Prozessansicht. Durch die gewählten Schnitte und deren Orientierung ist eine Untersuchung der Mikrostruktur in alle drei Raumrichtungen ermöglicht.



Abbildung 5.12: Darstellung der gesägten Proben zur anschließenden metallographischen Untersuchung

Mittels Band- und Feinsäge wurden die Probenstücke aus dem Versuchsstück getrennt. Abbildung 5.12 zeigt die entnommenen Probenstücke aus beiden Richtungen. Zu den benennenden Kürzeln Q für Querschnitte, F für Flachschnitte und L für Längsschnitte wurde den Einzelstücken jeweils eine fortlaufende Nummer hinzugefügt.

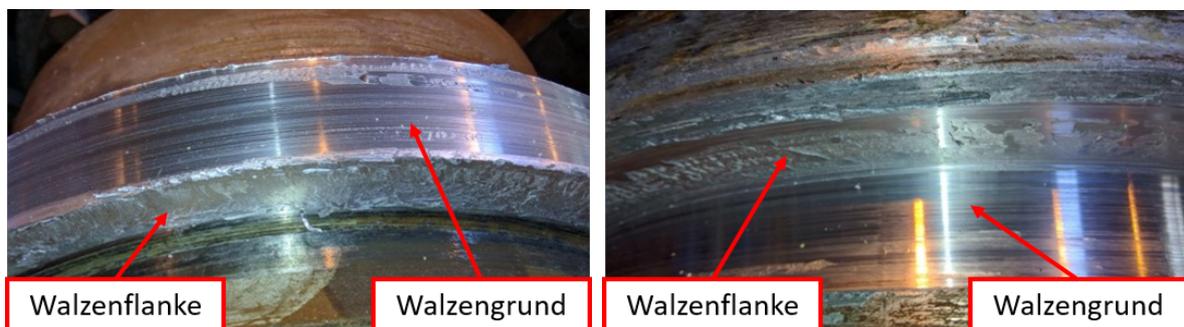
Um die Mikrostruktur der Probenstücke sichtbar zu machen, wurden diese in eine Fassung aus dem Werkstoff Technovit 4017 eingegossen und anschließend mit SiC-Sandpapier vorgeschliffen. Hierbei wurde die Körnung des Sandpapiers schrittweise verfeinert. Die Abfolge der Körnung war: 120 \rightarrow 800 \rightarrow 1200 \rightarrow 2500 \rightarrow 4000. Die anschließende Politur der Proben erfolgte mit einer Suspension aus Diamant und blauem Lubrikant von Struers. Die Abfolge der Partikelgröße der eingesetzten Diamantpartikel war: 6 μm \rightarrow 3 μm \rightarrow 1 μm . Im Anschluss an die Politur wurde eine Makro-Gefügeätzung (Wischätzung) durchgeführt. Hierzu wurde eine Ätzlösung aus 1 ml destilliertem Wasser, 12 ml Salzsäure (40 %), 6 ml Salpetersäure und 1 ml Flußsäure (40 %) angemischt. Ein Wattetupfer wurde mit der Ätzlösung getränkt und über die polierten Proben gewischt. Nach etwa 3 Sekunden wurde die chemische Reaktion zwischen der Lösung und der Probe durch Abspülen der Ätzlösung mit destilliertem Wasser unterbrochen. Zur visuellen Erfassung der Mikrostruktur wurde ein Flachbettscanner mit einer Auflösung von 3000 DPI verwendet.

6 Versuchsergebnisse

6.1 Ergebnisse der Anlagenversuche

6.1.1 Phänomenologische Beobachtungen der experimentellen Versuche

Zwischen den Versuchsdurchführungen mussten zum Wechsel der Matrizen die Arbeitswalzen der Versuchsanlage geöffnet werden. Hierdurch wurde eine visuelle Begutachtung der Arbeitswalzenoberflächen möglich. Die Abbildung 6.1 zeigt Anhaftungen an der I-Walze in Teildarstellung 6.1a sowie Anhaftungen an der U-Walze in Teildarstellung 6.1b. Entgegen den üblichen Längs- und Kaliberwalzverfahren, bei denen Anhaftungen des Werkstückmaterials an den Arbeitswalzen unerwünscht sind, erfordert der hier untersuchte kombinierte Prozess ein Mindestmaß an Reibung, um die erforderliche Vorschubkraft zum Verpressen des Werkstücks aufbringen zu können. Resultierend kann an den Arbeitswalzen der Versuchsanlage zum kombinierten Walz- und Strangpressverfahren nach den Versuchsdurchführungen ein Anhaften von Aluminiumrückständen beobachtet werden.



(a) I-Walze

(b) U-Walze

Abbildung 6.1: Anhaftungen des Aluminiums an der I-Walze (links) und der U-Walze (rechts) nach der Versuchsdurchführung

Beide Teildarstellungen zeigen eine ähnliche Charakteristik bezüglich der verbleibenden Aluminiumanhaftungen. Im Walzengrund ist überwiegend eine Ausbildung von Striemen in Prozessrichtung erkennbar. Abplatzungen des Werkstückwerkstoffes sind vereinzelt und vornehmlich an den Rändern des Walzengrundes erkennbar. Während des Umformprozesses bewegen sich die Walzenflanken mit einem schmalen Spalt von $\approx 0,5 \text{ mm}$ relativ zueinander. An beiden Flanken der Arbeitswalzen sind hauptsächlich undefinierte Abplatzungen des verarbeiteten Werkstoffes zu erkennen.

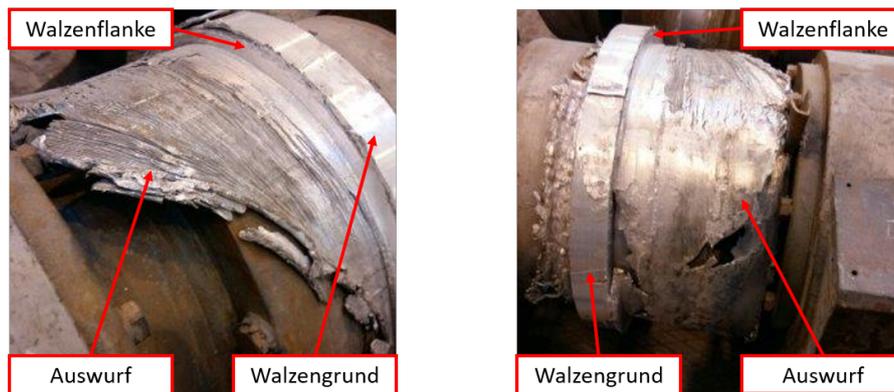


Abbildung 6.2: Aus der Umformkammer herausgepresstes Aluminium

Während der Durchführung der Versuche konnte ein weiteres Phänomen des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses beobachtet werden, welches in den Bildern der Darstellung 6.2 gezeigt wird. Im unteren Bereich der Walzenflanke an der I-Walze bildet sich während des Umformprozesses eine aus der Umformkammer herausgepresste Aluminiumschicht. Diese Schicht wächst als umfängliche Hülle über die Arbeitswalzenwelle. In der linken Teildarstellung ist die wellenförmige Struktur der Oberfläche dieser sich bildenden Hülle zu erkennen. Die rechte Teildarstellung zeigt, dass dieses Phänomen nicht symmetrisch auftritt. Auf der rechten Seite der Darstellung hat sich die Hülle über die gesamte Länge der Arbeitswalzenwelle gebildet. Auf der linken Seite ist eine vergleichsweise kleine ausgepresste Aluminiumhülle erkennbar.

6.1.2 Gemessene Prozessgrößen der experimentellen Versuche

Zu jeder experimentell untersuchten Prozessvariante nach Tabelle 5.2 wurde eine unterschiedliche Anzahl an Versuchen durchgeführt. Die Entscheidung über die Anzahl der durchgeführten Versuche fiel auf der Grundlage der Verfügbarkeit des Probenmaterials, der verfügbaren Zeit an der Versuchsanlage und der Qualität der bereits durchgeführten Versuche zu der jeweiligen Parameterzusammensetzung. Abbildung 6.3 zeigt beispielhaft die gemessenen Drehmomente der Arbeitswalzen während der drei Versuchsdurchführungen der ersten Versuchsreihe. Erfasst wurde das Drehmoment über die SPS der Anlage auf der Grundlage des vorliegenden Motorstroms unter Berücksichtigung des zwischengeschalteten Getriebes.

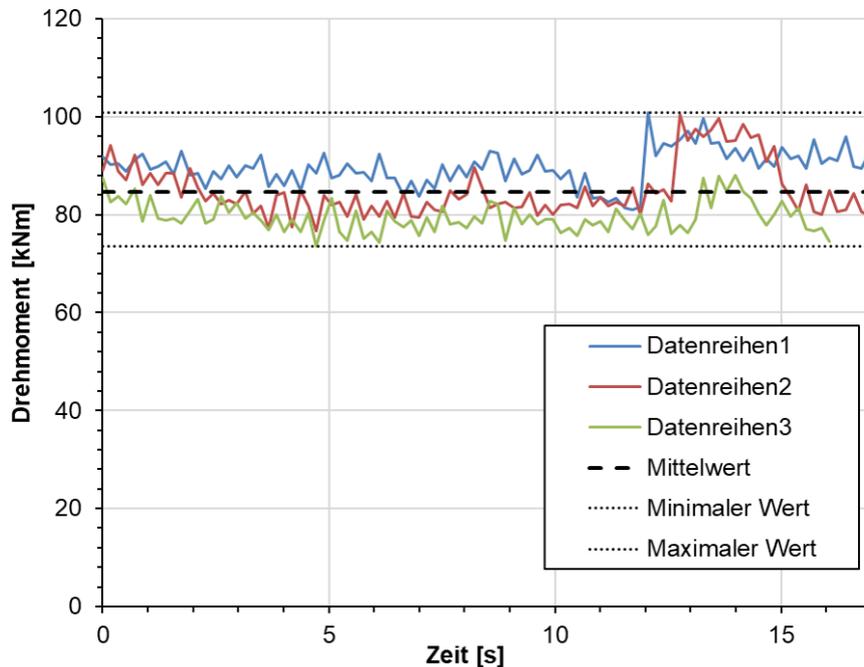


Abbildung 6.3: Gemessene Drehmomente der Versuchsreihe 1
 $n = 2,75 \frac{U}{min}$; $\varnothing_{Draht} = 15 \text{ mm}$

In den dargestellten Drehmomentverläufen der drei Versuchsdurchführungen zur Versuchsreihe 1 in Abbildung 6.3 wurden ein minimaler Drehmomentwert von $M_{min} = 736 \text{ Nm}$ und ein maximales Drehmoment von $M_{max} = 1009 \text{ Nm}$ gemessen. Es ergibt sich folglich ein maximaler Unterschied von $\Delta \bar{M} = 273 \text{ Nm}$ bei einem arithmetisch ermittelten mittleren Drehmoment von $M = 847 \text{ Nm}$. Dies bedeutet eine maximale Abweichung der Antriebsleistung von 32 %.

Das am Beispiel der ersten Versuchsreihe beschriebene Vorgehen zur Messung der Antriebsleistungen während der einzelnen Versuchsdurchläufe wurde bei allen experimentell durchgeführten Parametervariationen identisch durchgeführt. Die Ergebnisse der Auswertung aller Versuchsdurchläufe sämtlicher Parametervariationen werden in Abbildung 6.4 in Form eines Boxplot-Diagramms aus dem Bereich der deskriptiven Statistik [Cle08] dargestellt.

Jede der sechs einzelnen Boxen der Abbildung 6.4 stellt die Messergebnisse aller Versuchsdurchläufe einer Versuchsreihe zusammenfassend dar. Die untere bzw. obere horizontale Linie eines einzelnen Boxplots verweist auf das minimal bzw. maximal gemessene Antriebsmoment der jeweiligen Versuchsreihe und bildet die untere bzw. obere Grenze der entsprechenden Darstellung. Die zwischen diesen Begrenzungen mit vertikalen Strichen verbundenen Rechtecke beschreiben das untere und obere Quantil der Messwerte.

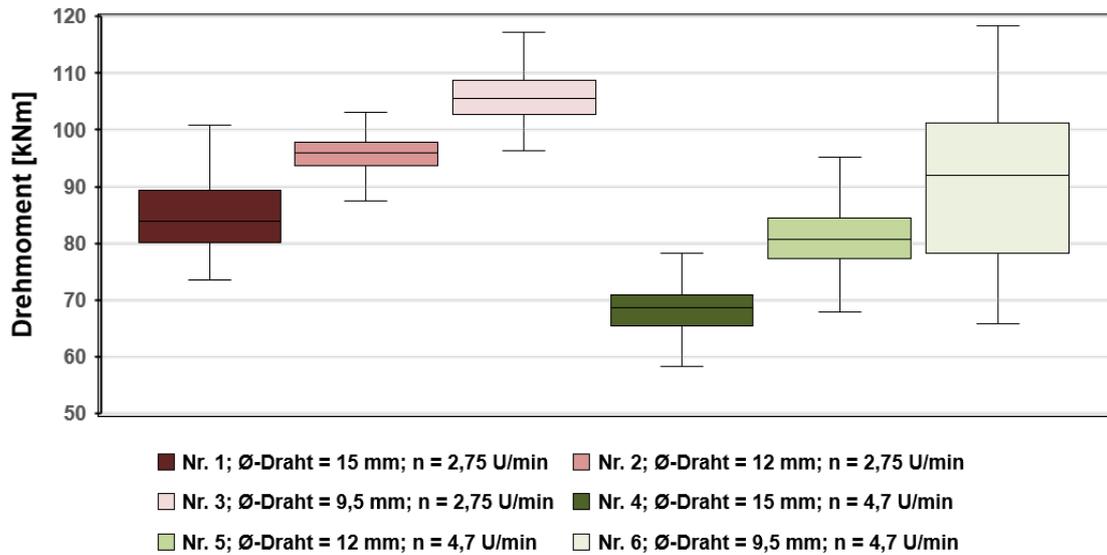
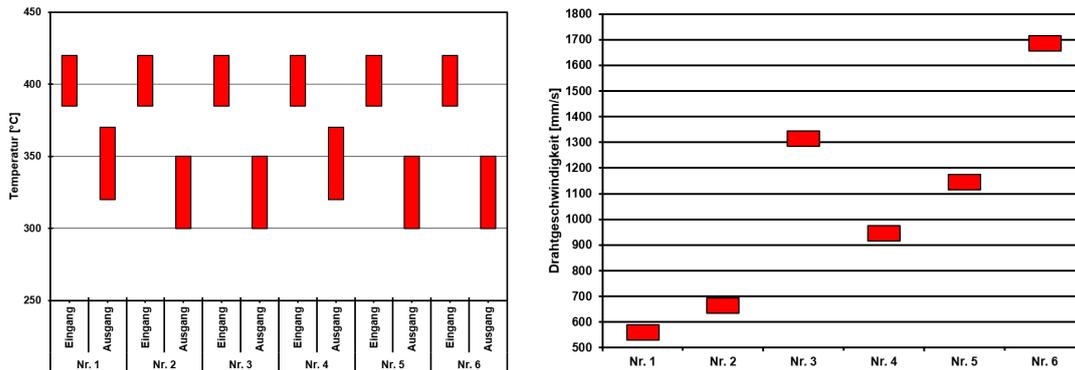


Abbildung 6.4: Darstellung aller gemessenen Drehmomente der experimentellen Anlagenversuche als Boxplot-Diagramm [Cle08]

Das untere Quantil steht für die kleinsten 25 % der gemessenen Antriebsmomente, das obere Quantil zeigt entsprechend die 25 % der größten gemessenen Werte. Der innerhalb der Boxen dargestellte Trennstrich stellt den Median der entsprechenden Messreihe dar. Von den gemessenen Antriebsmomenten einer Versuchsreihe sind 50 % der Werte kleiner oder gleich diesem Kennwert. Bezogen auf den vollständigen Umfang der experimentellen Versuchsreihe lag das erforderliche Anlagendrehmoment zwischen 583 Nm im Minimum und 1246 Nm als Belastungsspitze. Im arithmetischen Mittel wurden 878 Nm während der Umformung der Probenstücke als Antriebslast über Arbeitswalzen auf die Versuchsanlage übertragen.

Während der experimentellen Versuchsdurchführung wurden die Temperaturen und die Geschwindigkeiten der aus der Anlage herauskommenden Drähte erfasst. Die Abbildung 6.5 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen. Die Teildarstellung 6.5a gibt stichprobenartig gemessene Ein- und Ausgangstemperaturen der Versuchsstücke wieder. Als Ursache für die unvollständigen und im Spektrum breit wirkenden Ergebnisse kann zum einen die Verfügbarkeit von nur einem Kontaktthermometer sowie zum anderen die als schwierig zu bezeichnende Durchführung der Kontaktmessung des austretenden Drahtes angeführt werden. Bei den Ergebnissen der in Teildarstellung 6.5b illustrierten Geschwindigkeiten der austretenden Drähte ist die Art der Messung bei der Bewertung der Ergebnisqualität zu berücksichtigen. Auf der Grundlage der gemessenen Durchlaufzeit eines Probestückes, der bekannten Probenlänge von 920 mm und des jeweiligen Drahtquerschnittes der verbauten Matrize wurden die Geschwindigkeiten errechnet.



(a) Gemessene Ein- und Ausgangstemperaturen der Probenstücke (b) Gemessene Geschwindigkeiten der austretenden Drähte

Abbildung 6.5: Gemessene Ein- und Ausgangstemperaturen (a) und Drahtaustrittsgeschwindigkeiten (b) der Anlagenversuche:

- Nr. 1: $\varnothing_{\text{Draht}} = 15 \text{ mm}; n = 2,75 \text{ U/min}$
 Nr. 2: $\varnothing_{\text{Draht}} = 12 \text{ mm}; n = 2,75 \text{ U/min}$
 Nr. 3: $\varnothing_{\text{Draht}} = 9,5 \text{ mm}; n = 2,75 \text{ U/min}$
 Nr. 4: $\varnothing_{\text{Draht}} = 15 \text{ mm}; n = 4,7 \text{ U/min}$
 Nr. 5: $\varnothing_{\text{Draht}} = 12 \text{ mm}; n = 4,7 \text{ U/min}$
 Nr. 6: $\varnothing_{\text{Draht}} = 9,5 \text{ mm}; n = 4,7 \text{ U/min}$

Die Tabelle 6.1 fasst alle Ergebnisse der experimentellen Versuchsreihe zum kombinierten Walz- und Strangpressverfahren zusammen. Die Messung der Drehmomente während der Versuchsdurchführung ist im Vergleich zur Erfassung der Ein- und Ausgangstemperaturen und der Drahtaustrittsgeschwindigkeiten als deutlich belastbarer zu bezeichnen. Weiterführende Betrachtungen und Vergleiche der Ergebnisse aus Abbildung 6.5 sind nur unter den beschriebenen Einschränkungen zulässig.

Tabelle 6.1: Zusammenfassung der Ergebnisse der experimentellen Anlagenversuche

Versuch			Ergebnisse						
Nr.	$\varnothing_{\text{Draht}}$	n	\bar{v}_0	\bar{v}_3	T₀		T₃		\bar{M}
					min	max	min	max	
	mm	U/min	m/min	m/s	°C	°C	°C	°C	kNm
1	15	2,75	3,1	0,56	385	420	320	370	84
2	12	2,75	3,3	0,65	385	420	300	350	95
3	9,5	2,75	2,8	1,3	385	420	300	350	108
4	15	4,7	5,3	0,93	385	420	320	370	68
5	12	4,7	5,0	1,13	385	420	300	350	81
6	9,5	4,7	4,7	1,67	385	420	300	350	95

6.1.3 Errechnete Prozessgrößen der simulierten Versuche

Die experimentell durchgeführten Versuche zum kombinierten Walzen und Strangpressen wurden mit numerischen Simulationsmodellen entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 5.2 nachgebildet. Neben den gemessenen Prozessgrößen, welche in Abschnitt 6.1.2 beschrieben wurden, werden bei der numerischen Umformsimulation diverse weitere globale sowie örtlich und zeitlich aufgelöste Ergebnisgrößen erzeugt. Nachfolgend werden dieselben Ergebnisse dargestellt, die auch bei den experimentellen Versuchen aufgenommen wurden. Weiterführende errechnete makroskopische Prozessgrößen sowie örtlich und zeitlich aufgelöste Ergebnisgrößen werden ergänzend vorgestellt.

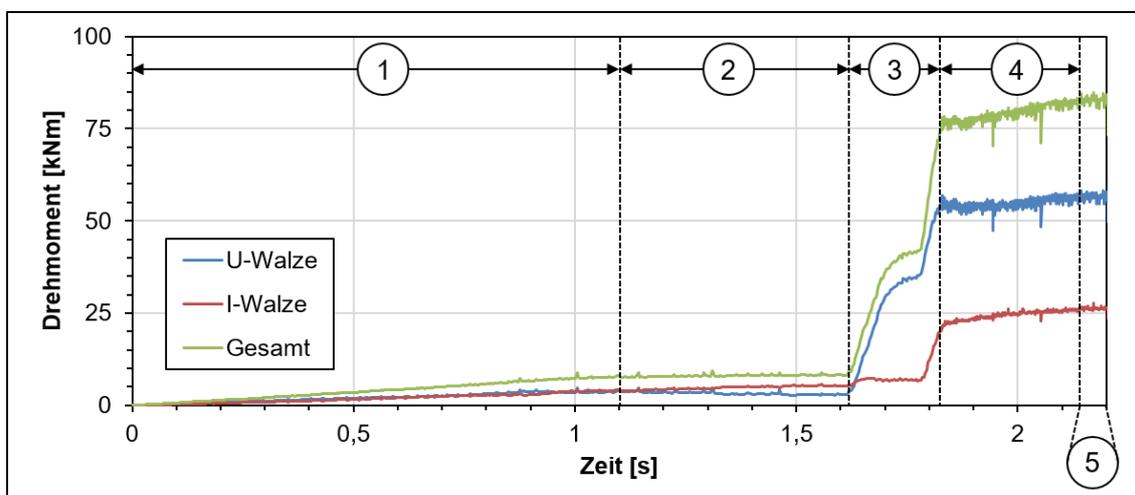


Abbildung 6.6: Simulierte Drehmomentverläufe der Arbeitswalzen und deren Einteilung in prozesstypische Bereiche am Beispiel der Variante 1 der Anlagenversuche

Der simulierte Verlauf der Antriebsmomente der einzelnen Arbeitswalzen wird am Beispiel der ersten Variante der experimentellen Anlagenversuche in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Kurvenverläufe der U-Walze (blau) und der I-Walze (rot) sind charakteristisch für den kombinierten Walz- und Strangpressprozess. In Grün wird der summierte Drehmomentverlauf beider Walzen dargestellt. Die U-Walze trägt im Vergleich zur I-Walze einen signifikant höheren Anteil zum Gesamtmoment bei. Als Ursache hierfür ist die größere Kontaktfläche zwischen der U-Walze und dem Werkstück zu nennen. Zusätzlich zum Walzenrund sind bei der U-Walze beide Walzenflanken mit dem Werkstück in Kontakt. Für die Schwankungen im Verlauf der berechneten Ergebnisgröße sind zwei wesentliche Ursachen anzuführen. Zum einen beeinflusst der diskrete Charakter des sich bewegenden Untersuchungsgegenstandes den unsteten Verlauf, zum anderen wirkt sich die Übertragung der Ergebnisse bei der Neuvernetzung des Werkstückes während der Simulation aufgrund der hohen auftretenden Verformung negativ auf diesen Effekt aus.

Der erste Bereich der Drehmomententwicklung in Abbildung 6.6 reicht vom Beginn der Simulation bis etwa 1,1 Sekunden nach Simulationsstart. In dieser Phase wird das Walzgut in den Walzspalt gezogen. Hat das Walzgut den Walzspalt passiert, bleibt das Drehmoment im zweiten Bereich von Sekunde 1,1 bis etwa Sekunde 1,6 konstant. In dieser Zeit bewegt sich die Spitze des gewalzten Werkstücks auf die Matrizenstirnseite zu. Sobald das Werkstück bei Sekunde 1,6 auf die Matrizenstirnseite trifft, beginnt der dritte typische Bereich der errechneten Kurvenverläufe. Es kommt zu einem signifikanten Anstieg des erforderlichen Antriebsmomentes bis etwa Sekunde 1,8. In dieser Zeit füllt sich die Umformkammer zwischen Walzspalt und Matrizenstirnseite mit dem Werkstückmaterial. Sobald die gesamte Umformkammer mit Material ausgefüllt ist, wird dieses entsprechend der Kontur der Matrizenöffnung verpresst. Es beginnt der vierte Bereich. Im angeführten Beispiel der Darstellung 6.6 reicht der vierte Bereich in etwa von Sekunde 1,8 bis 2,1. In diesem Bereich produziert die Anlage bereits, hat jedoch noch keinen stationären Zustand erreicht. Erst im fünften Bereich, der in etwa von Sekunde 2,1 bis 2,2 reicht, bleibt das Drehmoment in der Simulation konstant. Die Simulation befindet sich in diesem Bereich in einem stationären Zustand.

Nachfolgend wird der nach Abbildung 6.6 in Bereich 3 auftretende Anstieg des Drehmomentes bei vollständig gefüllter Umformkammer begründet. Hierzu wird die Entwicklung der Temperaturverteilung innerhalb des Werkstückes in den Abbildungen 6.7 bis 6.9 und anschließend die Auswirkung dieser Entwicklung auf die Vergleichsspannung in den Abbildungen 6.10 bis 6.12 dargestellt.

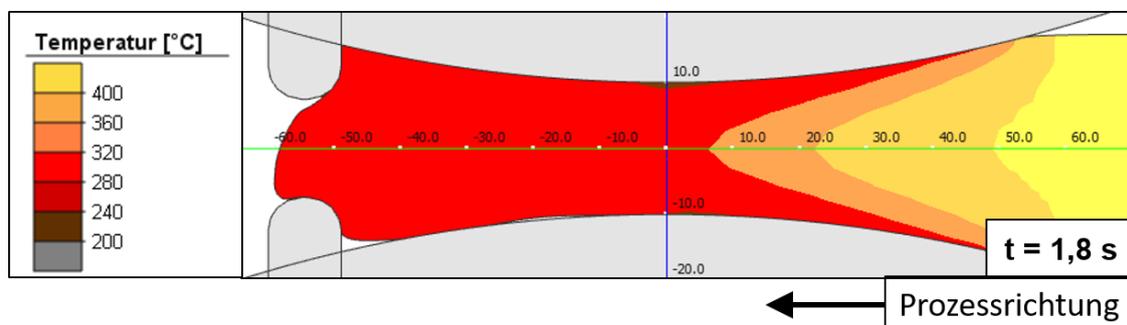


Abbildung 6.7: Temperaturverteilung innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 1,8 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1

Die Abbildung 6.7 zeigt die Temperaturverteilung innerhalb des Werkstückes der simulierten Versuchsvariante 1 im mittigen Längsschnitt bei der Prozesszeit von 1,8 Sekunden. Die Umformkammer der Anlagen ist nahezu vollständig mit Material gefüllt und das Produkt beginnt sich in der Matrizenöffnung zu formen. Die Temperatur des einlaufenden Werkstücks beträgt $420 \text{ }^\circ\text{C}$ über die gesamte Höhe. Die Temperatur der Walzen liegt mit $150 \text{ }^\circ\text{C}$ deutlich darunter und wird während der Simulation als unveränderlich angenommen. Sobald das Werkstück mit den Arbeitswalzen in Kontakt tritt, fließt

Wärme aus dem Werkstück in die Arbeitswalzen. Vom Kontaktbeginn bis zum Walzspalt sinkt die Temperatur im Kern des Werkstücks kontinuierlich. Die Temperaturgrenze von $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ nach der dargestellten Legende wird noch 10 mm vor dem Walzspalt erreicht. Die Temperaturgrenze von $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird bei einem Abstand von etwas über 20 mm zum Walzspalt unterschritten. Nach dem Walzspalt liegt die Temperatur im Werkstück fast vollständig zwischen $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $320\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lediglich in der Region um den Walzspalt fällt die Temperatur im Kontaktbereich auf unter $240\text{ }^{\circ}\text{C}$.

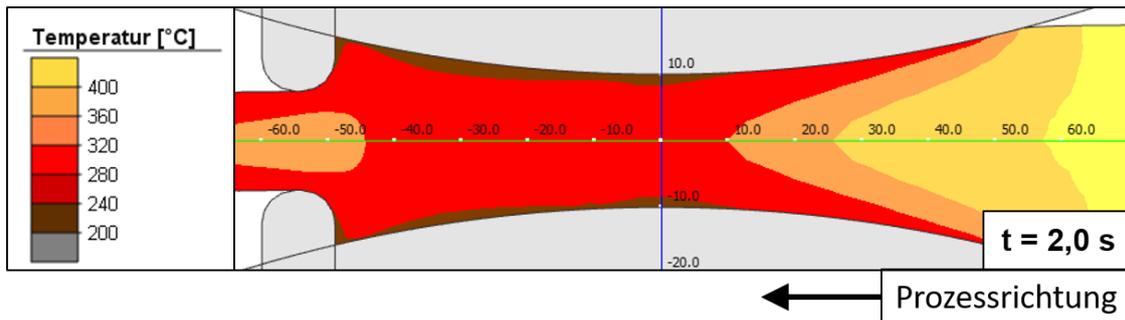


Abbildung 6.8: Temperaturverteilung innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei $2,0\text{ s}$ Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1

Darstellung 6.8 zeigt die Temperaturverteilung der gleichen Simulation nur $0,2$ Sekunden später. Die Umformkammer ist vollständig gefüllt und das Produkt wird erzeugt. Die Temperaturgrenzen im Kern des Werkstückes bewegen sich weiter in Richtung der Einlaufseite der Umformkammer. Die Temperaturgrenze von $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt bei einem Abstand von etwa 10 mm zum Walzspalt. Die Temperaturgrenze von $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird bei einem Abstand von etwa 25 mm zum Walzspalt unterschritten. Hinter dem Walzspalt fällt die Temperatur im Kontaktbereich zwischen Werkstück und Walzen auf unter $240\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kurz vor der Matrizenöffnung steigt die Kerntemperatur des Walzgutes auf über $320\text{ }^{\circ}\text{C}$. Grund hierfür ist die Erwärmung des Werkstückes durch die Umformung.

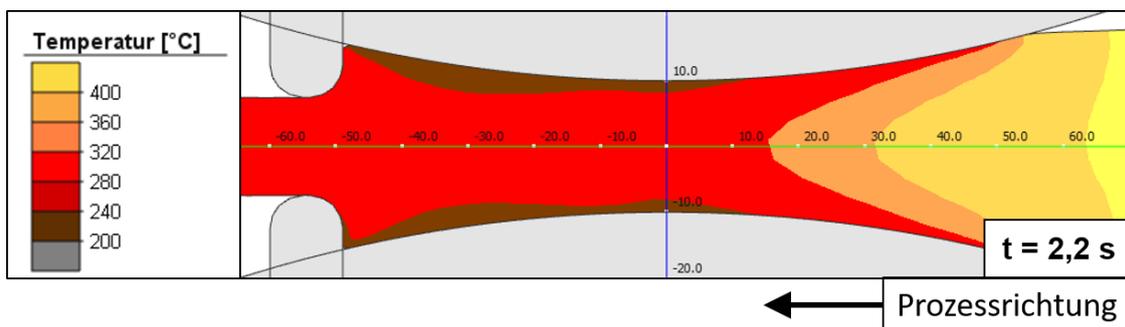


Abbildung 6.9: Temperaturverteilung innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei $2,2\text{ s}$ Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1

Die Temperaturverteilung im stationären Zustand bei Sekunde 2,2 wird in Abbildung 6.9 dargestellt. Die Temperaturgrenzen im Walzspalteinlauf haben sich weiter vom Walzspalt weg bewegt. Die Grenze von $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt bei etwa 15 mm Abstand zum Walzspalt. Die Temperaturgrenze von $360\text{ }^{\circ}\text{C}$ weist bereits über 30 mm Abstand zum Walzspalt auf. In dem Bereich zwischen Walzspalt und Matrizenstirnseite hat sich der Randbereich des Werkstückes mit einem Temperaturniveau unter $240\text{ }^{\circ}\text{C}$ deutlich vergrößert. Die weiter über die Matrize und die Walzen abfließende Wärme hat die Kerntemperatur des Werkstückes im Bereich der Matrizenöffnung wieder unter $320\text{ }^{\circ}\text{C}$ sinken lassen.

Die Abbildungen 6.10 bis 6.12 zeigen die Vergleichsspannungsverteilungen nach von Mises im mittigen Längsschnitt des Werkstücks zu den gleichen Prozesszeiten, die bei den zuvor präsentierten Temperaturverteilungen in den Abbildungen 6.7 bis 6.9 vorlagen.

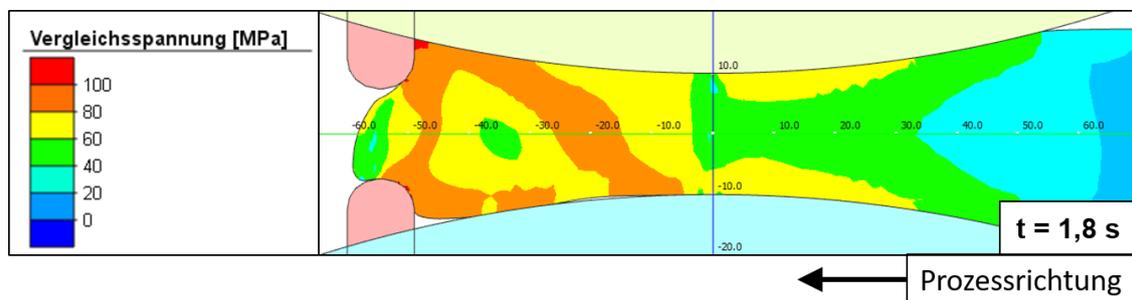


Abbildung 6.10: Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei $1,8\text{ s}$ Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1

Abbildung 6.10 zeigt die Vergleichsspannungsverteilung der Simulation der ersten Versuchsvariante im mittigen Längsschnitt bei einer Prozesszeit von $1,8\text{ Sekunden}$. In der Kernfaser der Einlaufseite liegt die Vergleichsspannung vom Walzspalt aus durchgängig unterhalb von 60 MPa . Die Grenze zu 40 MPa wird bei einem Abstand von weniger als 35 mm unterschritten. Der Randbereich mit einer Vergleichsspannung von über 60 MPa ist relativ schwach ausgeprägt. Der noch nicht vollständig mit Werkstoff befüllte Bereich zwischen Walzspalt und Matrizenstirnseite hat überwiegend ein Spannungsniveau zwischen 60 MPa und 80 MPa . Mittig in der Spreizkammer ist bei einem Abstand von etwa 40 mm zum Walzspalt ein vergleichsweise weicher Kern mit einer Vergleichsspannung kleiner 60 MPa erkennbar.

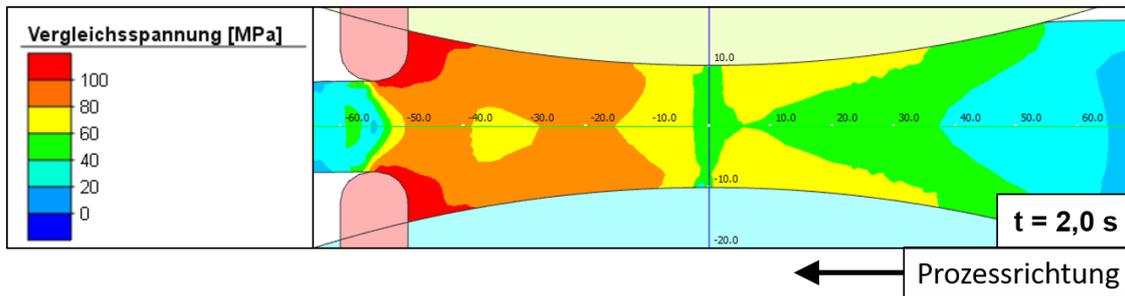


Abbildung 6.11: Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 2,0 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1

Das Vergleichsspannungsniveau bei einer Prozesszeit von 2 Sekunden, dargestellt in Abbildung 6.11, ist erkennbar gestiegen. Die Kernfaser der Einlaufseite der Umformkammer liegt zwar weiterhin unterhalb von 60 MPa, die Randschicht mit über 60 MPa hat sich jedoch deutlich vergrößert und ist kurz vor dem Walzspalt fast bis zur Kernfaser durchgedrungen. Die Grenze zu 40 MPa in der Kernfaser hat sich mit einem Abstand von über 35 mm weiter vom Walzspalt entfernt. Der Bereich der Umformkammer zwischen Walzspalt und Stirnseite der Matrize zeigt ein deutlich gestiegenes Vergleichsspannungsniveau. Größtenteils liegt es bei über 80 MPa. Der weichere Kern in diesem Bereich ist weiterhin erkennbar. Sein Niveau ist auf über 60 MPa gestiegen. Im Kontaktbereich zur Matrize steigt die Vergleichsspannung auf über 100 MPa.

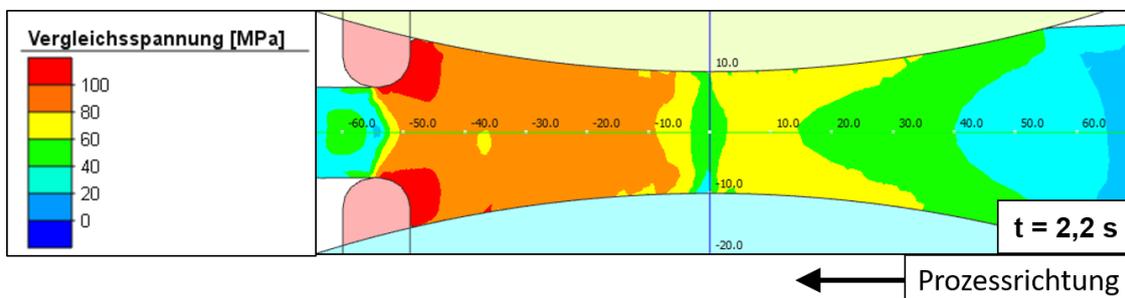


Abbildung 6.12: Vergleichsspannungsverteilung nach von Mises innerhalb der vertikalen Schnittfläche bei 2,2 s Prozessfortschritt der Versuchsvariante 1

Abbildung 6.12 zeigt die Verteilung der Vergleichsspannung im stationären Zustand der Umformsimulation bei einer Prozesszeit von 2,2 Sekunden. Das Gesamtniveau ist weiter gestiegen. Die Randzone mit über 60 MPa ist bis zur Kernfaser im Einlaufbereich der Umformkammer durchgedrungen. Die Grenze von 40 MPa hat sich mit einem Abstand von 40 mm weiter vom Walzspalt entfernt. Im Bereich zwischen Matrize und Walzspalt ist das Spannungsniveau nahezu vollständig auf über 80 MPa gestiegen. Nur in der Nähe des Walzspalts ist das Niveau mit unter 80 MPa niedriger und im Kontaktbereich

zur Matrize mit über 100 MPa höher. Der zuvor deutlich erkennbare weichere Kern in diesem Bereich der Umformkammer ist nahezu vollständig verschwunden.

Die angeführten Gegenüberstellungen der Temperatur- und Spannungsverteilungen in den mittigen Längsschnitten der Simulationen der Versuchsvariante 1 zeigen die Ursache der weiteren Erhöhung des Drehmomentes im Bereich 3 des Verlaufs nach Darstellung 6.6. Durch die Abgabe von Wärme an die Arbeitswalzen sinkt die Temperatur des Werkstücks innerhalb der Umformkammer. Besonders stark ist dieser Effekt im Rand- bzw. Kontaktbereich zwischen Werkstück und Walzen erkennbar. Dieser Temperaturabfall hat zur Folge, dass die Vergleichsspannungsverteilung im Werkstück deutlich ansteigt. Grund hierfür ist der mit sinkender Temperatur zunehmende Formänderungswiderstand des Werkstückwerkstoffes.

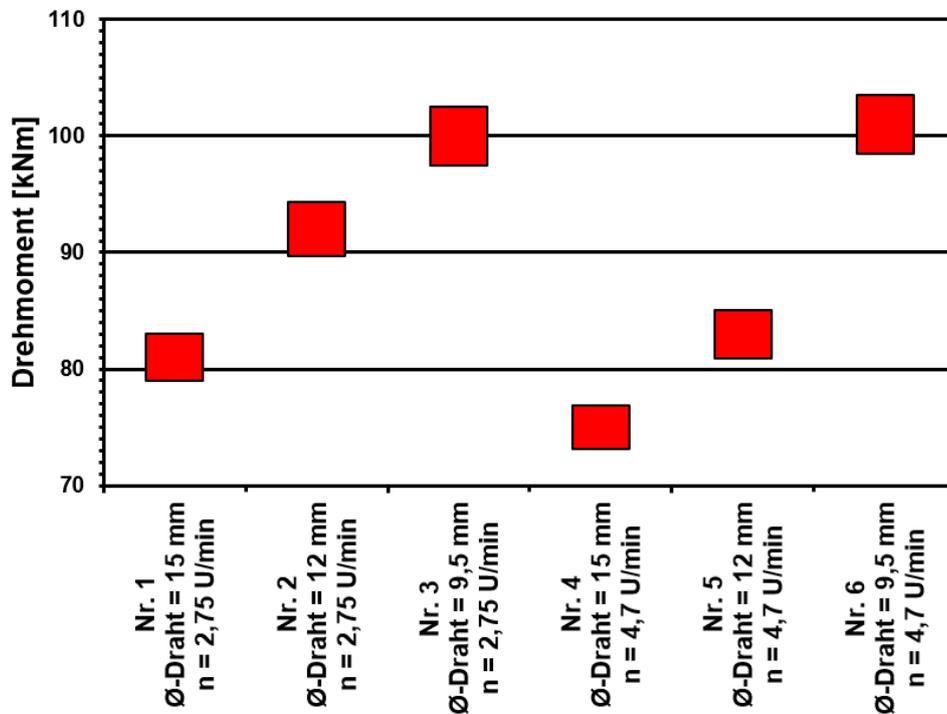


Abbildung 6.13: Simulierte Drehmomente zu den Anlagenversuchen unter der Annahme von Haftreibung

Die mittels Umformsimulation errechneten Drehmomente zu den Anlagenversuchen unter der Annahme von Haftreibung zwischen Werkstück und Werkzeugen werden in Abbildung 6.13 dargestellt. Um die Schwankungen im Verlauf der errechneten Drehmomente bei den weiteren Auswertungen und Vergleichen zu berücksichtigen, wird ein Drehmomentbereich angegeben. Dem arithmetischen Mittelwert des ausgewerteten stationären Bereiches der Simulation werden 5 % hinzugefügt und abgezogen.

Die Simulation der ersten Versuchsvariante ergab ein Drehmoment von 81 kNm bei einem Drahtdurchmesser von 15 mm und einer Drehzahl von $2,75 \frac{U}{min}$. Mit abnehmendem Drahtdurchmesser steigt das errechnete Drehmoment bei gleich bleibender Drehzahl bis auf 100 kNm bei einem Drahtdurchmesser von $9,5 \text{ mm}$ in Versuch 3. Der Vergleich der Drehmomente von Versuch 1 und Versuch 4 zeigt, dass bei gleich bleibendem Drahtdurchmesser und einer Zunahme der Drehgeschwindigkeit der Walzen das erforderliche Drehmoment zur Herstellung des Drahtes sinkt. Die gleiche Tendenz ist bei dem Vergleich der Versuche 2 und 4 zu erkennen. Einzig der Vergleich der Versuchsvarianten mit dem Drahtdurchmesser von $9,5 \text{ mm}$ zeigt eine gegensätzliche Tendenz.

Die Teildarstellung 6.14a der Abbildung 6.14 zeigt die simulierten Ausgangstemperaturen der einzelnen Versuchsvarianten. Um möglichst mit den experimentellen Versuchen vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurde die Drahtaustrittstemperatur der Simulation ebenfalls an der Drahtoberfläche ausgewertet. Die geringste Austrittstemperatur von 305 °C liegt bei der ersten Versuchsvariante vor. Mit kleiner werdendem Drahtdurchmesser und mit steigender Drehzahl der Arbeitswalzen steigt die Drahtaustrittstemperatur. Sie liegt immer unterhalb der vorgegebenen Einlauf­temperatur des Werkstückes.

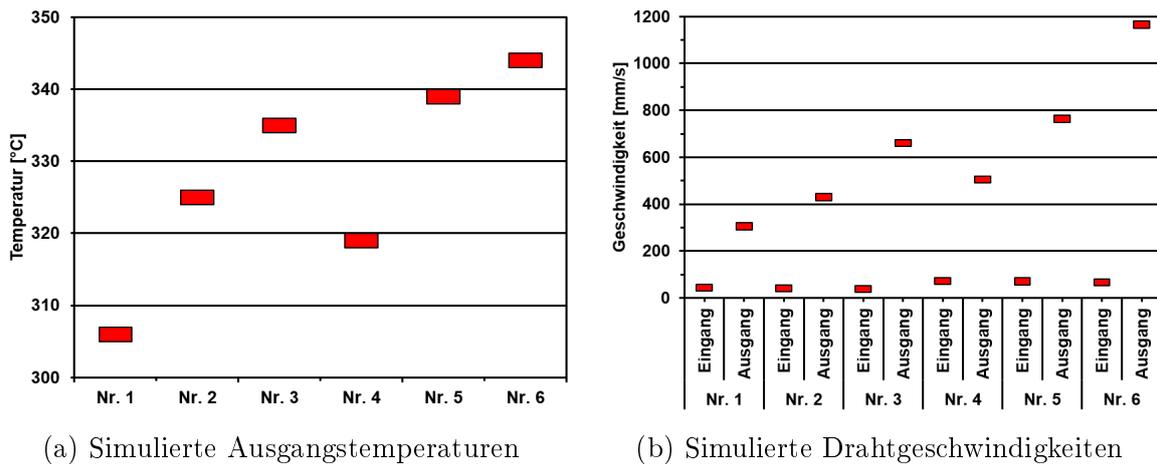


Abbildung 6.14: Übersicht der simulierten Drahtaustrittstemperaturen (a) und der Ein- und Auslaufgeschwindigkeiten (b) der Anlagenversuche:

Nr. 1: $\varnothing_{\text{Draht}} = 15 \text{ mm}; n = 2,75 \text{ U/min}$

Nr. 2: $\varnothing_{\text{Draht}} = 12 \text{ mm}; n = 2,75 \text{ U/min}$

Nr. 3: $\varnothing_{\text{Draht}} = 9,5 \text{ mm}; n = 2,75 \text{ U/min}$

Nr. 4: $\varnothing_{\text{Draht}} = 15 \text{ mm}; n = 4,7 \text{ U/min}$

Nr. 5: $\varnothing_{\text{Draht}} = 12 \text{ mm}; n = 4,7 \text{ U/min}$

Nr. 6: $\varnothing_{\text{Draht}} = 9,5 \text{ mm}; n = 4,7 \text{ U/min}$

Die Teildarstellung 6.14b zeigt die simulierten Ein- und Austrittsgeschwindigkeiten des Werkstückes. Mit kleiner werdendem Drahtdurchmesser und mit einer Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der Walzen ist eine Zunahme der Drahtaustrittsgeschwindigkeit

erkennbar. Gleichzeitig ist eine leichte Abnahme der Einlaufgeschwindigkeit des Werkstückes bei kleiner werdenden Drahtdurchmessern und gleich bleibender Rotationsgeschwindigkeit zu erkennen.

Tabelle 6.2: Zusammenfassung der Ergebnisse der simulierten Anlagenversuche

Versuch			Ergebnisse				
Nr.	\varnothing Draht	n	\bar{v}_0	\bar{v}_3	T_0	T_3	\bar{M}
	mm	U/min	m/min	m/s	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	kNm
1	15	2,75	2,64	0,31	402,5	305	81
2	12	2,75	2,46	0,43	402,5	324	92
3	9,5	2,75	2,28	0,66	402,5	334	100
4	15	4,7	4,32	0,51	402,5	318	75
5	12	4,7	4,20	0,76	402,5	338	83
6	9,5	4,7	4,02	1,17	402,5	343	101

Die Tabelle 6.2 fasst die vorgestellten Simulationsergebnisse zusammen. Die Temperatur T_0 wird der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Sie ist keine Ergebnisgröße und wird als Randbedingung der Simulation vorgegeben. Die Temperatur $402,5^{\circ}C$ ist der Mittelwert der gemessenen Ein- und Ausgangstemperaturen der Anlagenversuche aus Tabelle 6.1.

6.1.4 Kontaktsituation der simulierten Versuche bei Haftreibung

Die Abbildung 6.15 zeigt beispielhaft die sich einstellende Kontaktsituation zwischen dem Werkstück und den Arbeitswalzen aus den vier unterschiedlichen Ansichten von oben, unten, links und rechts. Die rot eingefärbten Bereiche des Werkstücks sind im Kontakt mit den Arbeitswalzen. Die blau dargestellten Bereiche haben keinen Kontakt. Bei allen rot eingefärbten Elementen wird in der Simulation Haftreibung angenommen.

Die Teildarstellung A der Ansicht zeigt die Kontaktsituation des Werkstückes von oben. Der obere Teil ist mit der U-Walze der Anlage in Kontakt. Der von Links einlaufende Gussstrang breitet im ersten Bereich der Darstellung bis die Querschnittsfläche des Gussprofils der Querschnittsfläche der Umformkammer entspricht. In diesem Bereich der Breitung ist an den Rändern des Werkstücks ein verbleibender blauer Streifen zu erkennen. Das Werkstück hat in diesem Bereich keinen Kontakt zu den Walzen. Nach der Breitung des Materials bis hin zum Walzspalt nimmt der Kontakt in den Randbereichen zu. Hinter dem Walzspalt bis zum halben Weg zur Matrice ist eine geringfügige Abnahme der Kontaktsituation im Randbereich zu erkennen. Kurz vor der Matrice bis zur Matrizenstirnseite nimmt der Kontakt zu. Der mittlere Teil des Werkstücks ist durchgängig mit den Walzen in Kontakt.

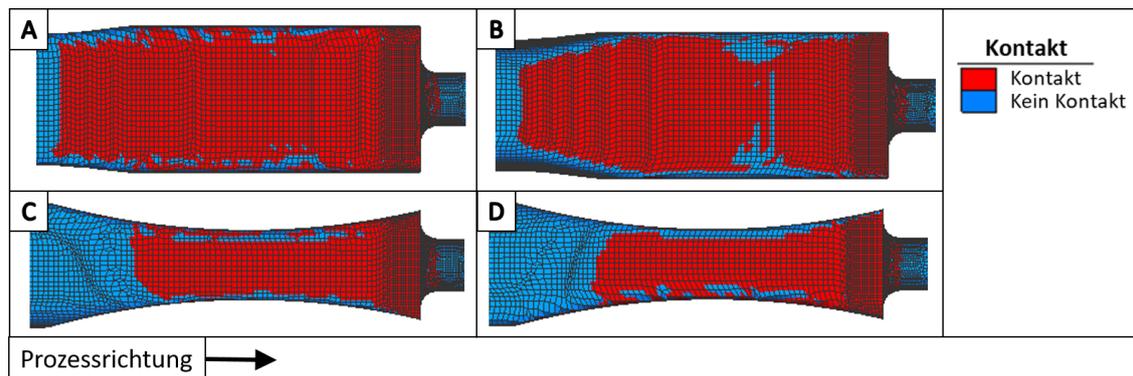


Abbildung 6.15: Kontaktsituation bei der Simulation der Anlagenversuche:

- A = Ansicht von oben
- B = Ansicht von unten
- C = Ansicht von rechts
- D = Ansicht von links

In der Teildarstellung B wird der Werkstückkontakt von unten dargestellt. Der untere Teil des Werkstücks ist mit der I-Walze der Anlage in Kontakt. Wie in Teildarstellung A kann im Einlaufteil die Breitung des Materials erkannt werden. Der nicht mit den Walzen in Kontakt stehende Randbereich ist vergleichsweise stärker ausgeprägt. Grund ist die Geometrie des Gussstrangs, welche an der Unterseite schmaler ist. Nach der Breitung des Materials bis hin zum Walzspalt verbleibt ein schmaler Rand, der nicht in Kontakt zu den Arbeitswalzen steht. Hinter dem Walzspalt ändert sich die Kontaktsituation dramatisch. Das Werkstück verliert vom Randbereich, fast bis in die Werkstückmitte den Kontakt zu den Arbeitswalzen. Ab etwa der halben Strecke bis zur Matrizenstirnseite nimmt der Werkstückkontakt im Randbereich wieder zu.

Die beiden Teildarstellungen C und D zeigen die zuvor beschriebene Situation aus der rechten bzw. linken Ansicht. Während die obere und die untere Seite des Gussprofils bereits mit den Walzen in Kontakt stehen, müssen die Flanken zunächst soweit breiten, wie es die Arbeitswalzenflanken zulassen. Aufgrund der nicht horizontalen sondern schrägen Ausrichtung der Gussprofilseiten, tritt zunächst deren oberer Teil mit den Walzen in Kontakt. In Prozessrichtung nimmt der Kontakt nach unten hin zu. Korrespondierend mit den Teildarstellungen A und B sind an den Rändern Bereiche zu erkennen, die keinen Kontakt zu den Werkzeugen aufweisen. Kurz vor der Matrizenstirnseite wird dieser Randbereich deutlich geringer.

6.2 Ergebnisse der axialen Reibversuche

6.2.1 Gemessene Reibspannungen der experimentellen Versuche

Die Abbildung 6.16 zeigt alle gemessenen Reibspannungen der nach Tabelle 5.7 durchgeführten axialen Reibtestvarianten unterteilt nach Versuchstemperatur und Versuchsgeschwindigkeit.

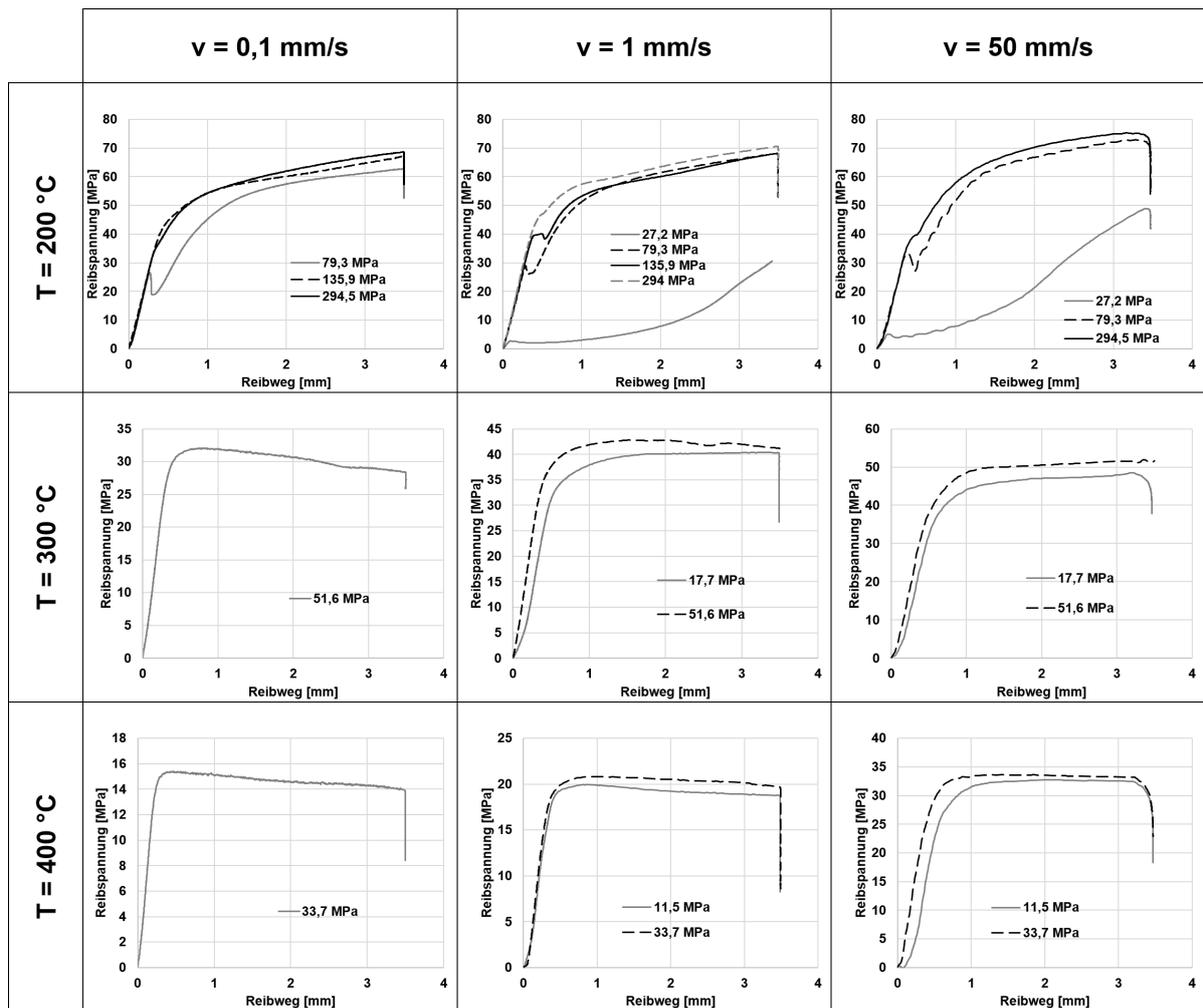


Abbildung 6.16: Gemessene Reibspannungen der axialen Reibversuche über den Reibweg

Der anfängliche lineare Anstieg aller gemessenen Kräfte, der etwa auf dem ersten halben Millimeter der Versuchsdurchführungen erkennbar ist, kann auf die elastische Dehnung des Gesamtsystems zurückgeführt werden, welche wiederum aus der starken Adhäsion zwischen den Aluminiumproben und den Stahlzylindern resultiert. Bei den Kraftmessungen zu den Versuchstemperaturen von $200 \text{ }^\circ\text{C}$ folgt auf diesen ersten linearen An-

stieg ein weiterer, flacher ausgeprägter linearer Anstieg. Diese Charakteristik ist auf die zusätzliche Reibung zurückzuführen, welche durch eine sich zunehmend ausbildende Aluminiumhaftschrift entsteht [Mue14].

Darstellung 6.17 stellt die gemessenen Reibspannungen über den Kontaktdruck für die drei verschiedenen Temperaturen zusammenfassend dar. Übertragen wurde diejenige Reibspannung, die bei einem Reibweg von 3 mm in den Diagrammen der Abbildung 6.16 gemessen wurde.

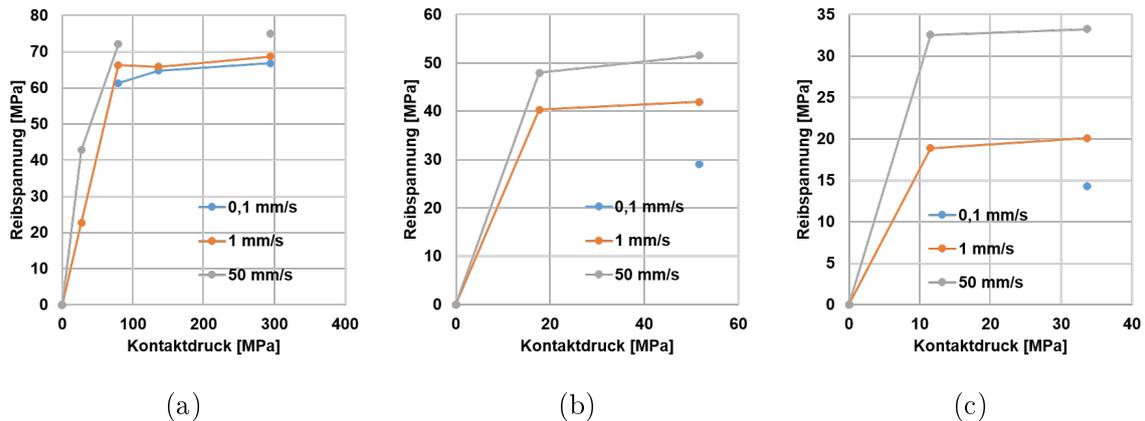


Abbildung 6.17: Zusammenfassung der gemessenen Reibspannungen über dem Kontaktdruck in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit für:

- (a) $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (b) $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$
- (c) $T = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Allen drei Teildarstellungen kann entnommen werden, dass die Reibspannung bei zunehmendem Kontaktdruck ansteigt. Die Höhe der Zunahme nimmt mit steigendem Kontaktdruck ab. Die linke Ergebniszusammenfassung bei $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt eine geringe Abhängigkeit der resultierenden Reibspannung von der Versuchsgeschwindigkeit. Bei dem höchsten Kontaktdruck von $294,5\text{ MPa}$ weicht die gemessene Reibspannung bei der niedrigsten Geschwindigkeit von $0,1\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ mit $66,86\text{ MPa}$ um $10,7\%$ von der höchsten Versuchsgeschwindigkeit $50\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ mit $74,93\text{ MPa}$ ab. Die mittlere Teildarstellung mit den zusammengefassten Ergebnissen der Versuchsreihe bei $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt eine Zunahme der Abhängigkeit der Reibspannung von der Versuchsgeschwindigkeit. Bei dem höchsten Kontaktdruck von $51,6\text{ MPa}$ weicht die gemessene Reibspannung bei der niedrigsten Geschwindigkeit von $0,1\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ mit 29 MPa bereits um $43,7\%$ von der höchsten Versuchsgeschwindigkeit $50\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ mit $51,51\text{ MPa}$ ab. Der Vergleich der Reibspannungen der niedrigsten und höchsten Versuchsgeschwindigkeit der rechten Teildarstellung bei $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ zeigt eine weitere Zunahme der betrachteten Abhängigkeit der Reibspannung von der Versuchsgeschwindigkeit. Beim höchsten Kontaktdruck von $33,7\text{ MPa}$ und bei der Geschwindigkeit von $0,1\frac{\text{mm}}{\text{s}}$ liegt die Reibspannung bei $14,31\text{ MPa}$. Bei gleichem Druck

und einer Geschwindigkeit von $50 \frac{mm}{s}$ wurden $33,26 \text{ MPa}$ Reibspannung gemessen. Somit liegt der Unterschied bei $56,97 \%$.

6.2.2 Ermittelte Reibfaktoren der experimentellen Versuche

Auf der Grundlage der nach den Temperaturen zusammengefassten Reibspannungen wurden die Reibfaktoren nach Tresca für den jeweiligen Versuchsdurchlauf ermittelt. Die Abbildung 6.18 zeigt die resultierenden Reibfaktoren für die einzelnen Versuchsdurchläufe. Zusätzlich ist für jede Versuchstemperatur der nach dem arithmetischen Mittel berechnete Verlauf des Reibfaktors über den Kontaktdruck dargestellt.

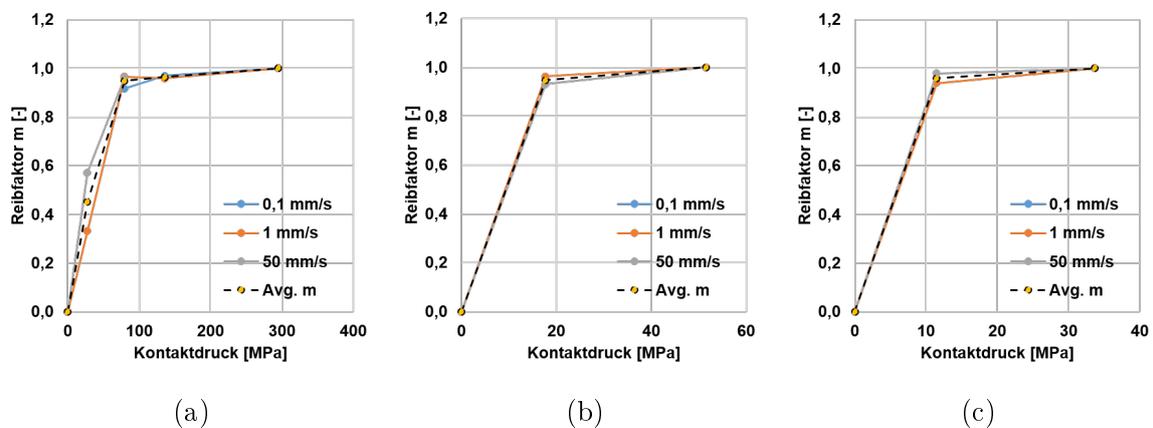


Abbildung 6.18: Berechnete Reibfaktoren über den Kontaktdruck in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit und deren Mittelwert für:

- (a) $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$
- (b) $T = 300 \text{ }^\circ\text{C}$
- (c) $T = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

Zur Bestimmung der einzelnen Reibfaktoren wurde bei jeder Versuchstemperatur und Versuchsgeschwindigkeit die zu jedem Kontaktdruck gemessene Reibspannung durch die jeweils höchste Reibspannung dieser Versuchsreihe dividiert. Dieses Berechnungsverfahren eliminiert die Abhängigkeit des Reibfaktors von der Versuchsgeschwindigkeit.

6.2.3 Mathematische Formulierung der wirkenden Reibung

Auf der Grundlage der experimentell ermittelten Versuchsergebnisse kann eine mathematische Beschreibung der auf die im Prozess wirkende Reibung Einfluss nehmenden Parameter entsprechend den Gleichungen 4.1 und 4.2 bestimmt werden. Die Rechenvorschrift 6.1 stellt die Zusammenhänge der Einfluss nehmenden Parameter und Variablen vollständig dar.

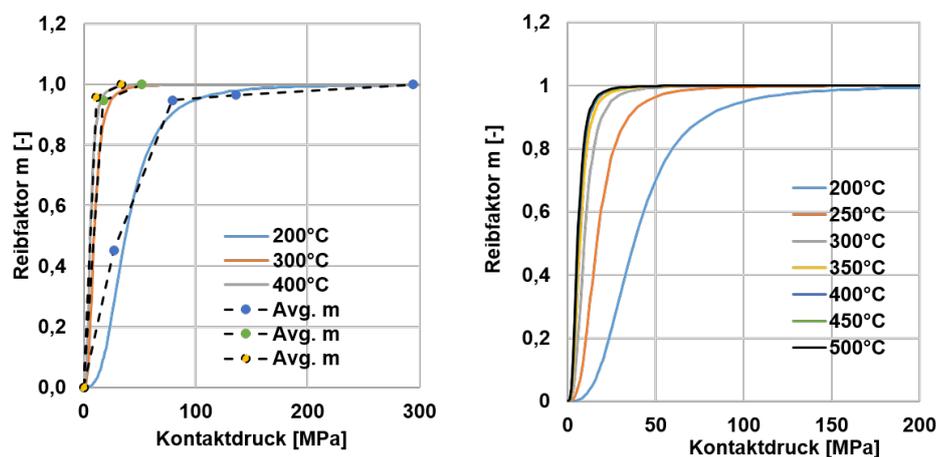
$$m = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{P}{\gamma_0 + a_1 e^{\frac{-T}{a_2}}} \right)^\beta} \quad (6.1)$$

Die Tabelle 6.3 zeigt die Parameter zur Gleichung 6.1 zur Beschreibung der Reibung beim kombinierten Walz- und Strangpressprozess. Zu berücksichtigen ist die untersuchte Reibpaarung bestehend aus Reinaluminium und dem Werkzeugstahl 1.2343.

Tabelle 6.3: Parameter des Reibmodells

Parameter	β	γ_0	a_1	a_2
Wert	3	5,54	2269,65	46,94

Die Darstellung 6.19 stellt die experimentell ermittelten Reibfaktoren und die über das Modell berechneten Reibfaktoren einander gegenüber. Die Teildarstellung 6.19a fasst die gemessenen Reibfaktoren zusammen. Die Teildarstellung 6.19b zeigt die zugehörigen, über das ermittelte Modell berechneten Werte und ergänzende Extrapolationen.



(a) Gemessene Reibfaktoren

(b) Berechnete Reibfaktoren

Abbildung 6.19: Darstellung der gemessenen (a) und berechneten (b) Reibfaktoren in Abhängigkeit von Druck und Temperatur

Der direkte Vergleich der experimentellen Ergebnisse mit denen des ermittelten mathematischen Beschreibungsmodells zeigt eine gute Übereinstimmung. Beide Teildarstellungen ergeben lediglich im geringeren Temperaturbereich von $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ einen bedeutend geringeren Reibfaktor unterhalb eines Kontaktdruckes von 100 MPa . Ab einer Temperatur von $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ bleibt der Reibfaktor sowohl bei den gemessenen Werten als auch im Beschreibungsmodell bereits bei einem Kontaktdruck von unter 20 MPa auf hohem Niveau. Bei einer Temperatur von $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt der Reibfaktor nach dem ermittelten Modell bereits bei 0.99 . Messungen und Modell legen nahe, dass die Kontaktsituation im Umformprozess in einem Großteil des Kontaktbereiches zwischen Werkstück und Werkzeugen als haftend zu bezeichnen ist.

6.2.4 Errechnete Prozessgrößen der simulierten Anlagenversuche unter Verwendung des Reibmodells

Die numerische Nachbildung der experimentell durchgeführten Anlagenversuche in Unterabschnitt 6.1.3 wurde mit dem Reibfaktor $m = 1$ entsprechend der Beschreibung nach Tresca modelliert. Nachfolgend werden die Ergebnisse der wiederholten Umformsimulationen unter Anwendung des zuvor ermittelten Reibmodells vorgestellt. Das Reibmodell wurde über eine in der Programmiersprache Fortran erstellte Subroutine in das numerische Simulationsmodell eingebunden. Die Auswertung der Drehmomente erfolgte identisch zu dem auf Abbildung 6.6 bezogenen Vorgehen. Die nachfolgende Darstellung 6.20 zeigt die resultierenden Drehmomente der Umformsimulation unter Anwendung des Reibmodells.

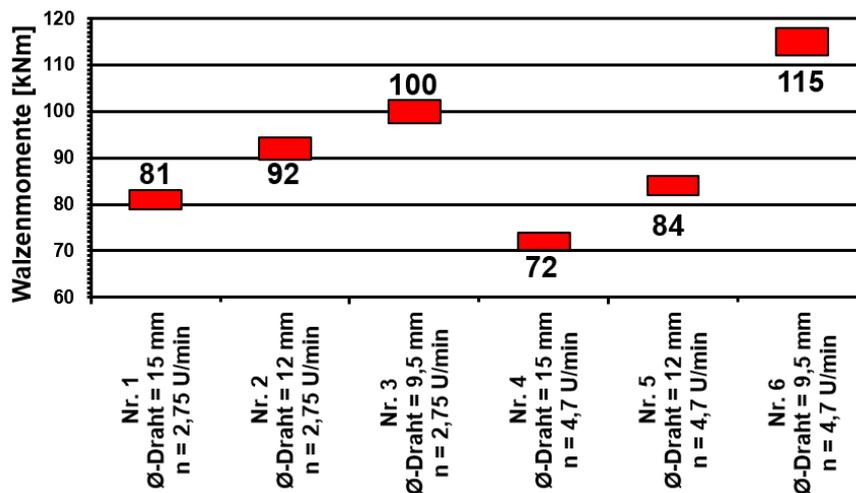
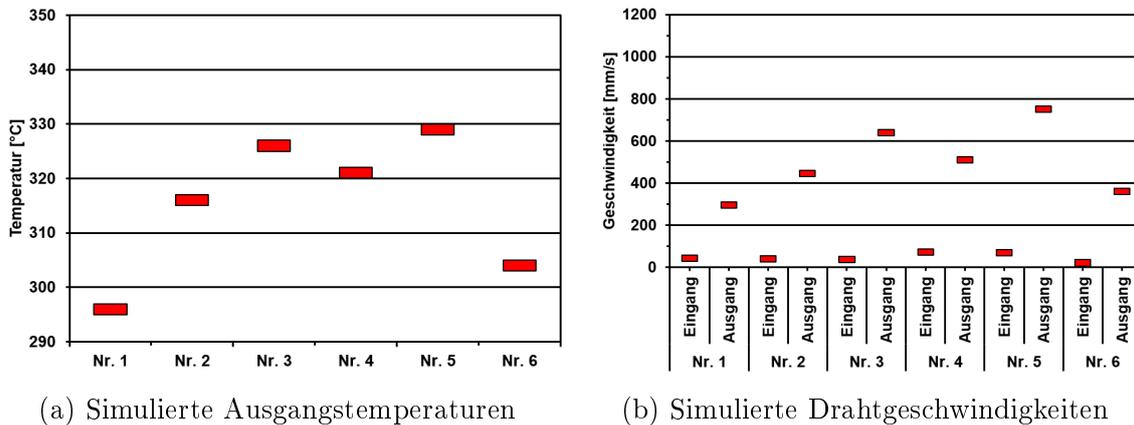


Abbildung 6.20: Übersicht der simulierten Drehmomente der Anlagenversuche unter Verwendung des experimentell ermittelten Reibmodells

Die errechneten Drehmomente zu den experimentell durchgeführten Anlagenversuchen wurden analog zu Abschnitt 6.1.3 ausgewertet und können der Abbildung 6.20 entnommen werden. Dem arithmetischen Mittelwert des ausgewerteten stationären Auswertebereiches wurde auch hier ein Bereich von $\pm 5\%$ hinzugefügt.

Die Berechnung der ersten Versuchsvariante zeigt ein Drehmoment von 81 kNm bei dem größten Drahtdurchmesser von 15 mm . Mit abnehmendem Drahtdurchmesser in den Simulationsvarianten 2 und 3 steigt das berechnete Drehmoment bei gleich bleibender Umfangsgeschwindigkeit der Arbeitswalzen. Das maximal gemessene Drehmoment von 100 kNm wurde bei dem kleinsten Drahtdurchmesser von $9,5\text{ mm}$ berechnet. Auch die Versuchsvarianten 4, 5 und 6 weisen die mit abnehmendem Drahtdurchmesser zunehmende Tendenz bzgl. des Drehmomentes auf. Das bei einer Drehzahl von $4,7\frac{U}{min}$ kleinste errechnete Drehmoment wurde bei einem Drahtdurchmesser von 15 mm errechnet und beträgt 72 kNm . Das mit einem Betrag von 115 kNm größte berechnete Drehmoment wurde bei dem kleinsten Drahtdurchmesser von $9,5\text{ mm}$ ermittelt.



(a) Simulierte Ausgangstemperaturen

(b) Simulierte Drahtgeschwindigkeiten

Abbildung 6.21: Übersicht der simulierten Drahtaustrittstemperaturen (a) und der Ein- und Auslaufgeschwindigkeiten (b) der Anlagenversuche unter Verwendung des Reibmodells:

Nr. 1: $\varnothing_{\text{Draht}} = 15\text{ mm}; n = 2,75\text{ U/min}$

Nr. 2: $\varnothing_{\text{Draht}} = 12\text{ mm}; n = 2,75\text{ U/min}$

Nr. 3: $\varnothing_{\text{Draht}} = 9,5\text{ mm}; n = 2,75\text{ U/min}$

Nr. 4: $\varnothing_{\text{Draht}} = 15\text{ mm}; n = 4,7\text{ U/min}$

Nr. 5: $\varnothing_{\text{Draht}} = 12\text{ mm}; n = 4,7\text{ U/min}$

Nr. 6: $\varnothing_{\text{Draht}} = 9,5\text{ mm}; n = 4,7\text{ U/min}$

Die Teildarstellung 6.21a der Abbildung 6.21 zeigt die simulierten Ausgangstemperaturen der einzelnen Versuchsvarianten unter Anwendung des entwickelten Reibmodells. Um die Temperaturen möglichst ähnlich zum experimentellen Messverfahren in Unterkapitel 6.1.2 zu ermitteln, wird auch hier, wie in Unterabschnitt 6.1.3, bei den Simulationen unter der Annahme von Haftreibung die Drahtaustrittstemperatur an der Oberfläche ermit-

telt. Die geringste Temperatur wurde bei der ersten Versuchsvariante erfasst und beträgt $296\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mit abnehmendem Drahtdurchmesser nimmt die Temperatur des austretenden Drahtes zu; mit steigender Rotationsgeschwindigkeit der Walzen ebenso. Auffallend ist jedoch die von dieser Tendenz stark abweichende Temperatur der Versuchsvariante 6 mit $304\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der austretende Draht war stets kälter als die angenommene Eingangstemperatur von $402,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Die Teildarstellung 6.21b zeigt die simulierten Geschwindigkeiten des Werkstücks am Ein- und Auslauf des Prozesses unter Verwendung des entwickelten Reibmodells. Die ersten drei Simulationen weisen die Tendenz auf, dass mit abnehmendem Drahtdurchmesser die Geschwindigkeit des Drahtes erheblich zunimmt. Die Einlaufgeschwindigkeit zeigt hingegen eine leicht sinkende Tendenz. Die Versuche 4 und 5 ergeben eine ähnliche Tendenz. Lediglich die sechste und letzte Simulation der Versuchsreihe zeigt deutlich abweichende Ergebnisse. Trotz kleiner werdenden Drahtdurchmessers ist die Drahtgeschwindigkeit geringer als in der vierten Versuchsvariante.

Tabelle 6.4: Zusammenfassung der Ergebnisse der simulierten Anlagenversuche unter Anwendung des entwickelten Reibmodells

Versuch			Ergebnisse				
Nr.	\varnothing Draht	n	\bar{v}_0	\bar{v}_3	T_0	T_3	\bar{M}
	<i>mm</i>	<i>U/min</i>	<i>m/min</i>	<i>m/s</i>	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	<i>kNm</i>
1	15	2,75	2,52	0,3	402,5	295	81
2	12	2,75	2,46	0,41	402,5	315	92
3	9,5	2,75	2,22	0,64	402,5	325	100
4	15	4,7	4,38	0,51	402,5	320	72
5	12	4,7	4,14	0,75	402,5	328	84
6	9,5	4,7	1,26	0,36	402,5	303	115

Die Tabelle 6.4 fasst die Ergebnisse der simulierten Anlagenversuche unter Verwendung des entwickelten Reibmodells zusammen. Wie auch in Tabelle 6.2 wird die Eingangstemperatur des Werkstückes der Vollständigkeit halber mit aufgeführt, obgleich sie eine Eingangsgröße für die Simulation und kein Ergebnis ist.

6.2.5 Kontaktsituation und Reibkoeffizienten der simulierten Versuche unter Anwendung des Reibmodells

Die Darstellung 6.22 zeigt die sich in der Simulation aus Normaldruck und Temperatur ergebenden Reibkoeffizienten im Kontaktbereich des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses unter Anwendung des Reibmodells nach Formel 6.1 und Tabelle 6.3 aus den Ansichten von oben, unten, rechts und links. Ein Reibkoeffizient kann nur an solchen

stellen ermittelt werden, an denen es zum Kontakt zwischen dem Werkstück und den Arbeitswalzen kommt. In der Folge kann die Grafik zur Beschreibung der Kontaktsituation genutzt werden.

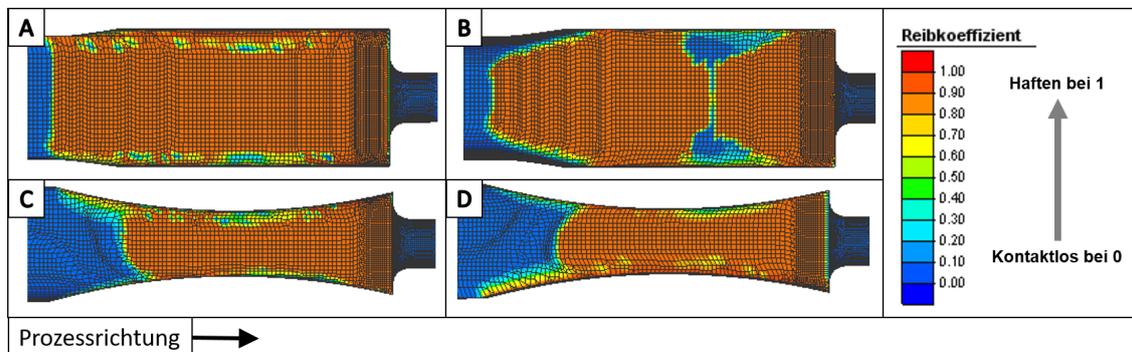


Abbildung 6.22: Kontaktsituation und Reibkoeffizienten bei der Simulation der Anlagenversuche unter Anwendung des Reibmodells:

- A = Ansicht von oben
- B = Ansicht von unten
- C = Ansicht von rechts
- D = Ansicht von links

Die Teildarstellung A zeigt die sich einstellenden Reibkoeffizienten aus der Ansicht von oben. Die nach oben gerichtete Oberfläche des Gussprofils ist mit der U-Walze der Anlage in Kontakt. Das von links einlaufende Werkstück beginnt zu breiten, sobald es mit der Walze in Kontakt kommt. Der vertikal laufende Randbereich am Einlauf springt direkt in den Bereich Dunkelorange und somit auf einen Reibkoeffizienten von über 0,9. Im Bereich der Breitung ist an den horizontal verlaufenden Rändern ein kleiner Übergangsbereich erkennbar. Dieser Bereich ist bis zum Walzspalt ähnlich ausgeprägt. Hinter dem Walzspalt bis etwa zur halben Strecke zur Matrizenstirnseite bildet sich ein kleiner Randbereich aus in dem der Reibkoeffizient auf unter 0,3 abfällt und es vereinzelt zum Kontaktverlust kommt.

Die Teildarstellung B stellt die Kontaktsituation und die sich einstellenden Reibkoeffizienten von unten dar. Im Bereich der Breitung lässt sich im Vergleich zur Ansicht von oben ein stärker ausgeprägter Randbereich erkennen. Sobald die Umformkammer vollständig mit dem Werkstück ausgefüllt ist, kann bis zum Walzspalt kein Randbereich erkannt werden und der Reibkoeffizient liegt durchgängig bei über 0,9. Hinter dem Walzspalt ändert sich die Kontaktsituation wie auch die Verteilung der Reibkoeffizienten dramatisch. Bis etwa auf die Hälfte der Länge bis zur Matrizenstirnseite kommt es in den Randbereichen zum Kontaktverlust, welcher sich in Form von Dreiecken in die Mitte des Werkstückes zieht. Kurz hinter dem Walzspalt kommt es über eine Elementkantenlänge zum Kontaktverlust über die gesamte Werkstückbreite. In den Dreieckspitzen die zur

Matrizenstirnseite orientiert sind, steigt der Reibkoeffizient kontinuierlich an bis er kurz vor der Matrize über die gesamte Werkstückbreite wieder bei über 0,9 liegt.

An den beiden Teildarstellungen C und D kann die Breitung des Werkstücks dadurch erkannt werden, dass zunächst der obere und untere Teil des Werkstückes mit den Arbeitswalzen in Kontakt tritt und anschließend die Seiten des Gussprofils. Der nicht horizontale Verlauf des Beginns der Kontaktzone der Seitenflächen ist auf die nicht horizontal verlaufenden Seiten des Gussprofils zurück zu führen. Sobald die Seiten des Gussprofils mit den Arbeitswalzenflanken in Kontakt treten, bleibt dieser bis zur Matrizenstirnseite erhalten. Lediglich das in den vorhergehenden beschriebene Kontaktverhalten des Werkstücks in den Randbereichen ist auch in den Teildarstellungen aus der Seite erkennbar.

6.3 Ergebnisse der Parameterstudie

6.3.1 Simulationsergebnisse der Parameterstudie

Zusätzlich zu den zuvor dargestellten Ergebnissen aus der Nachbildung der experimentellen Anlagenversuche wird in der numerischen Umformsimulation eine Vielzahl weiterführender Ergebnisgrößen erzeugt. Bei der Untersuchung der Einflüsse der beschreibenden Größen der Geometrie des Umformraumes wurden die folgenden Simulationsergebnisse betrachtet:

M = Drehmoment Das Drehmoment beschreibt die Leistung, die an den beiden Arbeitswalzen aufgewendet werden muss, um das Werkstück durch die Matrize zu pressen.

F_{Radial} = Walzkraft radial Die radiale Walzkraft kann als die Kraft interpretiert werden, welche die beiden Arbeitswalzen auseinanderzudrücken versucht.

F_{Axial} = Walzkraft axial Die axiale Walzkraft kann als die Kraft interpretiert werden, welche die beiden Walzenflanken der U-Walze auseinanderzudrücken versucht.

F_{Matrize} = Matrizenkraft Die Matrizenkraft ist die Kraft, die von dem Werkstückmaterial auf die Stirnseite der Matrize ausgeübt wird.

A = Kontaktfläche Die Kontaktfläche ist die Summe aller einzelnen Kontaktflächen, welche zwischen den Arbeitswalzen, der Matrize und dem Werkstück auftreten.

v_{Draht} = Drahtgeschwindigkeit Die Drahtgeschwindigkeit beschreibt die Geschwindigkeit, die der produzierte Draht am Matrizenaustritt aufweist.

Bei der Simulation der Versuchsvarianten 5, 6, 7 und 8 wurde aufgrund ungünstiger Faktoreinstellungen kein Material durch die Matrize gepresst. Bei diesen Varianten befand

sich die Matrizenstirnseite genau im Walzspalt der Arbeitswalzen. Die Kontaktfläche und somit die Reibkraft zwischen Werkstück und Werkzeugen war nicht groß genug, um die Formgebung durch die Matrize zu initiieren. Der Wirkungsflächenversuchsplan nach Tabelle 5.10 musste angepasst werden. Die Orthogonalität der Versuchsplanung wird hierdurch aufgehoben. Eine derartige Anpassung ist vor dem Hintergrund der erfolgreichen Durchführung und somit Auswertung des Umformprozesses zulässig. Die Tabelle 6.5 zeigt die angepassten Versuchsvarianten der Parameterstudie.

Tabelle 6.5: Anpassungen des Versuchsplans der Parameterstudie zur Untersuchung der Einflüsse einzelner geometrischer Größen des Umformraumes

Nr.	Relativ				Absolut					
	h_0	b_1	h_1	h_2	h_0	b_0	h_1	b_1	h_2	b_2
					<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>	<i>mm</i>
5	0,5	1	0,75	0,85	31,62	63,25	23,72	63,25	26,88	63,25
6	1	1	0,75	0,85	44,72	44,72	33,54	44,72	38,01	44,72
7	0,5	1,2	0,75	1	31,62	63,25	23,72	75,89	31,62	75,89
8	1	1,2	0,75	1	44,72	44,72	33,54	53,67	44,72	53,67

Durch die Anpassung der Versuchsplanung konnten alle Varianten des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses erfolgreich simuliert werden. Die Ergebnisse dieser in Abschnitt 5.4 beschriebenen und nach Tabelle 5.9 und Tabelle 6.5 durchgeführten Simulationen können im Einzelnen der folgenden Auflistung 6.6 entnommen werden.

Tabelle 6.6: Simulationsergebnisse der Parameterstudie

Nr.	M	F_{Radial}	F_{Axial}	F_{Matrize}	v_{Draht}	A
	<i>kNm</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>m/s</i>	<i>cm²</i>
1	132	2138	496	818	0,62	242
2	110	1551	613	525	0,61	215
3	129	2467	379	742	0,70	241
4	115	1481	482	663	0,72	209
5	91	859	301	572	1,61	135
6	91	629	433	524	1,34	139
7	119	973	293	834	1,44	159
8	120	729	460	804	1,68	160
9	148	1704	524	987	0,52	259
10	157	1816	962	941	0,64	274
11	167	2686	579	1197	0,67	288
12	163	1952	850	1152	0,74	274
13	119	1036	485	907	1,69	203

Tabelle 6.6: Fortsetzung der Simulationsergebnisse der Parameterstudie

Nr.	M	F _{Radial}	F _{Axial}	F _{Matrize}	V _{Draht}	A
	<i>kNm</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>m/s</i>	<i>cm²</i>
14	117	762	723	851	1,63	216
15	153	1400	514	1223	1,07	183
16	123	675	508	950	1,85	193
17	118	1539	439	821	1,26	222
18	111	1089	642	740	1,26	211
19	105	1163	566	686	1,15	209
20	119	1210	486	835	1,24	217
21	129	1787	542	794	0,62	228
22	104	742	380	715	1,73	150
23	98	1271	470	606	1,21	183
24	133	1279	665	1017	1,21	234
25	113	1156	513	772	1,22	211

6.3.2 Koeffizienten der Regressionsgleichungen

Zu jeder Zielgröße der Parameterstudie wurde eine Regressionsgleichung entsprechend der Gleichung 6.2 erstellt. Verwendet wurde hierzu die Software Minitab 19. Die Variable x steht stellvertretend für eine der regressierten Ergebnisgrößen. In der Gleichung stellt K die Konstante der mathematischen Beschreibung der Auswirkungen der einzelnen Parameter dar. Der Term x_l beschreibt die linearen Einflüsse der einzelnen Parameter auf die jeweilige Ergebnisgröße, der Term x_q entsprechend die quadratischen Einflüsse. Der Term x_w gibt das Einflussmaß der Wechselwirkungen der einzelnen Parameter untereinander auf die einzelnen Ergebnisgrößen an.

$$x = K + x_l + x_q + x_w \quad (6.2)$$

$$x_l = \eta_0 * h_0 + \beta_1 * b_1 + \eta_1 * h_1 + \eta_2 * h_2 \quad (6.3)$$

$$x_q = \eta_0^2 * h_0^2 + \beta_1^2 * b_1^2 + \eta_1^2 * h_1^2 + \eta_2^2 * h_2^2 \quad (6.4)$$

$$x_w = \eta_0 * \beta_1 + \eta_0 * \eta_1 + \eta_0 * \eta_2 + \beta_1 * \eta_1 + \beta_1 * \eta_2 + \eta_1 * \eta_2 \quad (6.5)$$

Die Konstante K und die Koeffizienten der Terme x_l , x_q und x_w können der Tabelle 6.7 entnommen werden. Unter Anwendung der Gleichung 6.2 und der Tabelle 6.7 können die einzelnen Ergebnisgrößen x für jede beliebige Faktoreinstellung ermittelt werden.

Tabelle 6.7: Koeffizienten zu den einzelnen Termen der Regressionsgleichungen

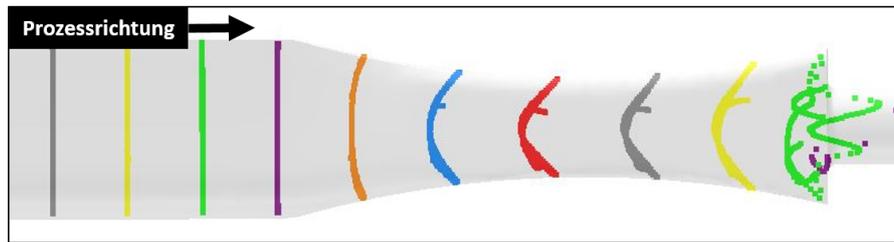
Term	M	F _{Radial}	F _{Axial}	F _{Matrize}	A	v _{Draht}
K	111,86	1174,4	515,4	763,7	208,7	1230,2
η_0	-3,83	-229,1	92,4	-52,8	-2,3	49,8
β_1	7,67	106,1	-30,7	88,3	1,8	16,9
η_1	-11,83	-543,5	-73,9	-24,4	-38,4	455,2
η_2	15,28	-67,7	104,6	174,3	24,5	4,8
η_0^2	3,96	118,1	22,4	26,4	10,5	17,3
β_1^2	1,46	-9,4	7,9	6,4	7,0	-46,7
η_1^2	5,96	68,6	-57,1	0,4	-17,0	-69,2
η_2^2	4,96	79,1	49,4	57,4	2,5	-35,7
$\eta_0 * \beta_1$	-2,00	-107,3	-24,4	1,0	-2,5	83,2
$\eta_0 * \eta_1$	0,00	44,7	-24,9	3,5	5,4	30,8
$\eta_0 * \eta_2$	0,50	27,0	26,4	1,9	4,9	58,1
$\beta_1 * \eta_1$	4,37	-55,8	8,6	29,6	-1,3	-41,5
$\beta_1 * \eta_2$	0,37	58,0	-0,9	14,5	-3,3	-31,6
$\eta_1 * \eta_2$	-3,62	10,5	-12,6	-20,8	0,9	15,1

6.4 Materialflussuntersuchung

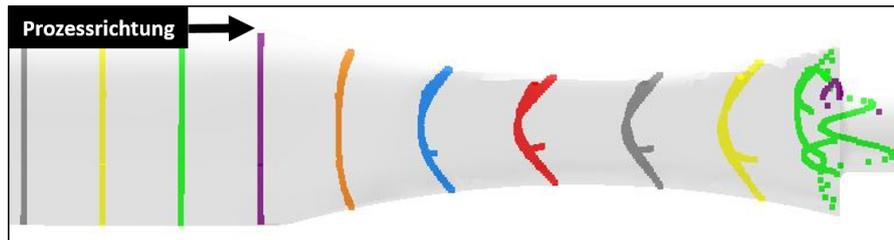
6.4.1 Ergebnisse der numerischen Simulation

Der Materialfluss beim kombinierten Walzen und Strangpressen während der Umformung wurde mittels Umformsimulation nachgebildet. Hierzu wurden in dem Modell die Positionierung und Orientierung der Kupferstifte des Versuchsmaterials der experimentellen Untersuchung mit Trackingpoints im Werkstück nachgebildet. Die entstehende Verformung innerhalb des Werkstücks überträgt sich im Verlauf der Simulation auf die einzelnen Punkte der Nachbildung. Auf der Grundlage dieser Verschiebungen kann auf den Materialfluss im Simulationsmodell geschlossen werden.

Die Abbildung 6.23 zeigt das verformte Werkstück der Umformsimulation zum vergleichbaren Zustand des experimentellen Versuchsmaterials aus der linken Ansicht. Durch die transparente Darstellung der digitalen Nachbildung werden die einzelnen Trackingpoints sichtbar. Die Darstellung der einzelnen Stifte in unterschiedlichen Farben erleichtert die Zuordnung der Trackingpoints zum jeweiligen nachgebildeten Kupferstift. Die erste ver-



(a) Ansicht links

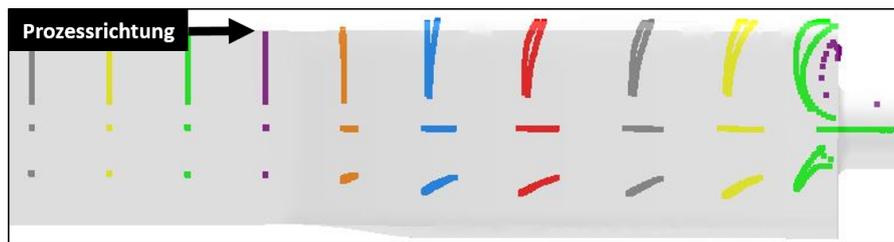


(b) Ansicht rechts

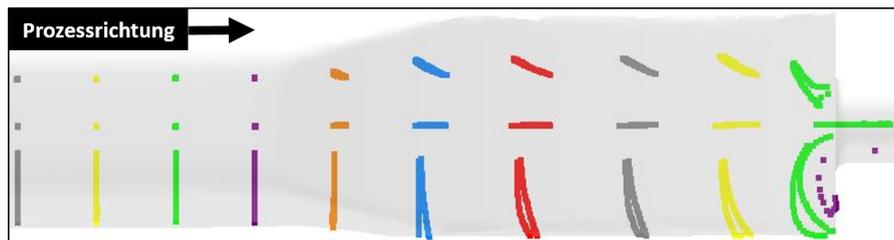
Abbildung 6.23: Materialfluss der Simulation aus der linken und rechten Ansicht

formte Linie (orange) zeigt ein Voreilen der Außenbereiche. Die Art der Verformung findet sich ebenfalls in der zweiten (blauen) Linie im Umformbereich des Werkstücks in fortgeschrittenem Zustand wieder. Die nahe der Walzenachse liegende rote Linie zeigt eine Änderung in ihrer Verformung gegenüber den vorhergehenden Stiftnachbildungen. Die stetig geformten Bögen in den Außenbereichen werden entgegen der Prozessrichtung zurückgeformt, begradigt bzw. tendenziell in die Gegenrichtung gebogen. Die hinter der Walzenachse befindliche gelbe Linie ähnelt in ihrer Gestalt der vor der Walzenachse befindlichen blauen Linie. Der in der Walzenachse entstehende Effekt wird aufgehoben. Die kurz vor der Matrizenstirnseite liegende grüne Linie wurde bereits teilweise durch die Matrizenöffnung gepresst und im Bereich der Matrizenöffnung stark zertrennt.

In Abbildung 6.24 ist das verformte Werkstück der Umformsimulation mit den nachgebildeten Kupferstiften durch Trackingpoints aus der Ansicht von oben und von unten dargestellt. Die horizontalen Stiftnachbildungen der ersten blauen Stiftreihe sind an ihrer Außenseite weiter in Prozessrichtung umgeformt als der ins Werkstückinnere gerichtete Bereich. Der zugehörige vertikal ausgerichtete und außen liegende Stift zeigt eine Umformung in Richtung des Werkstückrandes. Beide an der ersten Ebene erkennbaren Effekte können in den darauf folgenden Ebenen wieder gefunden werden. Hierbei erhöht sich die in Prozessrichtung stattfindende Zunahme der Verformung der äußeren Bereiche der horizontalen Stifte. Die Verformung der vertikalen Stifte nach außen nimmt in Prozessrichtung nicht weiter zu.



(a) Ansicht oben

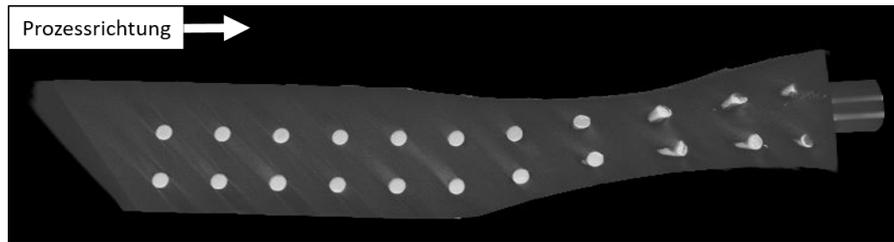


(b) Ansicht unten

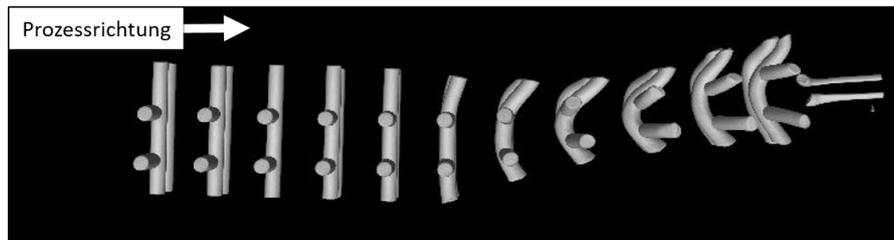
Abbildung 6.24: Materialfluss der Simulation aus der Ansicht von oben und unten

6.4.2 Computertomographie des Probenmaterials

Nach der Umformung des Probenmaterials an der industriellen Versuchsanlage zum kombinierten Walzen und Strangpressen wurde eine computertomographische Untersuchung am Untersuchungsgegenstand durchgeführt. Die linke Ansicht dieser Untersuchungsergebnisse wird in Abbildung 6.25 dargestellt. In beiden Teildarstellungen zeigt die Prozessrichtung von links nach rechts. In der Teildarstellung 6.25a ist sowohl das Kupfer als auch das Aluminium sichtbar. In der darunter befindlichen Teildarstellung 6.25b ist der Grundwerkstoff Aluminium ausgeblendet und nur die umgeformten Kupferstifte sind sichtbar. An der ersten vertikalen Linie der Kupferstifte innerhalb des Umformraumes ist erkennbar, dass sich der obere und untere Bereich des Materials schneller in die dargestellte Prozessrichtung bewegt als die Mitte des Materials. In Richtung des Walzspaltes verstärkt sich dieser Effekt deutlich. Die horizontalen Kupferstifte der letzten Kupferstifteebene vor dem Walzspalt zeigen ein identisches Voreilen des Randes des Versuchsmaterials. Hinter dem Walzspalt ist an den vertikalen Stiften eine Umkehr der Materialflussgeschwindigkeit zu erkennen. In der Werkstückmitte fließt das Material schneller in Prozessrichtung als an den Rändern. Es entsteht eine weitere Richtungsumkehr im verbogenen Kupferstift. Kurz vor der Matrize deutet sich diese Richtungsumkehr ebenfalls an den horizontalen Stiften an. Bei dem oberen Stift der letzten Kupferstifteebene deutet sich ein Voreilen des zum Kern gerichteten Stiftdendes an.



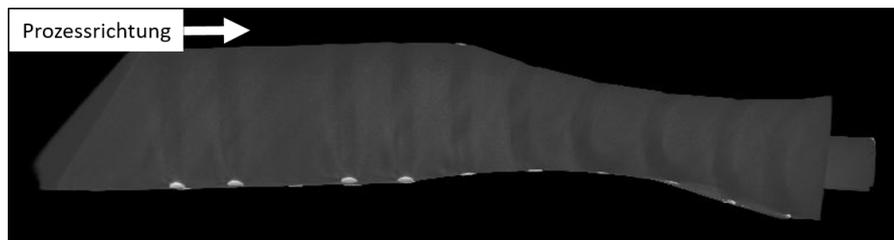
(a) Kupfer und Aluminium



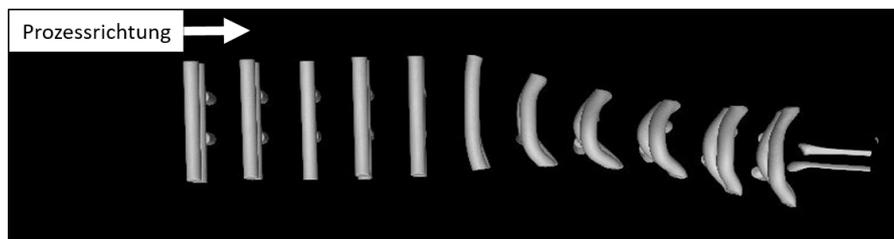
(b) Nur Kupfer

Abbildung 6.25: Linke Ansicht der Computertomographie des Versuchsmaterials

In der Abbildung 6.26 sind die zuvor beschriebenen Ergebnisse der Computertomographie aus der rechten Ansicht dargestellt. Die obere Teildarstellung 6.26a zeigt die Ergebnisse der Untersuchung mit sichtbarem Grundwerkstoff zur Einordnung der Position der Kupferstifte. Der Teildarstellung 6.26b kann die inhärente Verformung der Kupferstifte aus der rechten Ansicht entnommen werden.



(a) Kupfer und Aluminium

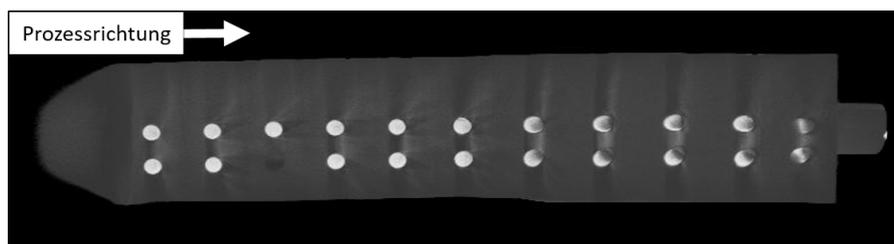


(b) Nur Kupfer

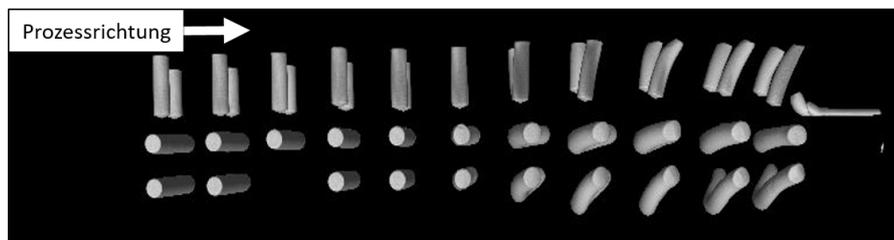
Abbildung 6.26: Rechte Ansicht der Computertomographie des Versuchsmaterials

Die rechte Ansicht der Untersuchungsergebnisse ermöglicht lediglich eine genauere Beurteilung der Umformung der vertikalen Kupferstiftreihen, da diese die vertikalen Stifte zum Großteil verdecken. Die zuvor beschriebenen Beobachtungen der linken Ansicht aus Darstellung 6.25 können auf der Grundlage der Darstellungen der rechten Ansicht bestätigt werden. Vor dem Walzspalt bewegt sich das Versuchsmaterial an den Außenseiten schneller in Prozessrichtung. Hinter dem Walzspalt ist auch aus der rechten Ansicht die Ausbildung einer erneuten Richtungsänderung in der Verformung der Stifte erkennbar, welche auf eine Veränderung der Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen dem Kern und dem Außenbereich des Versuchsmaterials schließen lässt.

Die Darstellung 6.27 zeigt die zuvor beschriebenen Ergebnisse der Computertomographie aus der Oberansicht. An der Teildarstellung 6.27a ist erkennbar, dass sich während der Versuchsdurchführung einer der Kupferstifte aus dem Grundmaterial gelöst hat. Der von hinten gezählte dritte Kupferstift der äußeren vertikalen Stiftreihe fehlt. Da sich diese Stiftebene nicht im Umformraum befindet, hat der Verlust keine Auswirkungen auf die Untersuchung des Materialflusses.



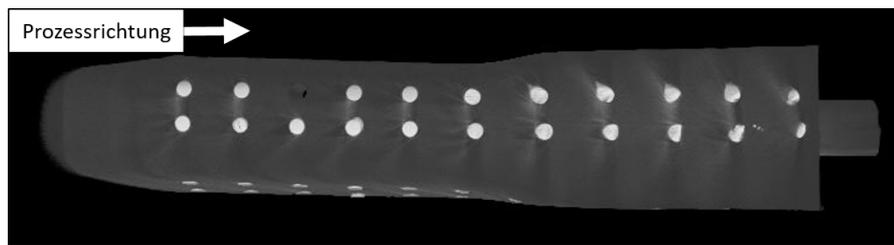
(a) Kupfer und Aluminium



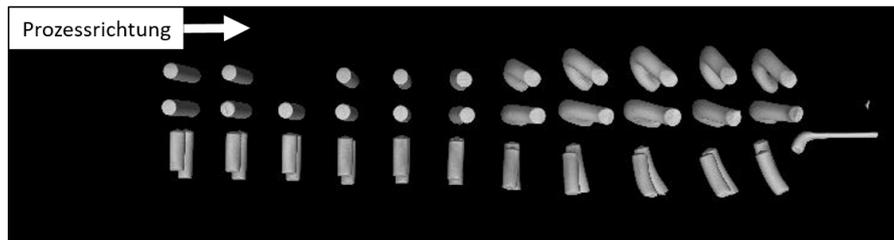
(b) Nur Kupfer

Abbildung 6.27: Ansicht der Computertomographie des Versuchsmaterials von oben

Das aus den Abbildungen 6.25 und 6.26 erkennbare Materialflussverhalten wird durch die Ansicht 6.27 von oben auf die Verformung des Werkstoffes bestätigt. Alle Kupferstiftreihen einer Stiftebene zeigen vor dem Eintreten in den Walzspalt ein Voreilen der Randbereiche. Hinter dem Walzspalt kommt es zu einer Umkehr der Geschwindigkeitsverhältnisse. An der außen liegenden vertikalen Stiftreihe ist dieser Sachverhalt besonders deutlich erkennbar.



(a) Kupfer und Aluminium



(b) Nur Kupfer

Abbildung 6.28: Ansicht der Computertomographie des Versuchsmaterials von unten

Die Abbildung 6.28 zeigt die zuvor beschriebenen Ergebnisse aus der Ansicht von unten. Die Teildarstellung 6.28a bildet das verformte Werkstück mit dem Grundwerkstoff Aluminium und den Stiften aus Kupfer ab, die Teildarstellung 6.28b zeigt die gleiche Ansicht nur mit den Kupferstiften sichtbar.

6.4.3 Computertomographie des Drahtes

Zusätzlich zu der Untersuchung des umgeformten Probenstückes wurde auch die resultierende Form der Kupferstifte in dem erzeugten Draht durch Computertomographie sichtbar gemacht. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in der Abbildung 6.29 dargestellt. Der obere Teil der Visualisierung zeigt den Draht aus dem CT-Ergebnis inklusive des Aluminiums. Das darunter dargestellte Bild enthält nur die im Aluminium befindlichen und final umgeformten Kupferstifte. Die unten abgebildete rote Box zeigt eine der sich wiederholenden Konstellationen an verformten Kupferstiften in vergrößerter Form. In der Darstellung verläuft die Prozessrichtung von links nach rechts.

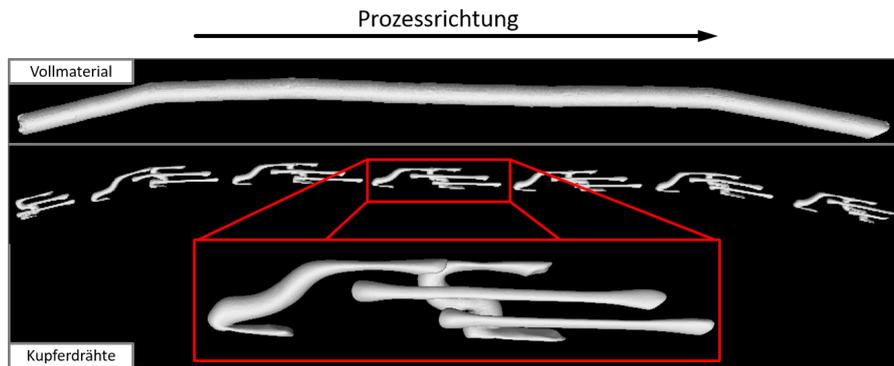


Abbildung 6.29: Computertomographische Untersuchung des erzeugten Drahtes

Eine Differenzierung der horizontalen und vertikalen Kupferstifte ist trotz deren starker Deformation gut möglich. Der in der vergrößerten Ansicht von links betrachtete vertikale Kupferstift ist der ursprünglich mittig angeordnete Stift der zugehörigen Stifteebene. Der weiter in Prozessrichtung befindliche vertikale Kupferstift kann der ursprünglich außen angeordneten vertikalen Position zugeordnet werden. Die im verformten Versuchsstück identifizierte doppelte Richtungsänderung in der Deformation der Stifte wurde durch die starke Verformung beim Passieren der Matrizenöffnung deutlich verstärkt. Die beiden horizontal orientierten Kupferstifte sind ebenfalls deutlich im Endprodukt erkennbar. Auch bei diesen Stiften ist eine signifikant stärkere Verformung im Vergleich zur zugehörigen Gestalt im umgeformten Versuchsstück erkennbar.

6.4.4 Ergebnisse der Metallographie

Die Darstellung 6.30 zeigt eine Lichtbildaufnahme des ersten Flachschliffes F1. Das Präparat stammt aus der Mitte der Probe und reicht vom Walzspalt (linke Kante) bis zur Matrize (rechte Kante). Auf der rechten Seite ist im unteren Bereich der entstehende Draht erkennbar. Die obere Kante der Probe war mit den Arbeitswalzen in Kontakt. Die untere Kante der Probe lag im Kern des Versuchsmaterials. An der oberen, zu den Walzen gerichteten Kante der Probe ist ein Voreilen des Materials erkennbar. Dieses Voreilen nimmt bis zur Matrize zu. An der unteren, zum Probenkern orientierten Kante ist etwa ab der Hälfte der Länge ein Voreilen des Materials erkennbar. Kurz vor der Matrizenöffnung nimmt dieses Voreilen deutlich zu. Vor der Matrizenstirnseite entsteht ein Fließlinienbild, welches mit der Ausbildung der toten Zone beim indirekten Strangpressen vergleichbar ist.



Abbildung 6.30: Lichtbildaufnahme von Flachscliff 1 (F1)

Der zweite Flachscliff mit der Bezeichnung F2 befindet sich im Vergleich zum Präparat mit der Bezeichnung F1 weiter im Außenbereich des Versuchsmaterials. An der nach oben, zu den Arbeitswalzen gerichteten Kante sind Fließlinien erkennbar. Sie sind von der Außenkante in das Material gerichtet. Ihre Länge nimmt in Richtung der Matrize zu. Kurz vor der Matrize ragt eine Linie von der Außenkante bis in die Mitte des Versuchsmaterials. Je länger die sich ausbildenden Fließlinien werden, desto weiter zeigen deren untere Enden in Richtung der Matrizenöffnung. Kurz vor der Matrizenstirnseite bildet sich wieder ein Fließlinienbild, welches mit der Ausbildung der toten Zone beim indirekten Strangpressen vergleichbar ist. Es ist davon auszugehen, dass die sichtbaren Kupferstifte der horizontalen Stiftreihe die Ausbildung der Fließlinien in dieser Schnittebene beeinflusst haben. Der Probenbereich ohne Fließlinien weist keine besondere Struktur auf, welche auf das Materialverhalten in diesem Bereich schließen ließe.

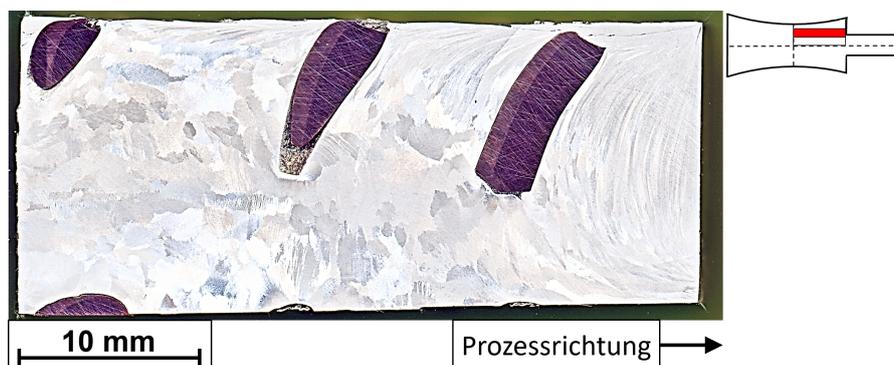


Abbildung 6.31: Lichtbildaufnahme von Flachscliff 2 (F2)

Der dritte und letzte Flachscliff (Abbildung 6.32) ist im Vergleich zu den Flachscliffen F1 und F2 deutlich kürzer. Ursache hierfür ist, dass der Sägeschnitt beim Zertrennen der Probe nicht bis in den Walzspalt geht, sondern zuvor im Kontaktbereich zwischen Arbeitswalze und Werkstück endet. Dieser Schnitt in den Kontaktbereich bildet die linke,

abgebrochen aussehende Kante der Abbildung. Die beiden Aussparungen an der unteren, zur Werkstückmitte gerichteten Kante sind die Enden der beiden letzten, in der Werkstückmitte liegenden und vertikal ausgerichteten Kupferstifte vor der Matrizenöffnung. An der oberen Kante des Präparates, welche zur Arbeitswalze orientiert ist, kann wie auch bei den beiden vorigen Flachschnitten ein Randbereich identifiziert werden, welcher eine Voreilung in Prozessrichtung aufweist. Etwa ab einem Drittel der Probenlänge nimmt dieser Randbereich in Prozessrichtung erkennbar zu. Im letzten Drittel der Probe sind erneut die mit dem indirekten Strangpressen vergleichbaren Fließlinien erkennbar, welche den Umformbereich und die tote Zone des Umformraumes markieren.



Abbildung 6.32: Lichtbildaufnahme von Flachschnitt 3 (F3)

Der erste, in der Werkstückmitte liegende Längsschnitt wird in Abbildung 6.33 dargestellt. Die linke Kante des Präparates liegt im Walzspalt. Die obere Kante liegt in der Werkstückmitte. Die untere, runde Kante war im Versuch im Kontakt zur Arbeitswalze. Die rechte Kante war im Kontakt mit der Matrize. In der oberen Hälfte der rechten Kante lag die Öffnung der Matrize. Die untere Hälfte der rechten Kante war mit der Matrizenstirnseite in Kontakt. In dem Präparat sind deutlich die letzten drei zentral positionierten und vertikal orientierten Kupferstifte, die sich bei Versuchsstopp im Umformraum befanden, erkennbar. Der linke der drei Kupferstifte ist bei der metallographischen Präparation verloren gegangen.

Über die volle Länge der unteren Kante ist ein voreilender Randbereich erkennbar. Bereits im ersten Drittel der Probe reicht dieser Randbereich bis etwa zwei Drittel der Probenhöhe. Zwischen dem zweiten und dem dritten Stift vergrößert sich der Bereich der erkennbaren Fließlinien bis in die Probenmitte. Im letzten Drittel vor der Matrize orientieren sich die Fließlinien in der Werkstückmitte zunehmend in Richtung der Matrizenöffnung und holen den Randbereich ein. Es entsteht im Bereich der Matrizenstirnseite auch in diesem Präparat eine mit dem indirekten Strangpressen vergleichbare Ausprägung von Umformzone und toter Zone.

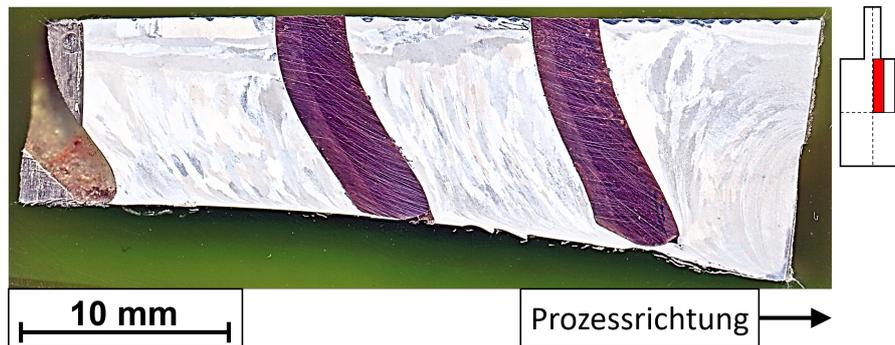


Abbildung 6.33: Lichtbildaufnahme von Längsschliff 1 (L1)

Die Orientierung der Kanten von Längsschliff 2 in Darstellung 6.34 entspricht der Orientierung von Längsschliff 1. An der rechten, zur Matrize gerichteten Kante der Probe ist im oberen Viertel die Matrizenöffnung sichtbar. Die an der unteren Kante sichtbaren Stiftenden können der äußeren vertikalen Kupferstiftreihe zugeordnet werden. Der Rest der Kupferstifte befindet sich aufgrund der aufgetretenen Breitung während der Umformung nicht in der Ebene des Sägeschnittes. Die Ausrichtung der Korngrenzen im unten liegenden, mit der Walze in Kontakt stehenden Rand der Probe deutet auch hier auf ein Voreilen dieses Bereichs hin. Die Fließlinien vor der Matrize entsprechen im letzten Viertel der Probe wieder der Charakteristik des indirekten Strangpressens.



Abbildung 6.34: Lichtbildaufnahme von Längsschliff 2 (L2)

Die Orientierung der Kanten der Längsschliffprobe 3 aus Abbildung 6.35 entspricht ebenfalls der Beschreibung der Längsschliffprobe 1 aus Abbildung 6.33. Entgegen den vorhergehenden Längsschliffen ist an der rechten Kante keine Öffnung der Matrize erkennbar. Die Probe befindet sich weiter an der Außenseite der Matrizenstirnfläche als die Drahtöffnung. Die drei sichtbaren Kupferstiftteilstücke können wie bei der Probe L2 der äußeren vertikalen Stiftreihe zugeordnet werden. Sichtbar ist in diesem Präparat der mittige Teil der Stifte, welcher während des Durchlaufs durch die Umformkammer breitete. Der erste und der letzte Kupferstift sind während der Präparation verloren

gegangen. Über die gesamte untere, der Arbeitswalze zugewandte Kante ist eine durchgängige Randschicht erkennbar, in der das Material einem Voreilen unterliegt. Die beim indirekten Strangpressen übliche Charakteristik der Umformzone vor der Matrize ist in dem Präparat L3 im vordersten Bereich im Ansatz erkennbar.

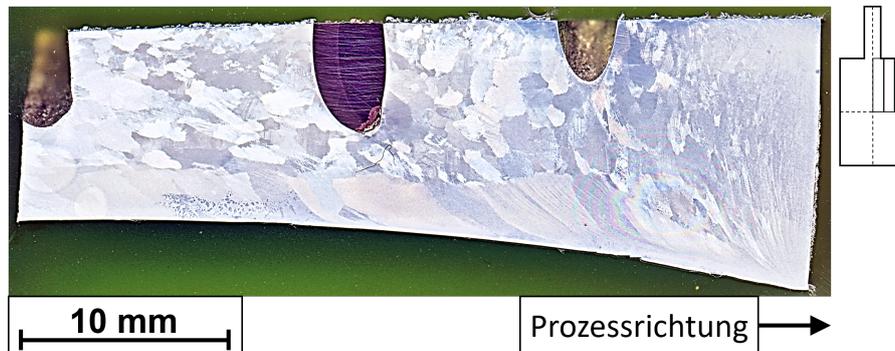


Abbildung 6.35: Lichtbildaufnahme von Längsschliff 3 (L3)

Die quer geschliffenen Präparate der Abbildungen 6.36 bis 6.40 weisen eine identische Orientierung der Kanten innerhalb des ursprünglichen Versuchsmaterials auf. Die untere und die linke Kante liegen in der Werkstückmitte. Die obere und die rechte Kante befinden sich am Werkstückrand und waren während der Versuchsdurchführung im Kontakt mit den Arbeitswalzen. Die Ansicht auf die Proben ist entgegen der Prozessrichtung orientiert.

Die Probe der Abbildung 6.36 ist dem Walzspalt am nächsten. Die äußere Form der Probe ist rechteckig und die Kanten sind gerade. Am linken, zur Werkstückmitte orientierten Rand ist ein Teil eines zentral positionierten vertikalen Kupferstiftes sichtbar. An der oberen Kante, in der Mitte der Probe, ist ein Rest eines außen positionierten vertikalen Kupferstiftes erkennbar. Die Gestalt der Körnung im zur Probenmitte liegenden Bereich weist keine erkennbare Fließlinienbildung auf. In dem zu den Arbeitswalzen orientierten Bereich zeigt sich eine Verzerrung der gebildeten Körner in Richtung der Probenmitte.



Abbildung 6.36: Lichtbildaufnahme von Querschliff 1 (Q1)

Der in Abbildung 6.37 dargestellte zweite Querschliff ist im Vergleich zur Probe Q1 weiter in Richtung der Matrize gelegen. In der unteren linken Ecke der Probe ist ein Teil eines Kupferstiftes aus der vertikalen mittleren Stiftreihe erkennbar. In der oberen rechten Ecke ist eine Lücke bzw. ein Abbruch der Probe zu sehen. Auffällig ist die Gestalt der oberen, zum Kalibergrund der Arbeitswalze orientierten Kante. Zur rechten Seite hin fällt diese Kante. Sie ist nicht wie die Oberkante der Querschliffprobe Q1 gerade. Der strukturelle Aufbau des Gefüges ist mit dem der Probe Q1 vergleichbar. Der Bereich der Werkstückmitte weist keine Orientierung der Körner auf, wohingegen der Außenbereich eine Orientierung selbiger zur Mitte des Werkstücks zeigt. Im direkten Vergleich zur Probe Q1 ist die Ausprägung dieser Struktur stärker.



Abbildung 6.37: Lichtbildaufnahme von Querschliff 2 (Q2)

In Probe Q3, dargestellt in Abbildung 6.38, ist in der Werkstückmitte nahe dem oberen Rand ein Teil eines Kupferstiftes aus der zentral gelegenen vertikalen Stiftreihe sichtbar. Weiter ist in der Probenmitte im oberen Bereich ein Teil der vertikalen äußeren Stiftreihe zu sehen. Der elliptische Querschnitt dieses Kupferstiftes zeigt auf den Außenbereich des präparierten Versuchsstückes. Die obere Kante der Probe ist ebenso gekrümmt wie die obere Kante der Querschliffprobe Q2. Zur rechten Außenseite, also in Richtung der Flanke der Arbeitswalze, fällt die Kante ab. Verglichen mit Q2 ist dieser Sachverhalt bei Probe Q3 stärker ausgeprägt. Die Ausbildung des Gefüges weist im Bereich der Werkstückmitte bei dieser Probe eine Orientierung der Körner in vertikaler Richtung auf. Mit abnehmender Distanz zur Arbeitswalzenkante werden die Korngrenzen gestreckt und orientieren sich zunehmend zur Mitte des ursprünglichen Versuchsmaterials. In der unteren rechten Ecke der Probe ist eine feinere, nicht in eine eindeutige Richtung deutende Gestalt des Gefüges sichtbar.

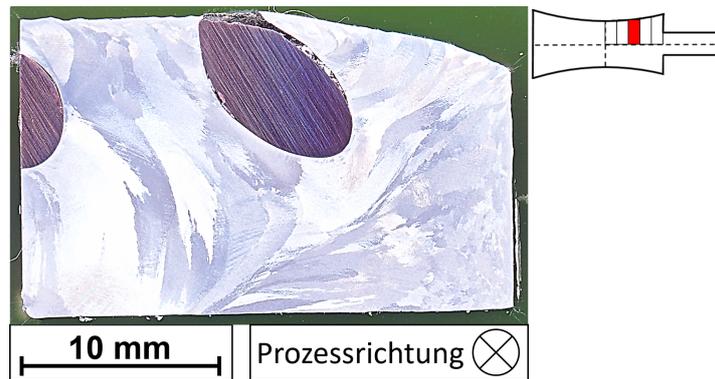


Abbildung 6.38: Lichtbildaufnahme von Querschliff 3 (Q3)

In Abbildung 6.39 wird die Querschliffprobe Q4 dargestellt. Es sind keine Überreste eines Kupferstiftes sichtbar. Die obere Kante der Probe fällt zum rechten Rand hin ab. Die Ausprägung dieses Abfalls ist verglichen mit den Proben Q2 und Q3 geringer. Der im ursprünglichen Versuchsmaterial zentral gelegene Bereich des Präparates zeigt eine Orientierung der Korngrenzen in Richtung der Werkstückmitte bzw. der Matrizenöffnung. Die Form der Korngrenzen am oberen Rand ist im Vergleich zur Probe Q3 weniger in Richtung Matrizenöffnung gerichtet. Die Körnung im rechten Randbereich ist wie im vorhergehenden Querschliff Q3 fein und weist keine Orientierung auf.

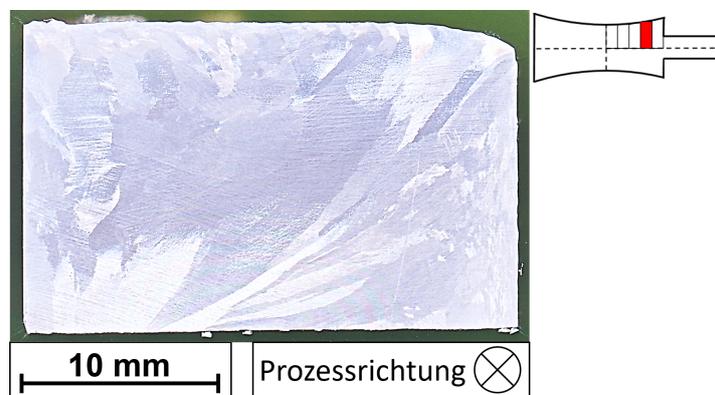


Abbildung 6.39: Lichtbildaufnahme von Querschliff 4 (Q4)

Die letzte Querschliﬀprobe Q5 ist der Matrizenstirnseite am nächsten gelegen. In der Mitte der linken Kante ist der Teil eines mittig positionierten vertikalen Kupferstiftes zu sehen. Im oberen Bereich der Präparatsmitte wurde einer der vertikalen und außen gelegenen Kupferstifte durchtrennt und ist somit in der Probe sichtbar. Die elliptische Form des Stiftquerschnittes ist in Richtung des rechten Probenrandes gerichtet. Die Gestalt der Korngrenzen in der Mitte des ursprünglichen Versuchsmaterials ist länglich. Die langen Kanten zeigen in Richtung der Probenmitte bzw. in Richtung der Matrizenöffnung. In den Probenbereichen die zur Arbeitswalze hin gelegen sind ist diese Charakteristik weniger stark ausgebildet. Die Verzerrung und die Größe der Körnung nimmt ab.

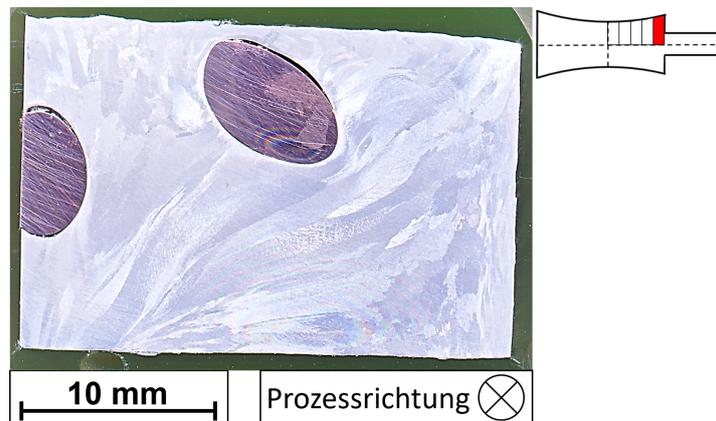


Abbildung 6.40: Lichtbildaufnahme von Querschliﬀ 5 (Q5)

7 Diskussion der Versuchsergebnisse

7.1 Ursachen der phenomenologischen Beobachtungen

7.1.1 Unterteilung der Umformzone nach Kaliberfüllung

Aus der gegebenen Differenz des einlaufenden Profilquerschnittes A_S nach Teildarstellung 2.10a und dem Querschnittsprofil A_0 der Umformkammer nach Teildarstellung 2.10b beim ersten Kontakt von Werkstück und Werkzeug bei gleicher Höhe $h_S = h_0$, aus der unvollständigen Füllung der Umformkammer hinter dem Walzspalt, erkennbar durch den fehlenden Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug in den Simulationen (Darstellungen 6.15 und 6.22), sowie aus der Gestalt der Außenkontur der Querschleifproben in den Abbildungen 6.36 bis 6.40 der im Rahmen der Materialflussuntersuchung durchgeführten Metallographie ist auf eine nicht durchgängige Füllung der Umformkammer während des Umformprozesses bei der genutzten Versuchsanlage zu schließen. In Abbildung 7.1 wird eine schematische Darstellung des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses auf der Grundlage der im vorigen Abschnitt aufgezählten Ergebnisse der verschiedenen durchgeführten Untersuchungen gegeben. Die Umformkammer des Prozesses wird in vier Zonen aufgeteilt, die sich durch ihre nicht vollständige bzw. vollständige Füllung mit dem Werkstückmaterial unterscheiden lassen.

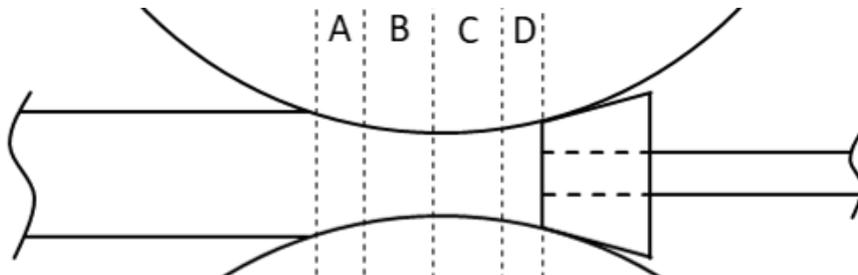


Abbildung 7.1: Zonen beim kombinierten Walz- und Strangpressen bezogen auf Über- und Unterfüllung der Umformkammer

Nachfolgend werden die in Abbildung 7.1 dargestellten Zonen A-D der Umformkammer beschrieben und deren Grenzen definiert:

Zone A Die erste Zone innerhalb der Umformkammer, die Breitzugszone, beginnt im Kontaktpunkt zwischen dem Werkstück und den Arbeitwalzen und endet, wenn die Querschnittsfläche des einlaufenden Werkstückes der Querschnittsfläche entspricht, welche durch die Arbeitwalzen gebildet wird. Das Walzkaliber ist am Ende der Breitzugszone vollständig ausgefüllt.

Zone B In Zone B, der Druckzone, ist die Umformkammer vollständig mit dem Werkstück gefüllt. Dieser Bereich beginnt mit dem Ende der Breitzzone und reicht bis zum Walzspalt. Die vollständige Raumauffüllung und die vorherrschenden Drücke aus den Wechselwirkungen mit den angrenzenden Umformzonen resultieren in einem in dieser Zone wirkenden hydrostatischen Druck.

Zone C Der Walzspalt bildet den Beginn der Zone C. Aufgrund der in Prozessrichtung zunehmenden Querschnittsfläche des Walzprofils wird dieser Bereich als Spreizzone bezeichnet. Charakteristisch für die Spreizzone ist ihre Materialunterfüllung. Die Spreizzone endet, sobald die Umformkammer aufgrund des an der Matrizenstirnseite aufstauenden Werkstückmaterials wieder vollständig mit Material ausgefüllt ist.

Zone D Sobald die Umformkammer wieder vollständig mit Material gefüllt ist, beginnt der letzte, als Stauchzone bezeichnete Bereich des Umformraumes. Die Stauchzone endet mit der Matrizenstirnseite. Das Ende der Unterfüllung in der Spreizzone wird durch das Aufstauen des Materials an der Matrizenstirnseite hervorgerufen. Die aus den angrenzenden Zonen wirkenden Drücke und die vollständige Kammereffüllung führen zu einem hydrostatischen Druck in diesem Bereich des Umformprozesses.

Im Abschnitt 6.1.1 wurde das beobachtete Phänomen von austretendem Werkstückmaterial bei der Durchführung der experimentellen Anlagenversuche beschrieben. Unter Berücksichtigung der nach Abbildung 7.1 definierten Zonen lässt sich der Bereich eingrenzen, aus dem Werkstückmaterial aus der Umformzone austreten kann. Die Spaltmaße zwischen den Arbeitswalzen werden mit $< 0,3 \text{ mm}$ möglichst eng zueinander eingestellt. Die Füllung der Umformkammer weist einen geringeren Widerstand verglichen mit der Verpressung durch diesen Spalt auf. Folglich kommt es nur in den Umformzonen, die vollständig mit Material ausgefüllt sind und bei denen ein hydrostatischer Druckanteil vorliegt, zu einem Austreten des Umformgutes. Diese Bedingung ist in der Druck- und in der Stauchzone gegeben.

Der Diskussion der Auswirkungen der Umformraumgeometrie auf relevante Prozessgrößen, welche auf den Ergebnissen der durchgeführten Parameterstudie gründet, sei die Auswirkung der Größe der Spreizzone auf die Effizienz der Umformung vorweggenommen. Je größer die Spreizzone ausgelegt wird, desto geringer ist die Effizienz des Prozesses. Die zur Umformung des Werkstückes durch die Matrize erforderliche Presskraft wird über die Reibkraft und Rotation der Walzen auf das Werkstück ausgeübt. Die Reibkraft setzt sich aus der Kontaktfläche, der Kontaktspannung und den Reibkoeffizienten zusammen. Kommt es zu einer Unterfüllung bzw. zur Ausbildung einer Spreizzone, weist die aus der Geometrie der Walzen definierte Umformkammer mehr mögliche Kontaktfläche auf, als für den Prozess notwendig ist. Weiter führt eine Vergrößerung der Spreizzone zu einer Erhöhung der Distanz der Matrizenstirnseite zum Walzspalt. Eine Vergrößerung

der Höhe der Matrizenstirnseite h_0 nach Abbildung 2.10b ist die Folge. Hierdurch verschlechtert sich das Umformverhältnis, welches sich aus der Fläche der Matrizenstirnseite A_2 und der Querschnittsfläche des Drahtes A_3 ergibt.

7.1.2 Kinematische Zusammenhänge zwischen den Kontaktpartnern

Nach der Durchführung der experimentellen Anlagenversuche verblieben Rückstände von Aluminium auf den Arbeitswalzen (siehe Bild 6.1). Die Gestalt der Anhaftungen im Walzenrund unterscheidet sich von derjenigen der Anhaftungen an den Walzenflanken. Die Charakteristik der im Walzenrund verbleibenden Rückstände wird durch in Umfangsrichtung orientierte Striemen beschrieben; die der Walzenflanken vornehmlich durch Abplatzungen.

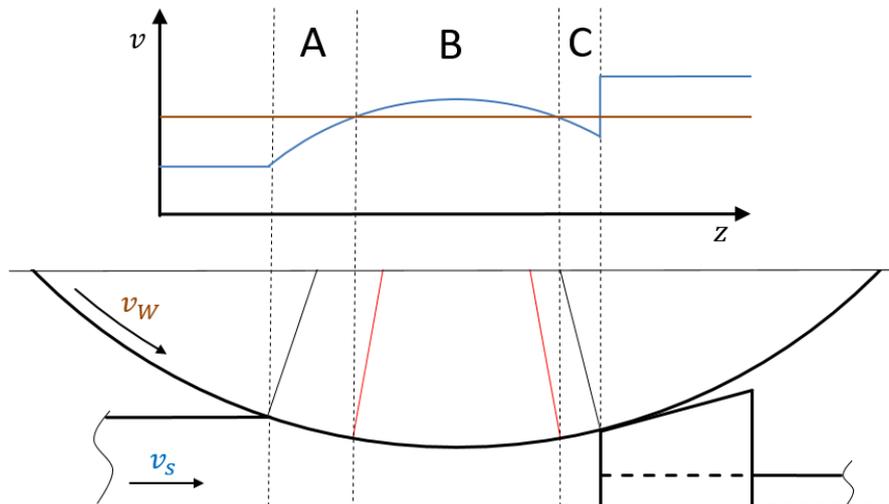


Abbildung 7.2: Unterteilung der Umformzone nach den Geschwindigkeitsverhältnissen zwischen Walze und Werkstück in:

- A - Nacheilzone $v_W > v_S$
- B - Voreilzone $v_W < v_S$
- C - Nacheilzone $v_W > v_S$

Zur Erklärung der sich ergebenden Gestalt der Aluminiumrückstände im Walzenrund wird in Abbildung 7.2 ein Beispiel der resultierenden Relativgeschwindigkeiten in der horizontalen Kontaktfläche zwischen Walze und Werkstück gegeben. Der untere Teil der Darstellung zeigt einen Teil der Arbeitswalze, welche mit der Bahngeschwindigkeit v_W rotiert, sowie eine halbe sich mit der Geschwindigkeit v_S in Prozessrichtung bewegendes Werkstückgeometrie. Aufgrund der sich ändernden Querschnittsfläche über die Länge der Umformkammer ändert sich die Werkstückgeschwindigkeit während der Umformung.

Das im oberen Teil der Darstellung befindliche Diagramm stellt die qualitativen Verläufe der beiden Geschwindigkeiten über die Länge des Prozesses einander gegenüber. Für den Vortrieb des Werkstückes ist die Komponente der Bahngeschwindigkeit (braun) der Walze in Prozessrichtung ausschlaggebend. In dem gezeichneten Diagramm wird diese vereinfacht mit der konstanten Bahngeschwindigkeit gleichgesetzt. Wird angenommen, dass die Stranggeschwindigkeit v_S (blau) vor dem Kontakt mit den Walzen geringer ist als v_W , so steigt diese mit abnehmender Querschnittsfläche in Prozessrichtung an. Dieser in der Abbildung mit A gekennzeichnete Bereich kann analog zum konventionellen Walzprozess als Nacheilzone bezeichnet werden. Haben Walze und Werkstück die gleiche Geschwindigkeit, so haben sie keine Relativbewegung zueinander. Dieser als Fließscheide benannte Punkt kennzeichnet die Umkehr der Geschwindigkeitsverhältnisse der Kontaktpartner. In der nachfolgenden Voreilzone (B) ist die Stranggeschwindigkeit größer als die Bahngeschwindigkeit der Walzen. Bis zum Walzspalt sind die beschriebenen Verhältnisse mit denen des konventionellen Walzprozesses vergleichbar und die diesbezügliche Nomenklatur ist anwendbar [Lan88]. Aufgrund der erneuten Zunahme der Querschnittsfläche in der Spreizzone der Umformkammer sinkt die Stranggeschwindigkeit hinter dem Walzspalt ab. Es bildet sich eine zweite Fließscheide, welche den Ort der erneuten Umkehr der Geschwindigkeitsverhältnisse markiert. Bis zur Matrizenstirnseite eilt das Werkstück im Bereich C erneut nach.

Die betrachteten Geschwindigkeiten von Walzen und Werkstück sowie deren Relationen zueinander sind in Prozessrichtung orientiert. Es liegt kein Einfluss von sich relativ zueinander bewegenden Bestandteilen der Arbeitswalzen vor. Abplatzungen, welche entsprechend den metallographischen und numerischen Ergebnissen innerhalb der Spreizzone am Walzenrund der I-Walze durch Kontaktverlust zwischen Werkstück und Walze entstehen können, werden in der Stauchzone vor der Matrize durch neue Anhaftungen aufgrund der vollständigen Materialfüllung der Umformkammer vor dem Austritt der Walzenoberfläche beseitigt.

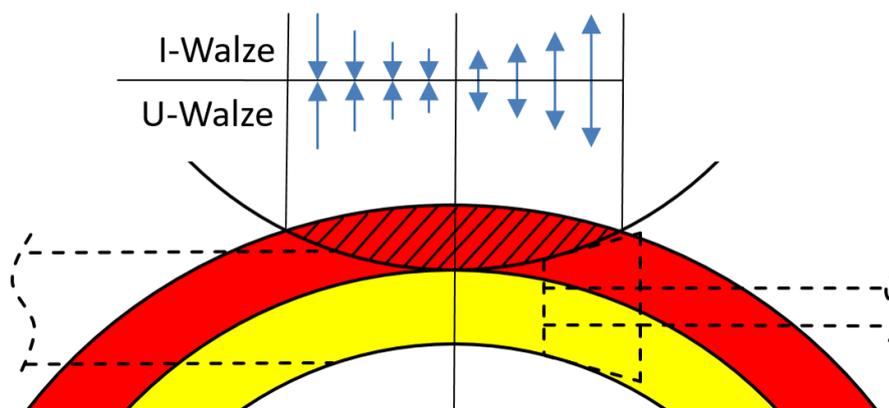


Abbildung 7.3: Arbeitswalzenflächen beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Eine Erklärung der undefiniert zerrütteten Anhaftungen an den Walzenflanken kann durch eine Betrachtung der kinematischen Zusammenhänge zwischen den Walzenflanken während des Umformprozesses gegeben werden. Die Abbildung 7.3 zeigt hierzu eine schematische Darstellung des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses. Das Werkstück und die Matrize sind mit gestrichelten Linien angedeutet. Die untere der beiden Walzen stellt die U-Walze dar. Die vertikale Flanke dieser Walze wird durch ihre Farbgebung in zwei unterschiedliche Bereiche unterteilt. Der untere gelbe Teil kommt während des Umformprozesses nur mit der vertikalen Kante des Werkstückes in Kontakt. Der in einem größeren Radius liegende und rot eingefärbte Bereich der vertikalen Arbeitswalzenflanke kommt während des Prozesses ebenfalls mit der vertikalen Kante des Werkstückes in Kontakt. Zusätzlich bewegt sich dieser Teil mit einem zuvor eingestellten Spaltmaß an der vertikalen Flanke der oberen I-Walze vorbei. Dieser in der Darstellung schraffiert hervorgehobene Bereich kann als Dichtfläche der Umformkammer interpretiert werden. Werkstückwerkstoff, der die Umformkammer verlassen möchte, muss diese Fläche überwinden. Die schraffiert dargestellte Dichtfläche ist nicht statisch, da die Arbeitswalzenflanken während des Prozesses in gegensätzliche Richtungen rotieren. Die Orientierungen der horizontalen Geschwindigkeitskomponente der I- und der U-Walze sind identisch. Sie unterscheiden sich je nach Höhe nur geringfügig in ihrem Betrag. Die vertikalen Geschwindigkeitskomponenten der I- und der U-Walze sind gegensätzlich orientiert, wobei in der Walzwerksachse ein Wechsel dieser Orientierung stattfindet. Die blau gefärbten Pfeile der Darstellung 7.3 zeigen diese Orientierung. Die Länge der Pfeile deutet die Veränderung des Betrages der vertikalen Geschwindigkeitskomponenten hin zur Walzwerksachse an. Gemäß der Orientierung der Geschwindigkeitskomponenten kann der Dichtflächenbereich auf der Einlaufseite des Werkstückes als Druckbereich und der Dichtflächenbereich hinter dem Walzspalt als Zugbereich tituliert werden.

7.2 Anwendbarkeit der FEM zur Prozessbeschreibung

7.2.1 Gemessene und berechnete Drehmomente

Die Abbildung 7.4 zeigt die gemessenen und unter der Annahme von Haftreibung berechneten Drehmomentverläufe am Beispiel der Variante 1 der Anlagenversuche. Aufgrund der unterschiedlich ausgewerteten Zeitspannen wurde die Auswertedauer der Simulation (0,3 s) für die gegebene Darstellung entsprechend der Messung (15 s) skaliert. Zu erkennen ist, dass trotz der Schwankungen aller Verläufe der berechnete Verlauf innerhalb des gemessenen Drehmomentbereiches der 3 durchgeführten Versuche liegt.

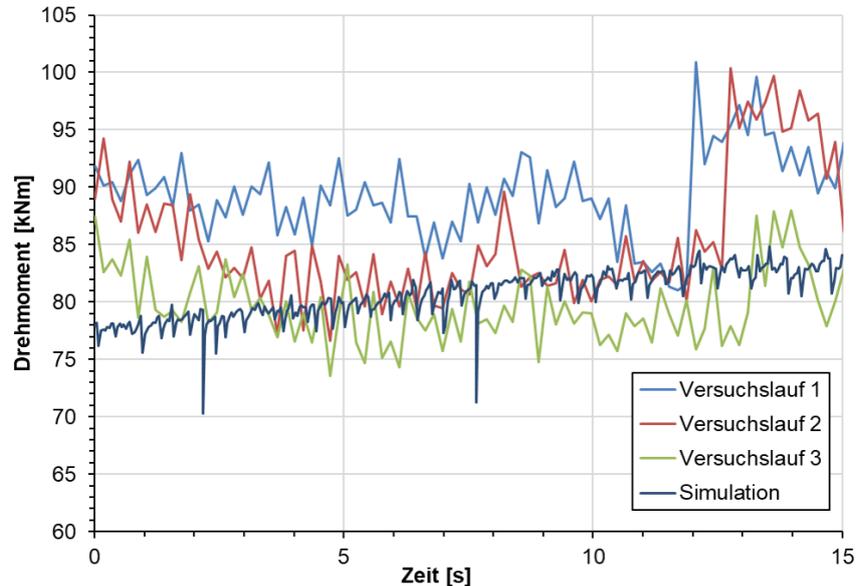


Abbildung 7.4: Vergleich der gemessenen und berechneten Drehmomentverläufe am Beispiel der Versuchsvariante 1 ($\varnothing_{\text{Draht}} = 15 \text{ mm}; n = 2,75 \text{ U/min}$)

Die über den Motorstrom festgehaltenen Drehmomente bei den experimentellen Anlagenversuchen unterliegen Schwankungen. Die Rohdaten aller Versuchsläufe der Versuchsvariante 1 aus Abbildung 7.4 weisen eine maximale Abweichung von 32 % auf. Dieser Sachverhalt kann auf mehrere Einflüsse zurückgeführt werden. Die zusammengefassten Messwerte wurden durch mehrere Einzelversuche und nicht aus dem kontinuierlichen Anlagenbetrieb aufgenommen. Die Randbedingungen der einzelnen Versuche einer Versuchsreihe unterliegen Schwankungen. Die Messung der Eingangstemperatur der Versuchsstücke wurde nur partiell durchgeführt. Die Temperaturverhältnisse innerhalb der Anlage sind nicht konstant. Sie werden durch die Vorversuche beeinflusst. Weiter wurde der Durchfluss der Walzeninnenkühlung nicht messtechnisch erfasst. Die Arbeitswalzentemperatur beeinflusst durch die Entnahme von Wärmeenergie aus dem Werkstück dessen Umformwiderstand und somit direkt das zur Umformung erforderliche Drehmoment.

Trotz der Schwankungen in den gemessenen Drehmomenten sind bei dem Vergleich der verschiedenen Versuchsvarianten deutliche Trends erkennbar. Bei den Versuchsreihen 1-3 wurden kleiner werdende Drahtdurchmesser bei konstanter Drehzahl von $2,75 \frac{\text{U}}{\text{min}}$ getestet. Bei kleiner werdendem Drahtdurchmesser steigt das erforderliche Drehmoment. Der Vergleich des kombinierten Prozesses mit dem konventionellen Strangpressprozess liefert die Erklärung für dieses Phänomen. Bei allen analytischen Formulierungen zur Bestimmung der erforderlichen Presskraft steigt diese mit der Vergrößerung des Querschnittsverhältnisses $\frac{A_0}{A_1}$ [Kop99] [Hen78] [Mue07]. Der Vergleich der Drehmomente der

Versuchsreihen 1-3 mit denen der Versuchsreihen 4-6, welche bei einer höheren Drehzahl von $4,7 \frac{U}{min}$ durchgeführt wurden, zeigt einen weiteren Trend. Alle Drehmomente, die bei gleichen Drahtaustrittsquerschnitten und höheren Drehzahlen aufgenommen wurden, erfordern ein geringeres Drehmoment als ihre langsamer durchgeführten Versuchspendants. Als Ursache für die Abnahme des erforderlichen Momentes bei steigender Drehzahl kann der geringere Temperaturverlust des Werkstückes durch eine kürzere Kontaktzeit zu den Arbeitswalzen identifiziert werden.

Die aus den numerischen Simulationen berechneten Drehmomente zwischen Werkstück und Werkzeug zu den experimentell durchgeführten Versuchen unterliegen nicht den beschriebenen Schwankungen, wie sie bei den experimentellen Messungen zu verzeichnen waren. Das Moment eines einzelnen Versuchs konnte aus einem stationären Bereich der Simulation (entsprechend dem Bereich 5 der Darstellung 6.6) gemittelt werden. Die Berechnung des arithmetischen Mittelwertes über einen bestimmten Zeitraum dient der Eliminierung von Schwankungen im Simulationsergebnis. Die Ursache dieser Schwankungen ist in der Methode der numerischen Umformsimulation zu finden. Zum einen unterliegen die Knoten und Elemente des diskretisierten Werkstückes in einem Inkrement nicht immer den gleichen Verschiebungen, was zu variierenden Kontaktsituationen zwischen Werkstück und Werkzeugen führt. Zum anderen bedingen die aufgrund der großen Verzerrungen notwendige Neuvernetzung des Werkstückes und die damit verbundene Übertragung der berechneten Ergebnisgrößen vom alten auf das neue Netz Abweichungen in den Ergebnissen zwischen den einzelnen Berechnungsschritten. Diese beschriebenen Sachverhalte und Zusammenhänge sind sowohl für die Simulationen unter der Annahme von Haftreibung als auch für die Simulationen unter Verwendung des Reibmodells gültig.

Der Vergleich der Tendenz der Ergebnisse der Simulation unter der Annahme von Haftreibung der Versuche 1-3 zeigt, dass bei gleich bleibender Walzengeschwindigkeit eine Zunahme des Momentes bei gleichzeitiger Zunahme des Umformverhältnisses auftritt. Der Vergleich der Versuche 4-6 bestätigt diese Tendenz. Identisch zu den experimentell ermittelten Drehmomenten ist eine Abnahme der Momente bei einer Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der Walzen erkennbar. Einzig das simulierte Drehmoment des Versuches 6 passt nicht in das beschriebene Verhalten des Prozesses. Das Moment dieses Versuches liegt mit 101 kNm minimal höher als das Moment des geometrisch vergleichbaren, aber langsameren dritten Versuches. Diese Abweichung im berechneten Verhalten der Prozessgröße kann verschiedene Ursachen haben, die im Berechnungsmodell, in der experimentellen Messung, in einer Kombination aus beiden Ergebnisabweichungen oder in einem Effekt im Prozess gefunden werden können.

Das Verhalten des unter Anwendung des Reibmodells nach Rechenvorschrift 6.1 und Parametervorgabe 6.3 berechneten Drehmoments ist mit dem Verhalten der experimentellen und unter der Annahme von Haftreibung simulierten Drehmomente vergleichbar. Mit zunehmendem Umformverhältnis steigt das Drehmoment bei konstant bleibender Rota-

tionsgeschwindigkeit der Walzen. Ebenso sinkt das berechnete Moment bei steigender Rotationsgeschwindigkeit im Vergleich der einzelnen, geometrisch identischen Versuche untereinander. Auch bei der Simulation mit dem Reibmodell durchbricht der Versuch 6 das zuvor beschriebene tendenzielle Verhalten des Drehmomentes. Bei der Berechnung mittels Reibmodell mit 115 kNm liegt es deutlich höher als in den zuvor beschriebenen Ergebnissen. Die wiederholte Beobachtung bei gleichzeitig stärkerer Ausprägung dieses Effektes in den berechneten Drehmomenten stützt die Annahme, dass die Ursache in einem für den kombinierten Walz- und Strangpressprozess charakteristischen Effekt gründet.

Tabelle 7.1: Vergleich der unterschiedlich ermittelten Drehmomente und Abweichungen der berechneten zu den gemessenen Werten

Nr.	Gemessen	FEM ($m = 1$)		FEM (Reibmodell)	
		Wert	Abweichung	Wert	Abweichung
	kNm	kNm	%	kNm	%
1	84	81	3,6	81	3,6
2	95	92	3,2	92	3,2
3	108	100	7,5	100	7,5
4	68	75	9,4	72	4,0
5	81	83	2,5	84	1,2
6	95	101	6,0	115	17,4

Eine Gegenüberstellung der absoluten Werte der unterschiedlich ermittelten Drehmomente zu den verschiedenen Versuchen bzw. Versuchsreihen wird in Tabelle 7.1 unternommen. Bei den Versuchsvarianten 1-3 mit geringerer Drehzahl ist kein Unterschied zwischen den unterschiedlichen FEM-Berechnungen zu erkennen. Die simulierten Momente liegen bei beiden Berechnungsvarianten unter den gemessenen Werten aus den Anlagenversuchen. Dieser systematisch auftretende Fehler muss in den angenommenen Randbedingungen der Simulationsmodelle liegen, welche sich lediglich in der Modellierung der Reibung voneinander unterscheiden. In den Versuchen 1 und 2 liegt die absolute Abweichung unter 5 %, in Versuch 3 mit 7,5 % leicht darüber. Bei den Versuchsvarianten 5-6 mit der höheren Rotationsgeschwindigkeit stimmen die errechneten Drehmomente unter Annahme von Haftreibung und unter Einsatz des entwickelten Reibmodells nicht überein. Die Berechnung mit Reibmodell liegt bei Versuch 4 unter der Berechnung mit Haftreibung und bei den Versuchen 5 und 6 darüber. Dabei nimmt die Abweichung von 1,2 % in Versuch 5 zu 12,2 % in Versuch 6 deutlich zu. Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass die durchgeführten Simulationen bei den geringeren Walzengeschwindigkeiten die gemessenen Werte tendenziell unterschätzen, keine Unterschiede beider Berechnungsmethoden bei den geringeren Walzengeschwindigkeiten bzgl. der Bestimmung des Drehmomentes erkannt wurden, eine Überschätzung des Drehmomentes beider Berechnungsmethoden bei den höheren Walzengeschwindigkeiten auftritt und die Un-

terschiede beider Berechnungsmethoden bei zunehmender Rotationsgeschwindigkeit der Walzen und zunehmendem Umformverhältnis bzgl. des Drehmomentes höher werden.

Mit Ausnahme der Abweichung von 17,4 % der Simulation der Versuchsvariante 6 unter Anwendung des Reibmodells liegen alle berechneten Ergebnisse weniger als 10 % von den gemessenen Drehmomenten entfernt. Weiter stimmen die Tendenzen der simulierten Momente mit den gemessenen Tendenzen gut überein. Unter Berücksichtigung der aus den industriellen Randbedingungen resultierenden hohen Streuung und der teilweise nicht exakt ermittelten Randbedingungen kann die Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Drehmomente als gut bezeichnet werden. Die numerische Umformsimulation ist als Methode zur Berechnung des Momentes unter den hier gegebenen Randbedingungen geeignet.

7.2.2 Gemessene und berechnete Temperaturen

Als Gründe für die breite Streuung der gemessenen Ein- und Ausgangstemperaturen des Versuchsmaterials in Teildarstellung 6.5a aus Abschnitt 6.1.2 wurden zum einen die Verfügbarkeit von nur einem Kontaktthermometer und zum anderen die schlechte Zugänglichkeit des Drahtaustrittsbereiches benannt. Da die gemessenen Eingangstemperaturbereiche identisch sind und die Eingangstemperatur in der Simulation als Randbedingung des Modells vorgegeben wird, beschränkt sich die Tabelle 7.2 auf die Gegenüberstellung der unterschiedlich ermittelten Drahtaustrittstemperaturen und der Abweichungen der berechneten Werte zu den korrespondierenden Messbereichen aus den Versuchen.

Bei zunehmendem Umformverhältnis bzw. bei kleiner werdenden Drahtquerschnitten steigt der Messbereich der Ausgangstemperatur. Das größere Umformverhältnis erfordert eine höhere Formänderungsarbeit. Diese Formänderungsarbeit wird zu 85 % – 95 % in Wärmeenergie umgewandelt (Dissipation), welche im austretenden Draht gemessen werden kann [Kop99]. Dieser Trend ist sowohl in den Berechnungen unter Annahme von Haftreibung als auch in den Berechnungen unter Anwendung des Reibmodells erkennbar. Einzige Ausnahme ist die Simulation der Versuchsvariante 6 unter Anwendung des Reibmodells. Hier fällt die Temperatur gegenüber den Versuchsvarianten mit geringerem Umformverhältnis und gleicher Rotationsgeschwindigkeit der Walzen. Die Untersuchung der berechneten Temperaturen zeigt weiter eine Zunahme der Drahtaustrittstemperatur bei zunehmender Rotationsgeschwindigkeit der Arbeitswalzen. Einzige Ausnahme bei dieser Beobachtung ist wieder die simulierte Versuchsvariante 6 unter Anwendung des Reibmodells.

Tabelle 7.2: Vergleich der unterschiedlich ermittelten Ausgangstemperaturen und Abweichungen der berechneten Werte zu den gemessenen Bereichen

Nr.	Gemessen	FEM ($m = 1$)		FEM (Reibmodell)	
		Wert	Δ Messbereich	Wert	Δ Messbereich
	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	$^{\circ}C$
1	320 - 370	305	15	295	25
2	300 - 350	324	0	315	5
3	300 - 350	334	0	325	0
4	320 - 370	318	2	320	0
5	300 - 350	338	0	328	0
6	300 - 350	343	0	303	0

Der Vergleich von gemessenen Eingangstemperaturbereichen mit den gemessenen Bereichen der Ausgangstemperaturen zeigt deren Abfall während des Prozesses bei den gegebenen Randbedingungen. Die berechneten Oberflächentemperaturen zeigen eine identische Tendenz. Über die Genauigkeit der berechneten Ergebnisse kann aufgrund der großen Bereiche der Messungen keine gesicherte Aussage getroffen werden. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass die berechneten Ausgangstemperaturen in den meisten Versuchsvarianten im gemessenen Bereich liegen. Bei den Versuchsvarianten, in denen der errechnete Wert vom gemessenen Wertebereich abweicht, kann mit einer Anpassung der Eingangstemperatur, die weiterhin im gemessenen Eingangstemperaturbereich liegt, der Wertebereich der gemessenen Ausgangstemperatur getroffen werden. Die Zunahme der Ausgangstemperatur der errechneten Varianten bei einer Zunahme der Rotationsgeschwindigkeit der Walzen ist auf die Zunahme der Formänderungsarbeit durch den steigenden Umformwiderstand des Werkstoffes aufgrund der zunehmenden Formänderungsgeschwindigkeit in der Umformzone zurückzuführen.

7.2.3 Gemessene und berechnete Geschwindigkeiten

Die gemessenen Ein- und Austrittsgeschwindigkeiten der Teildarstellung 6.5b und Tabelle 6.1 wurden über die Versuchszeiten und gemessenen Versuchsstücklängen ermittelt. Besonders die ermittelte Versuchszeit unterliegt der Ungenauigkeit des Beobachters. Die Länge des austretenden Drahtes konnte nicht exakt bestimmt werden. Der kombinierte Walz- und Strangpressprozess ist nicht in der Lage, ein Versuchsstück gegebener Länge vollständig durch die Matrize zu verpressen. Grund hierfür ist die Abnahme der Kontaktfläche beim Durchlaufen des Versuchsstückendes durch die Umformkammer. Je weiter sich das Ende des Werkstücks in Richtung der Matrizenstirnseite bewegt, desto geringer wird die für das Verpressen notwendige Kontaktfläche und somit die zur Verfügung stehende Vortriebskraft. In der Folge verbleibt ein Pressrest in der Umformkammer. Der

erste Teil eines Drahtes, welcher aus einem zweiten Versuchsstück entsteht, besteht zum Teil aus dem Pressrest des zuvor prozessierten Versuchsstückes.

Ungeachtet der benannten Ungenauigkeiten bei der Messung können aus ihnen Rückschlüsse auf den Umformprozess gezogen werden. Wird der Austrittsquerschnitt des Drahtes verringert, nimmt die Eintrittsgeschwindigkeit des Drahtes bei gleich bleibender Rotationsgeschwindigkeit der Walzen ab. Aufgrund der konstanten Rotationsgeschwindigkeit der Arbeitswalzen kann eine Zunahme an Schlupf zwischen Werkstück und Werkzeug als einzige mögliche Ursache für diesen Sachverhalt identifiziert werden. Es findet eine Verschiebung der Voreilzone und der Nacheilzone statt. Durch die Zunahme an Schlupf bzw. die Zunahme der Relativbewegung zwischen Werkstück und Walzen reiben beide Kontaktpartner vermehrt gegeneinander. Durch die Zunahme an Reibung entsteht mehr Wärme. Diese kann als zusätzlicher Einflussfaktor auf die steigende Temperatur des austretenden Drahtes bei zunehmendem Umformverhältnis in den simulierten Temperaturergebnissen identifiziert werden. Die signifikante Zunahme der Geschwindigkeit des austretenden Materials bei Verringerung des Austrittsquerschnittes kann durch den physikalischen Zusammenhang der Volumenkonstanz und des darin wirkenden quadratischen Einflusses des Drahtdurchmessers nach Rechenvorschrift 7.1 mit der Nomenklatur der Teildarstellung 2.10b erklärt werden. Aufgrund der beschriebenen Vorgehensweise und der damit verbundenen Schwierigkeiten bei der Geschwindigkeitsmessung ist der in Formel 7.1 angegebene Zusammenhang nicht gewahrt.

$$v_0 * A_0 = v_3 * A_3 = v_3 * \pi * r_3^2 \quad (7.1)$$

Bezüglich der Abnahme der Eingangsgeschwindigkeit bei steigendem Umformverhältnis zeigen die Simulationsergebnisse eine mit den Messungen vergleichbare Tendenz. Die simulierten Ergebnisse liegen in beiden Reibmodellvarianten deutlich unter den gemessenen Werten. Folglich kommt es in der Simulation zu mehr Schlupf als in den Messungen. Vergleicht man die Eingangsgeschwindigkeiten beider Simulationsvarianten, fällt auf, dass bei der Verwendung des Reibmodells geringere Geschwindigkeiten im Vergleich zu den Berechnungen unter der Annahme von Haftreibung ermittelt werden. Erklärt werden kann dieser Effekt durch die geringeren Reibkoeffizienten in den Randbereichen der Kontaktflächen.

Auch für die Ein- und Ausgangsgeschwindigkeiten der beiden Simulationsvarianten ist der Zusammenhang nach Formel 7.1 nicht exakt gegeben. Gründe hierfür liegen in der Mittelung der gemessenen Geschwindigkeiten, sowie in der Methodik bedingten Schwankungen der berechneten Ergebnissen. Auffällig sind die berechneten Ergebnisse der Simulation unter Anwendung des Reibmodells zur Versuchsvariante 6. Für den drastischen Abfall der sich ergebenden Geschwindigkeiten konnte die Ursache bis zum Abschluss der hier durchgeführten Untersuchungen nicht gefunden werden.

Tabelle 7.3: Vergleich der unterschiedlich ermittelten Drahtaustrittsgeschwindigkeiten

Nr.	Gemessen		FEM ($m = 1$)		FEM (Reibmodell)	
	Eingang	Ausgang	Eingang	Ausgang	Eingang	Ausgang
	m/min	m/s	m/min	m/s	m/min	m/s
1	3,1	0,56	2,64	0,31	2,52	0,30
2	3,3	0,65	2,46	0,43	2,46	0,41
3	2,8	1,3	2,28	0,66	2,22	0,64
4	5,3	0,93	4,32	0,51	4,38	0,51
5	5,0	1,13	4,20	0,76	4,14	0,75
6	4,7	1,67	4,02	1,17	1,26	0,36

7.2.4 Ermittelte und errechnete Materialfluss

Die Charakteristik und die Vergleichbarkeit der erzeugten Ergebnisse der experimentell durchgeführten Materialflussuntersuchung und die der zugehörigen Simulation werden anhand der gegenüberstellenden Abbildungen 7.5 bis 7.8 diskutiert. Zusätzlich wird in den Darstellungen aus den unterschiedlichen Ansichten eine Unterteilung der Umformzone entsprechend der Definition nach Abbildung 7.1 vorgenommen.

Abbildung 7.5 stellt die experimentellen Ergebnisse der Computertomographie und die zugehörigen Simulationsergebnisse der Materialflussuntersuchung aus der rechten Ansicht einander gegenüber. Der Vergleich der vertikal verlaufenden ersten Kupferstiftreihe in der Breitzugszone zeigt eine identische Formgebung. Sowohl die Stiftreihe des realen Versuchs als auch deren numerische Nachbildung zeigen eine Verformung der zu den Arbeitswalzen orientierten Randbereiche des Werkstücks. Es kann geschlussfolgert werden, dass sich in beiden im Vergleich stehenden Ergebnissen der Werkstückrand schneller in Prozessrichtung bewegt als der Werkstückkern. Die erste vertikal orientierte Stiftreihe, die sich in der Druckzone der Umformkammer befindet, zeigt sowohl im experimentellen als auch im simulierten Ergebnis eine Zunahme der zuvor charakterisierten Verformung. Die vertikalen Stiftreihen beider Ergebnisse, welche sich kurz vor dem Walzspalt befinden, weisen eine veränderte Gestalt auf. Während die Veränderungen von der ersten zur zweiten Stiftreihe eine reine Zunahme des anfänglich beobachteten Effektes der Voreilung der Randbereiche aufzeigen, ist ein Nachrücken der mittigen Bereiche der vertikalen Stiftreihe kurz vor dem Walzspalt erkennbar. Besonders der untere Stiftbereich der benannten Reihe in der mittigen Darstellung weist einen Knick im zuvor in Prozessrichtung vorgeeilten Randbereich auf. Im korrespondierenden Simulationsergebnis deutet sich ein ähnlicher Effekt an. Die beschriebene Änderung in der sich ausprägenden Gestalt der vertikalen Kupferstiftreihen verstärkt sich in der hinter dem Walzspalt folgenden Spreizzone. Der zuvor als leicht erkennbare Knick im vorgeeilten Randbereich der computertomographischen Darstellung ist nun deutlich ausgeprägt. Ebenso kann diese Charakteristik in der Form in der korrespondierenden Stiftreihe der Simulationsergebnisse erkannt wer-

den. Entgegen den experimentellen Ergebnissen ist beim simulierten Pendant weniger ein Knick, sondern eher ein Übergang in der Richtung der entsprechenden Stiftreihe erkennbar. Die Betrachtung und der Vergleich der zweiten vertikalen Stiftreihe der Spreizzone zeigen eine Abnahme der zuvor ausgebildeten Form. Die Gestalt der letzten vertikalen Stiftreihe der Umformkammer, welche sich in der Stauchzone befindet, zeigt in den experimentellen Ergebnissen eine weitere Abnahme der zuvor entwickelten Form. Die diffuse Gestalt aufgrund hoher Formänderungen der in der Simulation eingesetzten Fließlinien kurz vor der Matrize verhindert die Bewertung von deren Entwicklung und den Vergleich mit den experimentellen Veränderungen in der Verformung.

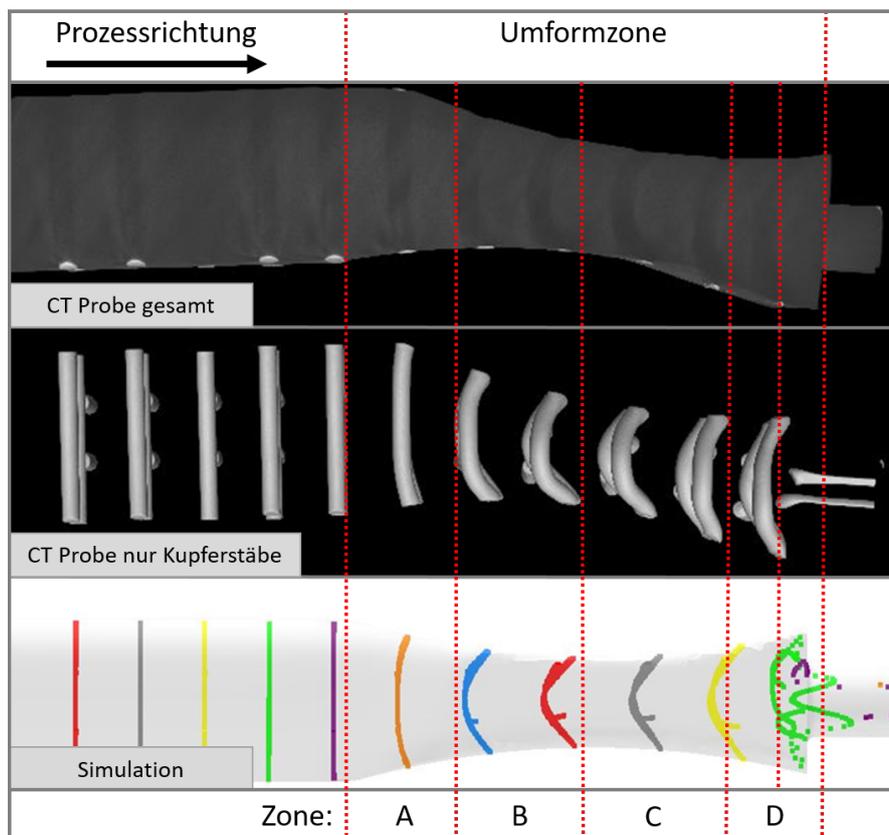


Abbildung 7.5: Gegenüberstellung der experimentellen und simulierten Untersuchungen des Materialflusses aus der rechten Ansicht mit Unterteilung der Umformzone nach Abbildung 7.1 in:

- A - Breitungszone
- B - Druckzone
- C - Spreizzone
- D - Stauchzone

Die Unterteilung der Stauchzone in zwei Bereiche ist deren unterschiedlicher Ausprägung zwischen den experimentellen Ergebnissen und denen der Simulation geschuldet. Nach der in Abschnitt 7.1.1 erarbeiteten Definition des Beginns der Stauchzone beginnt diese in der experimentellen Untersuchung laut Abbildungen 6.36 bis 6.40 der Querschliffproben kurz vor der Matrizenstirnseite. Die Ergebnisse der simulierten Kontaktsituationen nach den Abbildungen 6.15 und 6.22 berechnen einen früheren Beginn dieser Umformzone.

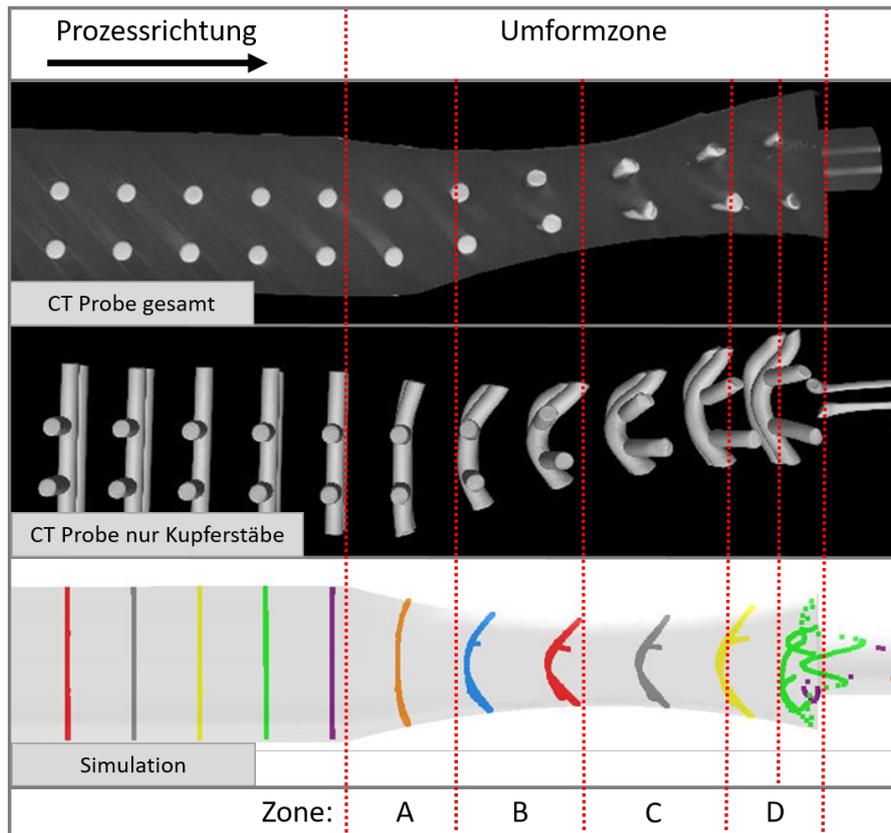


Abbildung 7.6: Gegenüberstellung der experimentellen und simulierten Untersuchungen des Materialflusses aus der linken Ansicht mit Unterteilung der Umformzone nach Abbildung 7.1 in:

- A - Breitzugszone
- B - Druckzone
- C - Spreizzone
- D - Stauchzone

Die Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse aus der Ansicht von links zeigt Abbildung 7.6. Durch die Darstellung der Ergebnisse aus dieser Perspektive ist eine Beurteilung der Entwicklung der Verformung der horizontal ausgerichteten Kupferstiftreihe möglich. Zusätzlich kann die mittig gelegene vertikale Stiftreihe besser betrachtet und bewertet werden, da diese nicht wie in der vorigen Darstellung von der außen liegenden Stiftreihe verdeckt wird.

Die erste horizontal orientierte Stiftreihe innerhalb der Umformzone liegt in der Breitzzone. Weder in der Darstellung der experimentellen Ergebnisse noch in derjenigen der simulierten ist eine Änderung in deren Gestalt erkennbar. Als Ursache hierfür ist der noch fehlende Kontakt der Werkstückseiten zu den Flanken der Arbeitswalzen zu benennen. Es hat noch keine ausreichende Breitung des Versuchsmaterials stattgefunden. Die beiden horizontalen Stiftreihen innerhalb der Druckzone zeigen eine Voreilung der Außenbereiche. Den zugehörigen simulierten Pendanten kann ebenfalls eine Änderung von deren Form entnommen werden. Eine Beurteilung dahingehend, welcher Bereich voreilt, ist aus der gegebenen Perspektive nicht möglich. In den experimentellen Ergebnissen der Spreizzone ist eine deutliche Zunahme der Voreilung der Außenbereiche der horizontalen Stiftreihen erkennbar. In der Spreizzone der Umformsimulation zeichnet sich keine signifikante Veränderung der Form der horizontalen Stifte ab. In der Stauchzone der computertomographischen Darstellung nimmt die Voreilung der Randbereiche der horizontalen Stifte ab. Folglich bewegt sich der Werkstückkern in diesem Bereich schneller als der zu den Walzen orientierte Rand des Werkstücks. Die hohen Verformungen der vergleichbaren Stiftnachbildungen im Stauchbereich der Simulation ermöglichen weder eine Bewertung noch einen Vergleich der entwickelten Formgebung.

Die Untersuchung der mittig gelegenen vertikalen Stiftreihe verdeutlicht die auf Grundlage der Abbildung 7.6 angestellten Beobachtungen bezüglich der Entwicklung ihrer Gestalt. In der computertomographischen Darstellung der Ergebnisse aus dem Versuch ist der zuvor beschriebene Knick in der Voreilung des Randbereiches in der ersten vertikalen mittigen Stiftreihe der Druckzone gut erkennbar. An der näher am Walzspalt befindlichen Stiftreihe der gleichen Darstellung ist diese Charakteristik ebenfalls erkennbar. Am deutlichsten wird diese bei der Betrachtung des ersten vertikalen mittig gelegenen Stiftes in der Spreizzone hinter dem Walzspalt. Bei den folgenden Stiften der betrachteten Reihe nimmt die beschriebene Ausprägung der Formgebung zur Matrize hin wieder ab. Die sich entwickelnde doppelte Richtungsänderung der vertikal orientierten Stifte ist auch bei dem letzten Stift dieser Reihe in der Stauchzone der Umformkammer gut erkennbar. Die diesbezügliche Untersuchung der simulierten vertikalen Stiftreihe bringt aus der gegebenen Perspektive keine neuen Erkenntnisse, da eine Differenzierung zwischen der außen und der mittig gelegenen Reihe nicht möglich ist.

Die Abbildung 7.7 zeigt die Gegenüberstellung der experimentell erzeugten Ergebnisse mit denen der Simulation aus der Ansicht von oben und nimmt erneut eine Unterteilung der Umformzone entsprechend der erarbeiteten Definition nach Abschnitt 7.1.1 vor. Die gegebene Perspektive ermöglicht eine bessere Beurteilung der sich entwickelnden Formänderung der horizontalen Kupferstiftstäbe bzw. von deren Nachbildungen in der Simulation. Zusätzlich wird eine Untersuchung der Breitung der vertikalen außen gelegenen Stiftreihe möglich.

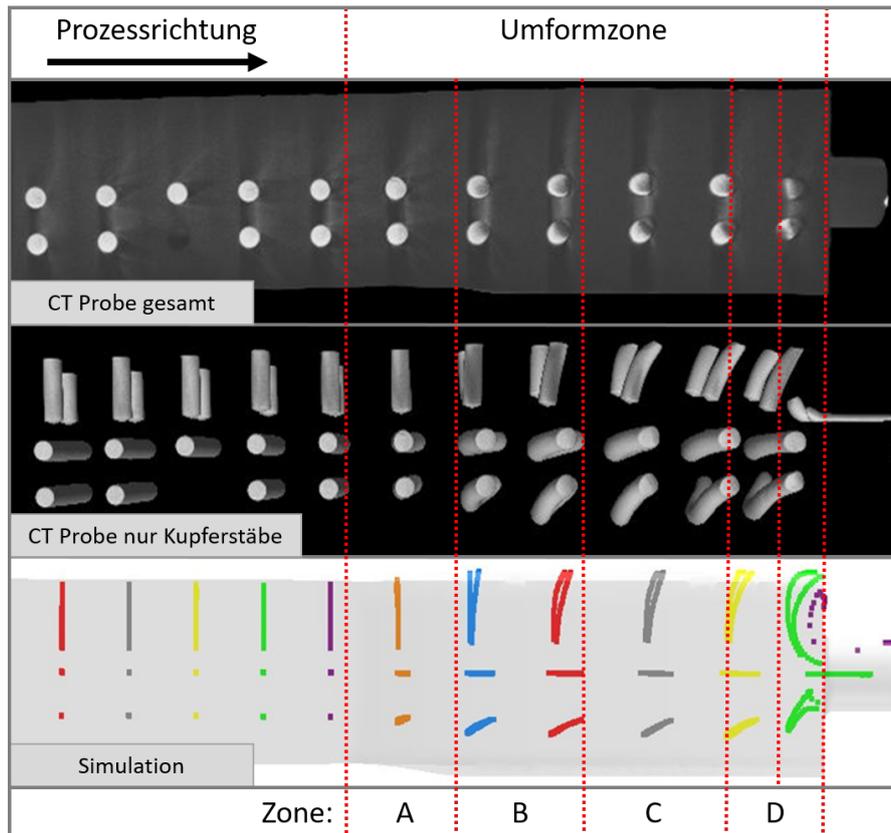


Abbildung 7.7: Gegenüberstellung der experimentellen und simulierten Untersuchungen des Materialflusses aus der Ansicht von oben mit Unterteilung der Umformzone nach Abbildung 7.1 in:

- A - Breitzugszone
- B - Druckzone
- C - Spreitzzone
- D - Stauchzone

Die Darstellung bestätigt die zuvor angestellten Beobachtungen bezüglich der unveränderlichen Gestalt der horizontalen Stifte innerhalb der Breitzugszone. Diese Beobachtung gilt sowohl für die experimentelle als auch für die simulierte Ergebnisdarstellung.

In der Druckzone bewegen sich die Außenbereiche der horizontalen Stifte schneller in Prozessrichtung als deren zur Werkstückmitte orientiertes Ende. Durch die gegebene Perspektive wird die Übereinstimmung dieses Verhaltens zwischen den beiden erzeugten Ergebnissen deutlich. Bezüglich der Entwicklung der Ausprägung dieser Voreilung wird der zuvor beschriebene Unterschied zwischen den experimentellen und den simulierten Ergebnissen in der Ansicht von oben erkennbar. Während die Voreilung bei dem real durchgeführten Versuch stetig in Prozessrichtung zunimmt, bleibt diese beim simulierten Ergebnis bis zur Stauchzone vergleichsweise konstant. Erst kurz vor der Matrizenstirnseite wird das zum Werkstückkern orientierte Stiftende in die Matrizenöffnung gezogen, was zu einer deutlichen Veränderung in der Form des Stiftes führt.

Die Untersuchung und der Vergleich der Formentwicklung der außen gelegenen vertikalen Stiftreihen zeigen eine Charakteristik. Bei beiden Ergebnissen verformt sich die Stiftmitte in Richtung des Werkstückrandes. Auch der Vergleich dieses Effektes der Verformung zeigt eine höhere Ausprägung bei den experimentellen Ergebnissen als bei der Simulation. Während die Ergebnisse des realen Versuchs noch eine deutliche Zunahme der Breite vom ersten zum zweiten Stift der betrachteten Reihe innerhalb der Druckzone aufweisen, bleibt die berechnete Breite der zugehörigen Nachbildungen ab dem ersten Stift in der Druckzone unverändert. Im Verformungsverhalten vergleichbar ist das Zurückgehen der Breite der Stiftmitten in der Stauchzone der Umformkammer.

Die letzte von unten betrachtende Perspektive der Gegenüberstellung der experimentell ermittelten und mittels numerischer Umformsimulation nachgebildeten Ergebnisse der Materialflussuntersuchung wird in Abbildung 7.8 gegeben. Aus der vergleichenden Darstellung können keine zusätzlichen Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Zuvor beschriebene Erkenntnisse bezüglich der Breite der mittleren Bereiche der außen gelegenen vertikalen Stiftreihe werden ebenso durch die Abbildung bestätigt wie das Verhalten der Voreilung der horizontal orientierten Stifte.

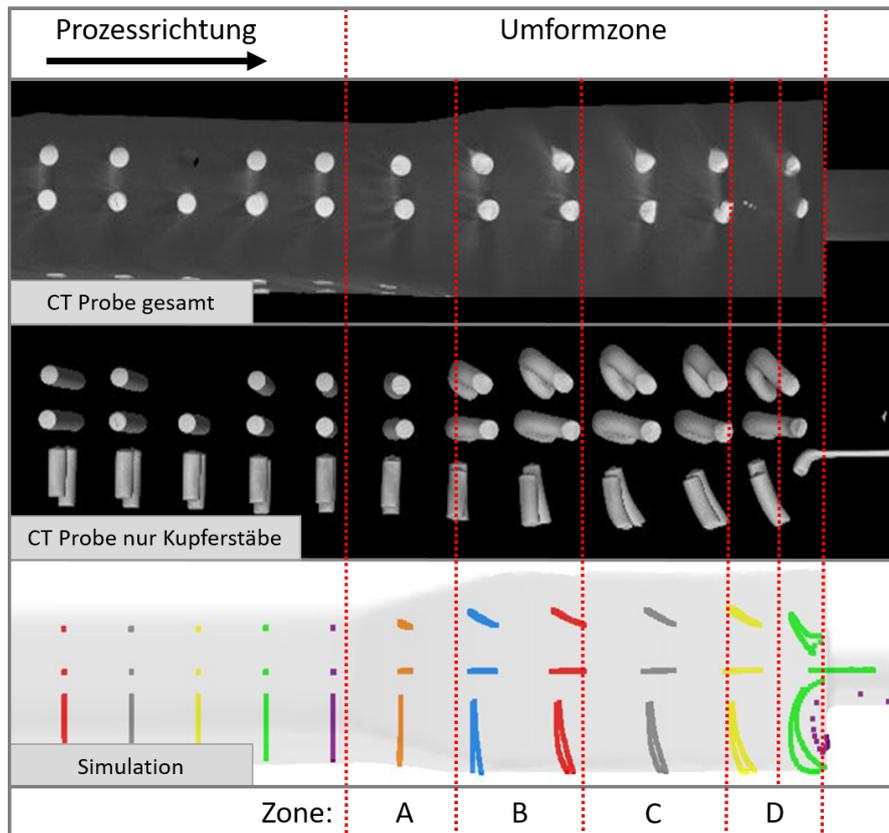


Abbildung 7.8: Gegenüberstellung der experimentellen und simulierten Untersuchungen des Materialflusses aus der Ansicht von unten mit Unterteilung der Umformzone nach Abbildung 7.1 in:

- A - Breitzzone
- B - Druckzone
- C - Spreizzone
- D - Stauchzone

Durch die örtliche und zeitliche Auflösung der Ergebnisse der numerischen Simulation ist eine Darstellung der Verteilung der Geschwindigkeiten des Werkstückes in Prozessrichtung möglich. Die Darstellung 7.9 zeigt die sich einstellenden Geschwindigkeiten im mittigen Längsschnitt der Simulation des experimentell durchgeführten Versuches zur Untersuchung des inhärenten Stoffflusses. Es ist erkennbar, dass zum Beginn des Kontaktes zwischen dem Werkstück und den Arbeitswalzen der Randbereich des Werkstückes eine höhere Geschwindigkeit in Prozessrichtung aufweist als dessen Kern. Kurz vor dem Walzspalt nimmt die Geschwindigkeit im Kern derart zu, dass sich die Geschwindigkeiten am Rand und im Kern auf einem identischen Niveau befinden. Im Walzspalt haben sich die Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen den Randbereichen und dem Kern des Werkstückes umgekehrt. Der Kern bewegt sich mit einer höheren Geschwindigkeit in

Prozessrichtung als der mit den Arbeitswalzen in Kontakt stehende Randbereich. In der Spreizzone des Umformraumes gleichen sich die Materialflussgeschwindigkeiten von Rand und Kernbereich wieder einander an. In Prozessrichtung betrachtet erfolgt anschließend eine erneute Umkehr der Geschwindigkeitsverhältnisse und der Randbereich des Werkstückes wird schneller als dessen Kern. Im Bereich kurz vor der Matrizenöffnung werden durch die Darstellung der Verteilung der Geschwindigkeiten die Parallelen des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses zur Ausprägung der Toten Zone und der Umformzone beim indirekten Strangpressen entsprechend der Teildarstellung 2.7d ersichtlich. In den Bereichen ober- und unterhalb der Matrizenöffnung entwickeln sich halbkreisförmige Bereiche ohne Materialflussgeschwindigkeit in Prozessrichtung. Diese Bereiche können mit der Toten Zone beim indirekten Strangpressen verglichen werden und stimmen gut mit der Ausprägung der Mikrostruktur des Flachschliffes in Abbildung 6.30 überein.

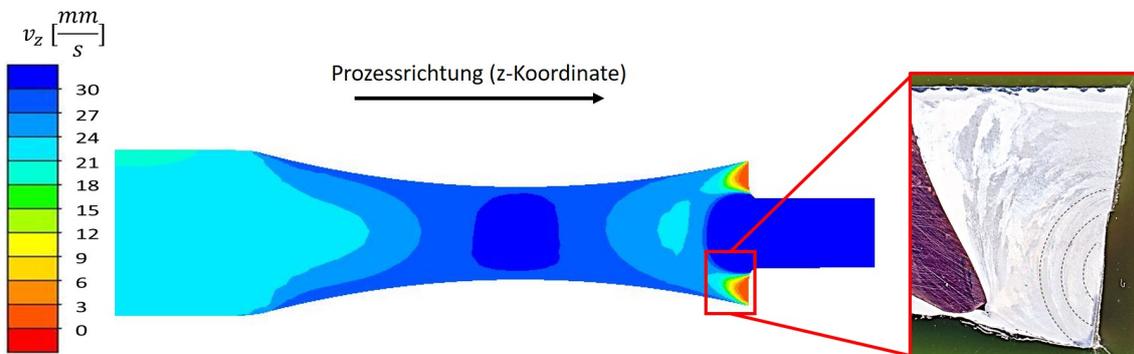


Abbildung 7.9: Simulierte Verteilung der Werkstückgeschwindigkeit in Prozessrichtung zur experimentell durchgeführten Materialflussuntersuchung im mittigen Längsschnitt und Gegenüberstellung mit der toten Zone aus der metallografischen Untersuchung

Die beschriebene Änderung der Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen dem Werkstückrand und dem Werkstückkern erklären die in den experimentellen und simulierten Ergebnissen beobachteten Entwicklungen der Form der vertikalen Stiftreihen bzw. von deren Nachbildung in der Simulation. Durch den Wechsel der Geschwindigkeitsverhältnisse von Werkstückrand und -kern kommt es zu dem beobachteten Knick im Randbereich der betrachteten Stifte innerhalb der Druckzone. Die erneute Umkehr der Verhältnisse in der Spreizzone reduziert die Ausprägung dieser zuvor entwickelten Gestalt. Der sich in den experimentellen Ergebnissen deutlich zeigende Effekt kann durch die simulierten Geschwindigkeitsverhältnisse erklärt werden. Die Auswirkung der simulierten Geschwindigkeitsverteilung auf die nachgebildeten Stiftreihen ist im Vergleich zu den Versuchsergebnissen schwächer ausgeprägt.

Im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen und Entwicklungen wurde erstmalig ein numerisches Simulationsmodell entwickelt, welches nachweislich das Materialflussverhalten beim kombinierten Walz- und Strangpressprozess reproduzieren kann. Durch die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des Stoffflusses innerhalb der Umformkammer und deren Vergleich mit den berechneten Ergebnisse aus der entsprechenden Umformsimulation konnten prozesstypische Merkmale identifiziert und deren Vorhersagbarkeit mittels numerischer Methoden nachgewiesen werden. Ein doppelter Wechsel der Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen den horizontalen Werkstückrändern und dem Werkstückkern während der Umformung wurde sowohl in den experimentellen als auch den berechneten Ergebnissen identifiziert. Die Formgebung der vertikalen Stiftreihen aus dem realen Versuch, welche zu dieser Erkenntnis geführt hat, unterscheidet sich leicht von der Formgebung der entsprechenden Ergebnisse aus der Simulation. Während die experimentellen Ergebnisse ein deutliches Knicken der Stifte aufweisen, zeigen die simulierten Stiftverläufe eine schwächer ausgeprägte kontinuierliche Veränderung. Beide Untersuchungsergebnisse verdeutlichen eine Voreilung der Außenbereiche der horizontalen Stiftreihen. Dieser Effekt ist bei den Ergebnissen aus der Umformsimulation schwächer ausgeprägt und verstärkt sich im Gegensatz zu den experimentell ermittelten Stiftverläufen hinter dem Walzspalt nicht weiter. Der Vergleich der makroskopischen Struktur des Werkstückgefüges in den Lichtbildaufnahmen der metallographischen Untersuchungen mit der Verteilung der simulierten Geschwindigkeiten innerhalb des Längsschnittes durch den Werkstückkern zeigt eine gute Übereinstimmung bezüglich der Ausbildung der mit dem konventionellen, indirekten Strangpressverfahren vergleichbaren Toten Zonen.

7.3 Einfluss der Geometrie der Umformung auf Prozessgrößen

7.3.1 Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf das Drehmoment

Die Abbildung 7.10 zeigt das Pareto-Diagramm zur Darstellung der Höhe der Einflüsse der einzelnen Geometrieparameter und von deren Wechselwirkungen auf das im Prozess resultierende Drehmoment. Gezeigt werden die Absolutwerte der standardisierten Effekte aus der Parameterstudie. Die Gesamtmenge der einzelnen Faktoren und die Wechselwirkungen $b_1 * h_1$ und $h_1 * h_2$ überschreiten die Referenzlinie für die statistische Signifikanz und haben in der Folge einen maßgeblichen Einfluss auf das resultierende Drehmoment [Gue15]. Die hohe Anzahl der Einfluss nehmenden geometrischen Faktoren zeigt, wie empfindlich das Drehmoment auf Veränderungen der Umformraumgeometrie reagiert. Dies ist als Indikator für eine hohe Relevanz der richtigen Auswahl der einzelnen Geometrieparameter zu verstehen.

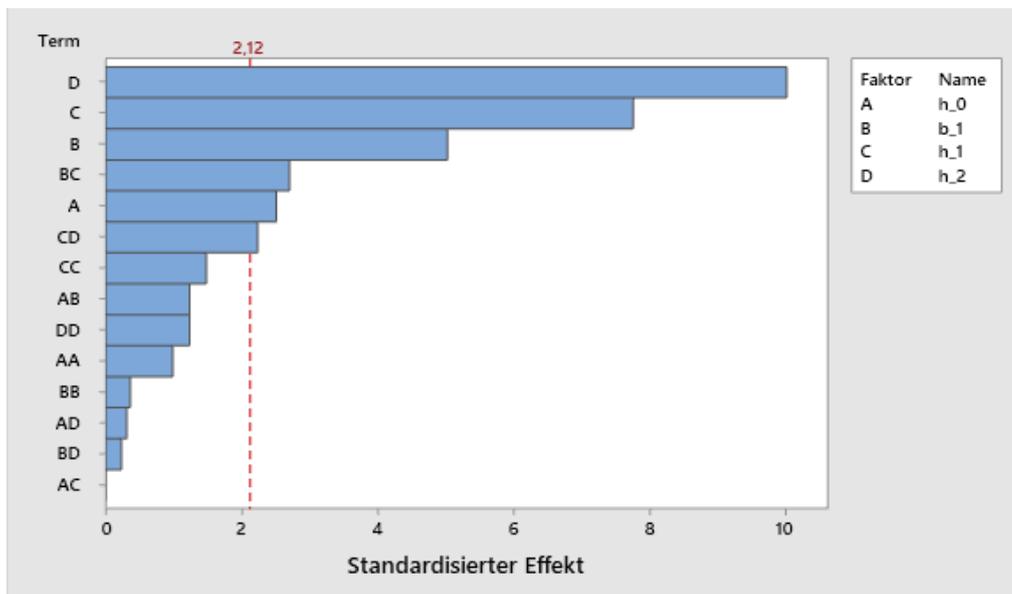


Abbildung 7.10: Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf das Antriebsmoment beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Wie die einzelnen Faktoreinstellungen auf das Drehmoment einwirken, kann aus dem Haupteffektediagramm in Abbildung 7.11 abgelesen werden. Wird für h_0 die Einstellung -1 gewählt, ist der einlaufende Querschnitt halb so hoch wie breit. In diesem Fall ist das erforderliche Antriebsmoment am größten. Wird $h_0 = b_0$ für das einlaufende, rechteckig modellierte Werkstückprofil gewählt, so ist das mittlere erforderliche Moment geringer. Der Verlauf der dargestellten Geraden ist nicht linear. Das geringste Moment für den Haupteffekt h_0 liegt zwischen den Faktoreinstellungen 0 und 1. Der Einfluss der Breite, welcher sich hinter der Faktoreinstellung b_1 verbirgt, ist nahezu linear. Mit zunehmender Breite steigt das für den Umformprozess errechnete Drehmoment. Als Ursache ist die Zunahme der Kontaktfläche zwischen dem Werkstück und den Arbeitswalzen bei zunehmender Breite zu benennen. Die Faktoreinstellung h_1 beschreibt das Verhältnis der Walzspalthöhe zu der Ausgangshöhe h_0 . Bei der Einstellung -1 wurde eine Abnahme von 75 % im Walzspalt angesetzt, bei der Einstellung 1 25 %. Mit zunehmender Abnahme im Walzspalt steigt das Drehmoment signifikant an. Der Verlauf ist nicht linear. In Richtung geringerer Abnahme flacht die Kurve ab. Die Faktoreinstellung h_2 beschreibt die Höhe der Matrizenstirnseite, bestimmt direkt deren Fläche sowie deren Abstand zum Walzspalt und folglich die Größe der Spreizkammer. Je größer diese Einstellung angesetzt wird, desto größer ist das sich ergebende Drehmoment. Der beschriebene Zusammenhang ist nahezu linear.

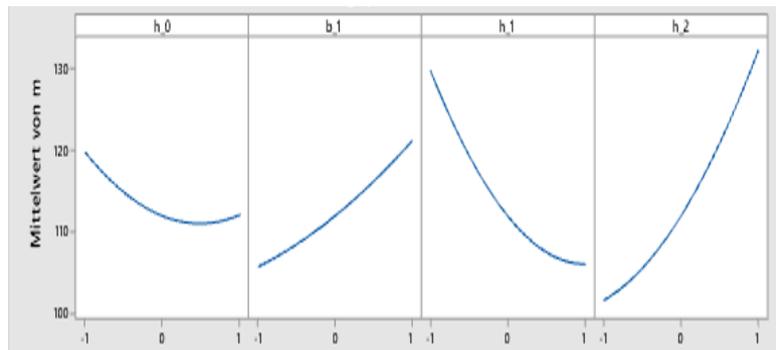


Abbildung 7.11: Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf das Antriebsmoment beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Die überlagerten Auswirkungen der paarweisen Faktoreinstellungen werden im Wechselwirkungsdiagramm 7.12 dargestellt. Wie aus dem Pareto-Diagramm abgelesen wurde, liegt eine signifikante gegenseitige Beeinflussung der beiden Faktorkombinationen $b_1 * h_1$ und $h_1 * h_2$ in Bezug auf das Antriebsmoment vor. Die Höhe der gegenseitigen Beeinflussung der Faktoren zueinander korreliert mit der Höhe der Abweichung der Parallelität deren Verläufe [Kle16].

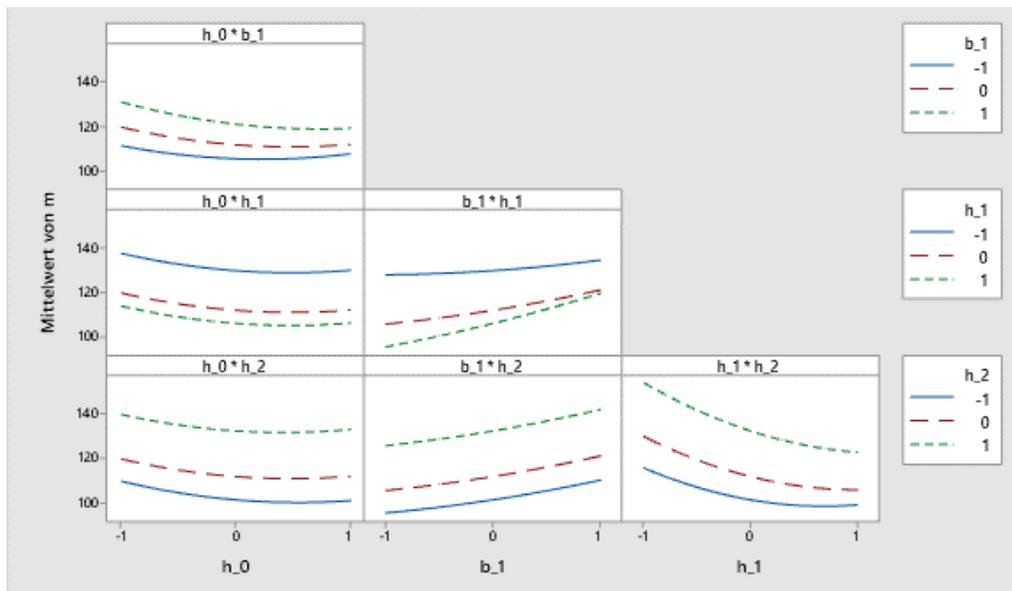


Abbildung 7.12: Wechselwirkungsdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf das Antriebsmoment beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Abschließend ist die hohe Empfindlichkeit des Drehmomentes bei Veränderungen geometrischer Größen des Umformraumes hervorzuheben. Das Drehmoment ergibt sich aus der Kontaktfläche und dem Kontaktdruck innerhalb der Umformkammer. Alle Änderungen geometrischer Größen haben direkten Einfluss auf diese Größen.

7.3.2 Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die Drahtgeschwindigkeit

Laut Pareto-Diagramm in Abbildung 7.13 hat die Abnahme im Walzspalt h_1 im Verhältnis zur Einlaufhöhe des Werkstückes h_0 den größten Einfluss auf die sich ergebende Austrittsgeschwindigkeit des Drahtes bzw. auf den vorherrschenden Schlupf zwischen Werkstück und Arbeitswalzen. Neben diesem Haupteinflussfaktor überschreitet die Wechselwirkung zwischen der einlaufenden Profilhöhe und der Profilbreite $h_0 * b_1$ die Referenzlinie für Signifikanz.

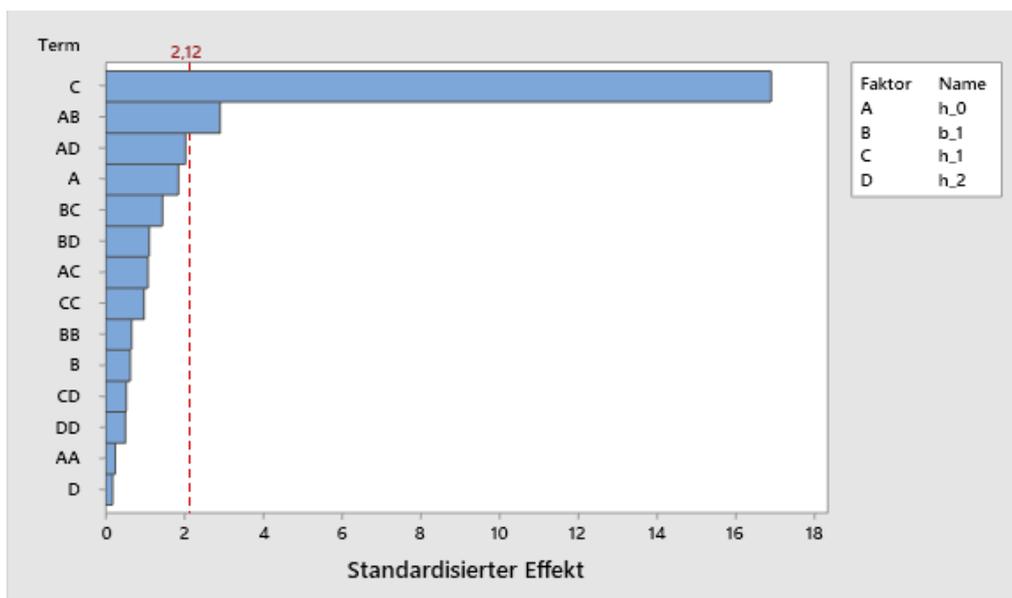


Abbildung 7.13: Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Drahtgeschwindigkeit beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Die Betrachtung des Haupteffektediagramms in Darstellung 7.14 unterstreicht die Erkenntnisse aus dem Pareto-Diagramm und den erkannten Zusammenhängen zwischen der Zunahme an Schlupf bei gleichzeitiger Zunahme an Umformgrad aus den experimentell durchgeführten Versuchen. Wird im Prozess eine Abnahme von 75 % gewählt, liegt die gemittelte Drahtgeschwindigkeit bei unter $800 \frac{mm}{s}$. Die Einstellung des Walzspaltes auf 25 % hat eine Verdopplung der Austrittsgeschwindigkeit zur Folge. Der beschriebene Zusammenhang verhält sich nahezu linear. Die Austrittsgeschwindigkeit des Drahtes in den

Simulationen wird maßgeblich vom Schlupf zwischen dem Werkstück und den Arbeitswalzen beeinflusst. Es ist festzuhalten, dass aus einer steigenden Abnahme im Walzspalt eine Zunahme an Schlupf zwischen beiden Kontaktpartnern resultiert.

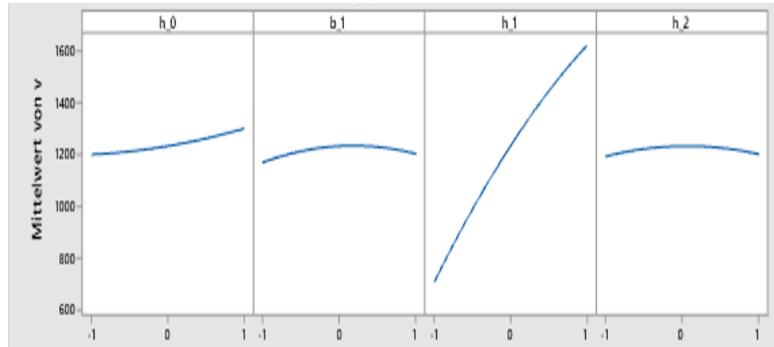


Abbildung 7.14: Haupteffektediagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Drahtgeschwindigkeit beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Der Betrag der Nichtlinearität zwischen den Faktoren h_0 und b_1 zeigt den signifikanten Einfluss dieser Wechselwirkung auf die resultierende Drahtgeschwindigkeit. Die Charakteristik des Diagramms zu den Faktoren h_0 und h_2 ist ähnlich. Ihr Betrag in der Abweichung liegt jedoch leicht unter der Referenzlinie für einen als signifikant zu wertenden Einfluss.

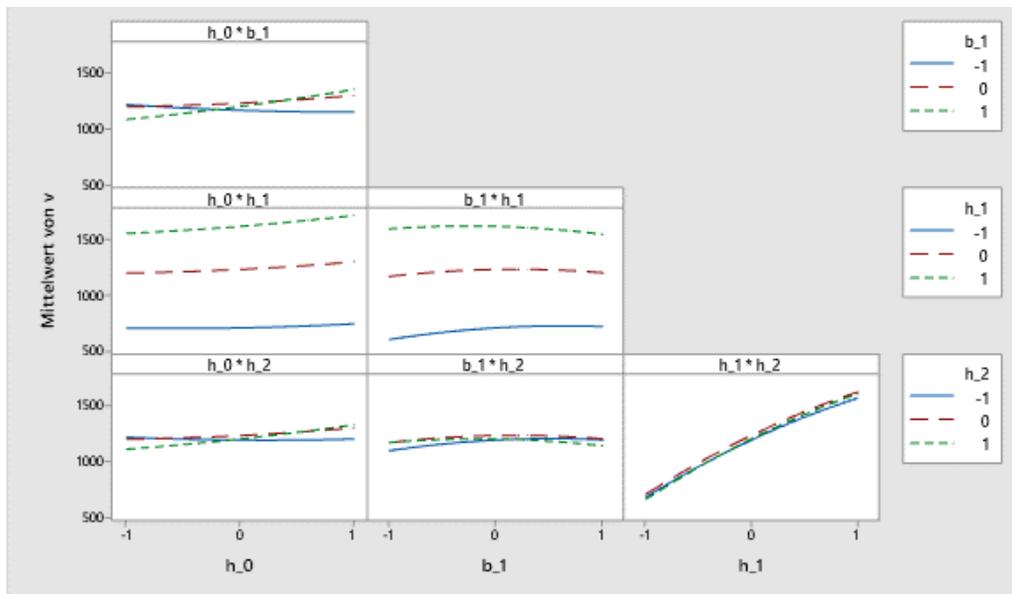


Abbildung 7.15: Wechselwirkungsdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Drahtgeschwindigkeit beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Bezüglich des Einflusses geometrischer Größen der Umformkammer beim kombinierten Walz- und Strangpressprozess auf die resultierende Drahtaustrittsgeschwindigkeit ist der große Einfluss der Walzspaltabnahme festzuhalten. Eine Vergrößerung der eingestellten Reduktion um 50 % führt in den durchgeführten Berechnungen zu einer Halbierung der Drahtaustrittsgeschwindigkeit. Die Art der gegenseitigen Einflussnahme der geometrischen Gestalt des Gussprofils und der zugelassenen Breitung wird durch die Betrachtung der Veränderung des absoluten Wertes der Breitung bei zunehmender Breite des Einlaufprofils erkennbar.

7.3.3 Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die radiale Walzkraft

Entsprechend dem Pareto-Diagramm der Darstellung 7.16 hat die Walzspaltabnahme h_1 den größten Einfluss auf die in radialer Richtung auf die Arbeitswalzen wirkende Kraft. Der Einfluss der Einlaufhöhe h_0 des Gussprofils ist in etwa halb so groß. Die nachfolgend als signifikant zu wertende Breitung b_1 und die Wechselwirkung der Faktoren $h_0 * b_1$ sind in ihrem Betrag deutlich geringer als die zuvor benannten Faktoren, überschreiten die Referenzlinie für die Bewertung als signifikanter Faktor aber noch deutlich.

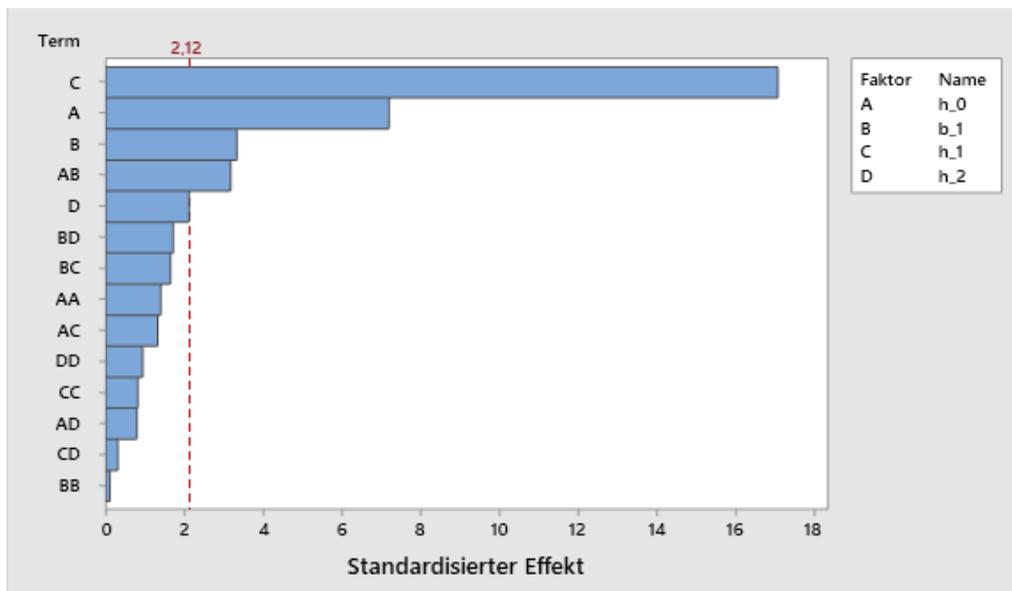


Abbildung 7.16: Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die radiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Bezüglich des großen Einflusses der Walzspaltabnahme h_1 ist der Prozess des kombinierten Walzens und Strangpressens mit dem konventionellen Walzprozess vergleichbar. Auch hier ist die Abnahme im Walzspalt maßgeblich für die erforderliche Walzkraft verantwortlich [Kop99]. Dem nachfolgend dargestellten Haupteffektediagramm der Abbildung 7.17 kann die Charakteristik der auf die radiale Walzkraft wirkenden Faktoren entnommen werden.

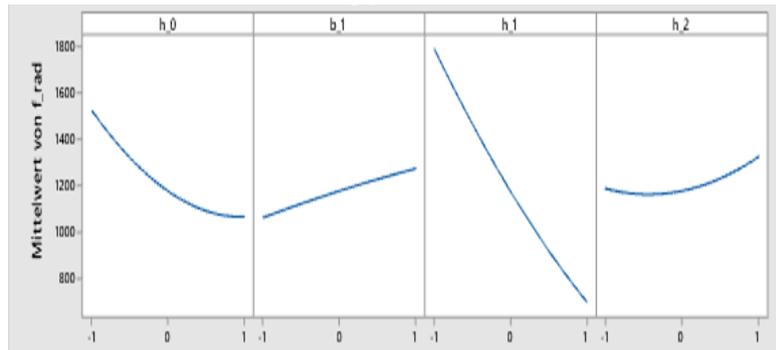


Abbildung 7.17: Haupteffektediagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die radiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Der hohe Einfluss des Faktors h_0 , welcher die geometrische Gestalt des einlaufenden Profils beschreibt, lässt sich über die aus seiner Einstellung resultierende gedrückte Fläche erklären. Bei einer niedrigen Wahl des Faktors h_0 ist das Einlaufprofil breiter als hoch. Die horizontale Kontaktfläche der Arbeitswalzen zum Werkstück wird größer und in der Folge steigt die resultierende radiale Kraft. Die gleiche Ursache ist für die Zunahme der radialen Kraft bei steigender Breitung zu identifizieren. Der Verlauf der Einflussfaktoren Breitung und Walzspaltabnahme ist nahezu linear. Der Einfluss der einlaufenden Werkstückgeometrie nimmt mit quadratisch werdender Gestalt ab und ist nicht linear.

Die beiden Faktoren h_0 und b_1 stehen in wechselwirkender Beziehung zueinander und haben einen signifikanten Einfluss auf die radiale Walzkraft. Der Einfluss beider Faktoren aufeinander wird durch eine Betrachtung der maximalen und minimalen Einstellung von h_0 bei gleich bleibend maximal gewählter Breitung b_1 ersichtlich. Wird der Einlaufquerschnitt doppelt so breit wie hoch angesetzt und die Breitung mit dem maximalen Wert von 20 % gewählt, so ergibt sich absolut betrachtet eine höhere Zunahme der horizontalen Kontaktfläche im Vergleich zu einem quadratisch gestalteten Einlaufprofil. Je niedriger der Faktor h_0 gewählt wird, desto größer wird der Einfluss der Breitung auf die radiale Walzkraft.

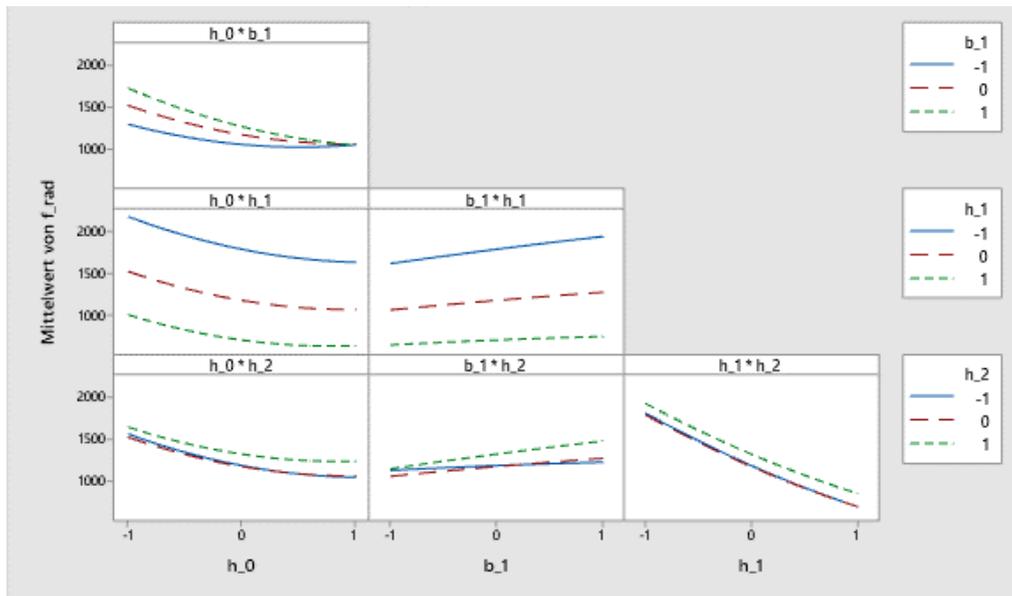


Abbildung 7.18: Wechselwirkungsdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die radiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen

7.3.4 Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die axiale Walzkraft

Aus Abbildung 7.19 können die Faktoren zu den Untersuchungen der Parameterstudie abgelesen werden, die einen signifikant hohen Einfluss auf die axial zu den Arbeitswalzen gerichteten Kräfte haben. Alle Einzelfaktoren überschreiten die Grenzwert zur Bewertung der Faktoren als statistisch relevante Einflussgrößen. Die Einflussgrößen der Höhe der Matrizenstirnseite h_2 , der geometrischen Gestalt des Einlaufprofils h_0 und der Abnahme im Walzspalt h_1 liegen deutlich über dem eingetragenen Grenzwert. Der Einfluss der Breite b_1 ist zwar signifikant, im direkten Vergleich mit den ersten drei benannten Größen jedoch um ein Vielfaches geringer.

Der große Einfluss der Höhe der Matrizenstirnseite h_2 kann dadurch erklärt werden, dass dieser Faktor einen direkten Einfluss auf die Distanz der Matrize zum Walzspalt hat. Je größer h_2 gewählt wird, desto größer ist der Abstand von der Matrize zum Walzspalt. In der Folge nimmt die Kontaktfläche zwischen dem Werkstück und den Walzenflanken zu. Je größer die Kontaktfläche ist, über die Druck auf die Walzenflanken ausgeübt wird, desto größer wird die axial wirkende Kraft. Weiter erhöht sich mit einem höher gewählten h_2 auch die Fläche der Matrizenstirnseite.

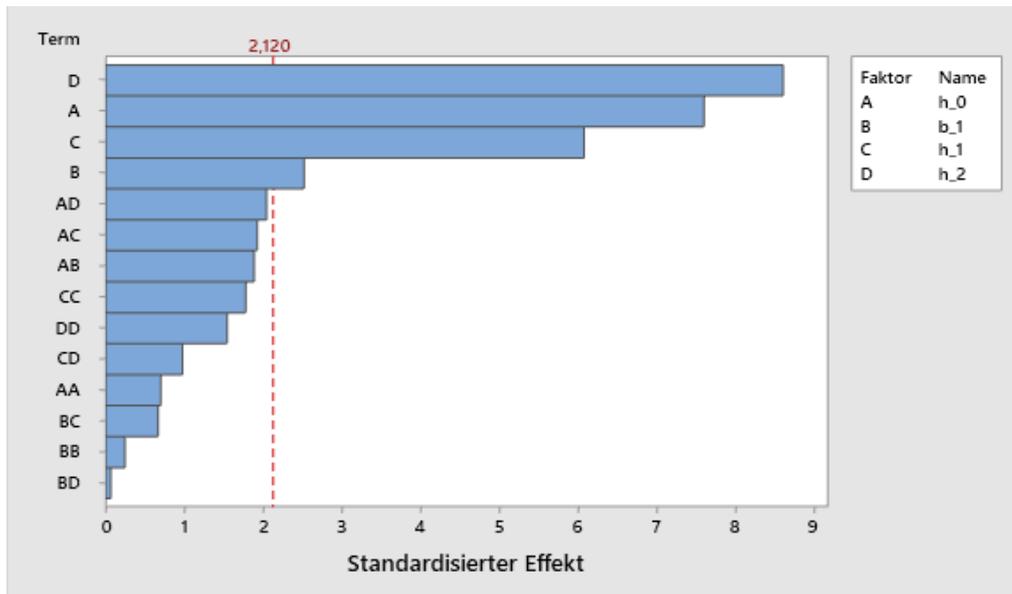


Abbildung 7.19: Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die axiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Bei gleich bleibender Öffnung der Matrize ist entsprechend dem konventionellen Strangpressprozess eine höhere Presskraft zur Herstellung des Drahtes erforderlich. Hierdurch kommt es zu einer Zunahme des hydrostatischen Druckes in der Stauchzone der Umformkammer (Abbildung 7.1). Diese Zunahme an Druck führt zu einer Erhöhung der Axialkraft. Über die resultierende Kontaktfläche der Walzenflanken und den damit einhergehenden Anstieg der axialen Kraft kann auch der signifikante Einfluss der Gestalt der einlaufenden Werkstückgeometrie erklärt werden. Je flacher das Einlaufprofil gewählt wird, als desto geringer ergibt sich die Axialkraft. Der Zusammenhang mit der Walzspalthöhe ist identisch. Je höher die Walzspaltabnahme, desto geringer wird die Kontaktfläche zur Arbeitswalzenflanke. Bezüglich des Faktors h_1 ist der zusätzliche Anstieg des hydrostatischen Druckes in der Druckzone nach Abbildung 7.1 zu berücksichtigen. Beide Effekte wirken einander entgegen. Auch der Einfluss der Breite b_1 steht mit der resultierenden Kontaktfläche in Verbindung. Werden die geometrischen Verhältnisse der Umformkammer so gewählt, dass wenig Breite des Werkstückes zugelassen wird, so kommen die Flanken der Arbeitswalzen schneller mit dem Umformgut in Kontakt, als es beim Zulassen von Breite und bei einer großen Auslegung der Breitzzone der Fall ist.

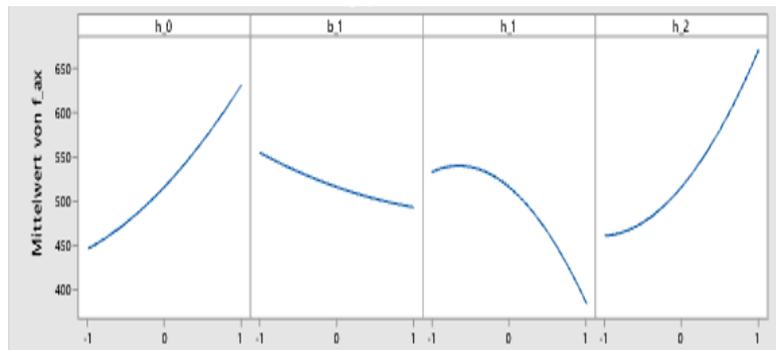


Abbildung 7.20: Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die axiale Kraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Dem Verlauf der Linien des Haupteffektdiagramms aus Darstellung 7.20 können die Höhe und die Charakteristik der Einflussnahme der einzelnen Faktoren entnommen werden. Der Verlauf des größten Einflussfaktors h_2 ist nicht linear. Die Zunahme steigt mit der Entfernung der Matrize vom Walzspalt. Der Einfluss der Kantenverhältnisse des Einlaufprofils ist nahezu linear und spiegelt den erläuterten Zusammenhang zwischen der Zunahme der Höhe und der Kontaktfläche der Walzenflanken und schlussendlich der Zunahme der Axialkraft wider. Die Charakteristik des Einflusses der Walzspalthöhe ist nicht linear. Zu Beginn steigt bei sinkender Abnahme die Axialkraft an, bei weiterer Reduktion der Abnahme sinkt sie. Eine Erklärung liefern die Verkleinerung der Druckzone bei kleiner werdender Walzspaltabnahme und die daraus resultierende Abnahme des Druckes auf die Walzenflanken trotz der Erhöhung der wirkenden Kontaktfläche. Der Verlauf des Einflusses der Breite stellt sich als nahezu linear dar und stimmt mit der vorhergehenden Erklärung der reduzierten Kontaktfläche bei zunehmender Breite überein.

7.3.5 Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die Matrizenkraft

Das Pareto-Diagramm der Abbildung 7.21 benennt die Einflussfaktoren der Untersuchungen aus der Parameterstudie mit einem als signifikant zu bewertendem Einfluss auf die Matrizenkraft. Den mit Abstand größten Einfluss hat die gewählte Höhe der Matrizenstirnseite h_0 . Zusätzlich übersteigen die beiden Einflussfaktoren Breite b_1 und Gestalt der Einlaufgeometrie h_0 die Referenzlinie der statistischen Relevanz.

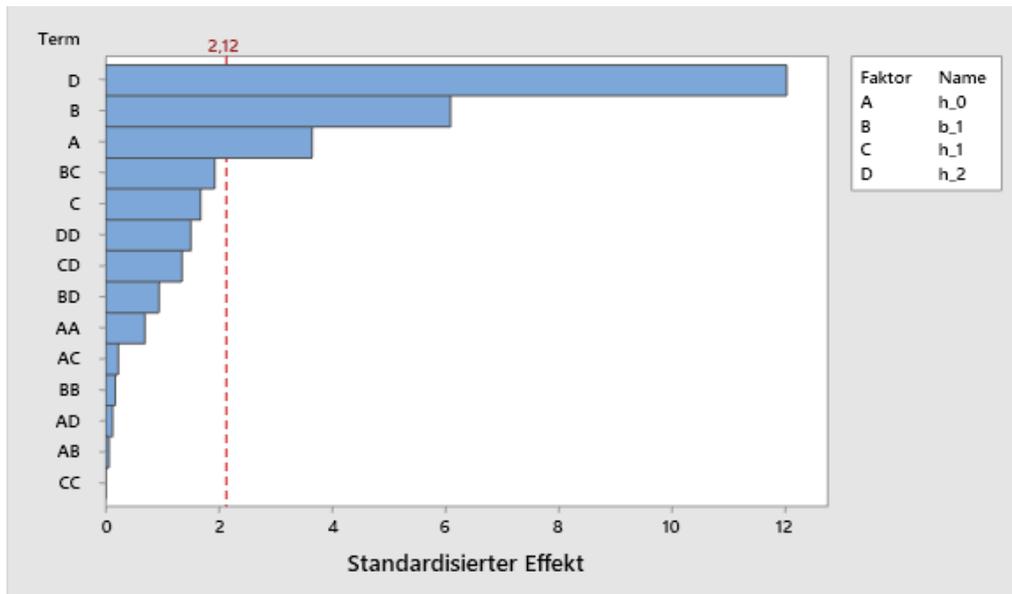


Abbildung 7.21: Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Matrizenkraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Der mit Abstand größte Einfluss von h_2 kann mit dessen direktem Zusammenhang mit der Fläche der Matrizenstirnseite erklärt werden. Je größer die Fläche ist, gegen die das Werkstück Druck ausüben kann, als desto höher ergibt sich die wirkende Kraft. Zusätzlich steigt das Verhältnis der Fläche A_2 zur Fläche A_3 entsprechend der Darstellung ???. Der beschriebene Zusammenhang ist mit den analytischen Beschreibungen der erforderlichen Prozesskraft beim konventionellen Strangpressen identisch [Hen78]. Die gewählte Breitung bei der Auslegung der Umformraumgeometrie hat ebenfalls direkten Einfluss auf die Größe der Fläche der Matrizenstirnseite. Wegen der geltenden Beziehung $b_1 = b_2$ erhöht sich die Matrizenstirnfläche mit zunehmender Breitung. Eine Erklärung für den Einfluss der geometrischen Gestalt des Ausgangsmaterials auf die Matrizenkraft liefert eine Betrachtung der Abstände der Ränder der Matrizenstirnseite zu deren Öffnung. Beim konventionellen Strangpressen werden runde Blöcke verpresst. Der Abstand einer jeden Position des Randes des Presslings zu einer runden Matrizenöffnung ist identisch. Wird beim kombinierten Walzen und Strangpressen der Ausgangsquerschnitt flach gewählt, ist der Abstand der vertikalen Ränder zur Matrizenöffnung größer. Dies hat einen Anstieg in der resultierenden Matrizenkraft zur Folge.

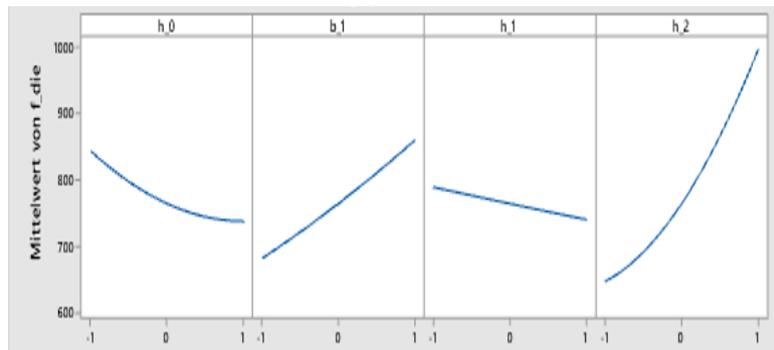


Abbildung 7.22: Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Matrizenkraft beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Art und Höhe der Einflussnahme der signifikanten Haupteffekte auf die Matrizenkraft können der Abbildung 7.22 entnommen werden. Der größte Einflussfaktor h_2 zeigt eine nicht lineare Charakteristik. Mit zunehmender Höhe der Matrizenstirnseite steigt die Zunahme der auf die Matrize wirkenden Kraft. Der Einfluss der Breitung kann als linear angenommen werden. Der zuvor beschriebene Zusammenhang zwischen einer Zunahme an Breitung und einer Erhöhung der Matrizenkraft aufgrund der größer werdenden Fläche A_2 wird durch das entsprechende Haupteffektdiagramm bestätigt. Ebenso bestätigt sich der angeführte Zusammenhang der Wahl der Eingangsgeometrie mit der Matrizenkraft bei der Betrachtung des Diagramms des Haupteffektes h_0 . Je quadratischer der Einlaufquerschnitt, als desto geringer ergibt sich die resultierende Kraft auf die Matrize. Mit zunehmend gleich werdendem Verhältnis von h_0 und b_0 sinkt die Höhe des Einflusses. Der Kurvenverlauf und somit der Zusammenhang mit diesem Faktor ist nicht linear.

7.3.6 Signifikanz und Ausprägung in Bezug auf die Kontaktfläche

Dem Pareto-Diagramm der Abbildung 7.23 können die Faktoren zur Beschreibung der Umformgeometrie mit einem signifikanten Einfluss auf die resultierende Kontaktfläche entnommen werden. Die Wahl der Abnahme im Walzspalt hat den größten Einfluss. Der Einfluss der Höhe der Matrizenstirnseite ist ebenfalls hoch. Die Quantität des quadratischen Einflusses der Walzspalthöhe und die der Wechselwirkung zwischen der Form des Einlaufprofils und der gewählten Walzspalthöhe liegen knapp über der Referenzlinie zur Bestimmung signifikanter Einflussfaktoren.

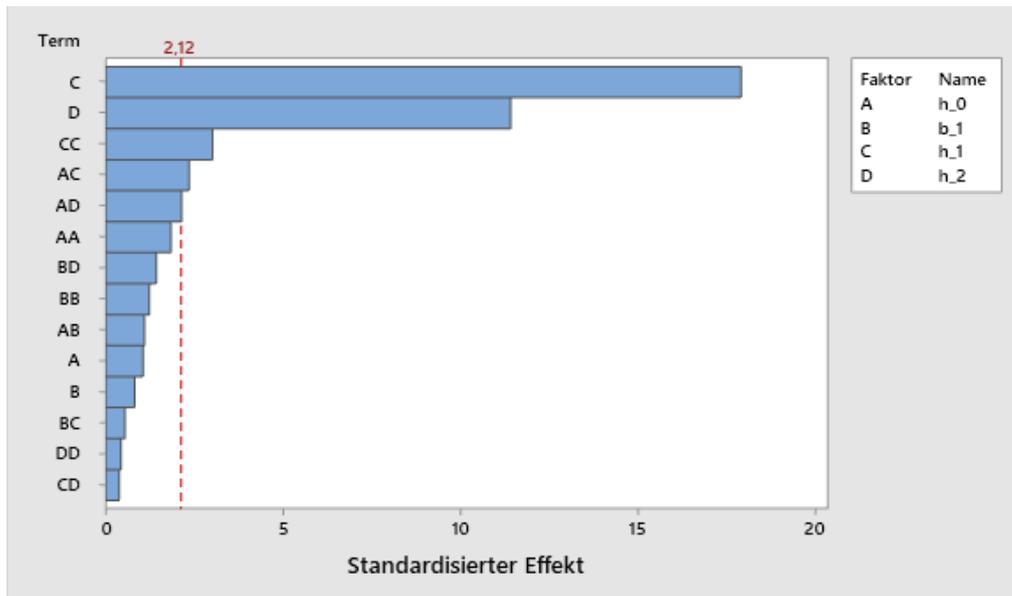


Abbildung 7.23: Pareto-Diagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Kontaktfläche beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Der hohe Einfluss der gewählten Walzspalthöhe h_1 erklärt sich aus der mit ihr im Zusammenhang stehende Veränderung der Länge der Umformkammer und die Verschiebung ihrer inhärenten Zonen. Der Effekt dieses Zusammenhangs auf die Kontaktfläche wirkt dem schwächeren Effekt der Zunahme der Kontaktfläche des Werkstückes zu den Walzenflanken bei geringer gewählter Abnahme entgegen. Der nächstgrößere Einfluss der Höhe der Matrizenstirnseite ist durch zwei in gleiche Richtung wirkende Zusammenhänge zu beschreiben. Je größer h_2 gewählt wird, desto größer wird die Fläche der Matrizenstirnseite. Zusätzlich resultiert eine zunehmende Höhe der Matrizenstirnseite in einer größer werdenden Distanz der Matrize zum Walzspalt. Hierdurch wird die hinter dem Walzspalt gelegene Spreizzone vergrößert. Es entsteht mehr mögliche Kontaktfläche. Der signifikante quadratische Einfluss $h_1 * h_1$ ist ähnlich zu begründen wie der zugehörige einfache Einfluss. Bei einer Vergrößerung des Walzspaltes bewegt sich nicht nur der Kontaktpunkt der Matrize zur Walze weiter in Richtung Walzspalt, sondern ebenso der Kontaktpunkt des Werkstückes zu den Arbeitswalzen. Die Ursache für den bedeutenden Einfluss der Wechselwirkung zwischen der Form des Gussprofils und der Abnahme im Walzspalt wird durch eine Betrachtung der sich einstellenden Kontaktfläche bei minimaler und maximaler Veränderung von h_0 bei gleich bleibendem h_1 erkennbar. Bei maximalem h_0 , also einem quadratischen Profil, bewegt sich der Kontaktpunkt zwischen Werkstück und Walze verglichen mit einem flachen Profil weiter vom Walzspalt weg, was zu einer höheren Zunahme der Kontaktfläche führt.

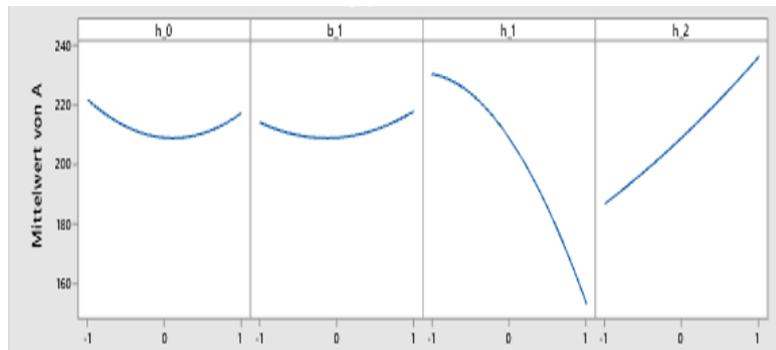


Abbildung 7.24: Haupteffektdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Kontaktfläche beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Die Betrachtung der Charakteristik des Einflusses der Abnahme im Walzspalt im Haupteffektdiagramm der Darstellung 7.24 stützt die gegebene Begründung. Die Form der Kurve ist aufgrund des zugehörigen quadratischen Einflusses des Effektes nicht linear. Der dargestellte Einfluss der Veränderung von h_2 stimmt mit der zuvor angeführten Begründung überein. Der Verlauf des Einflusses ist nahezu linear.

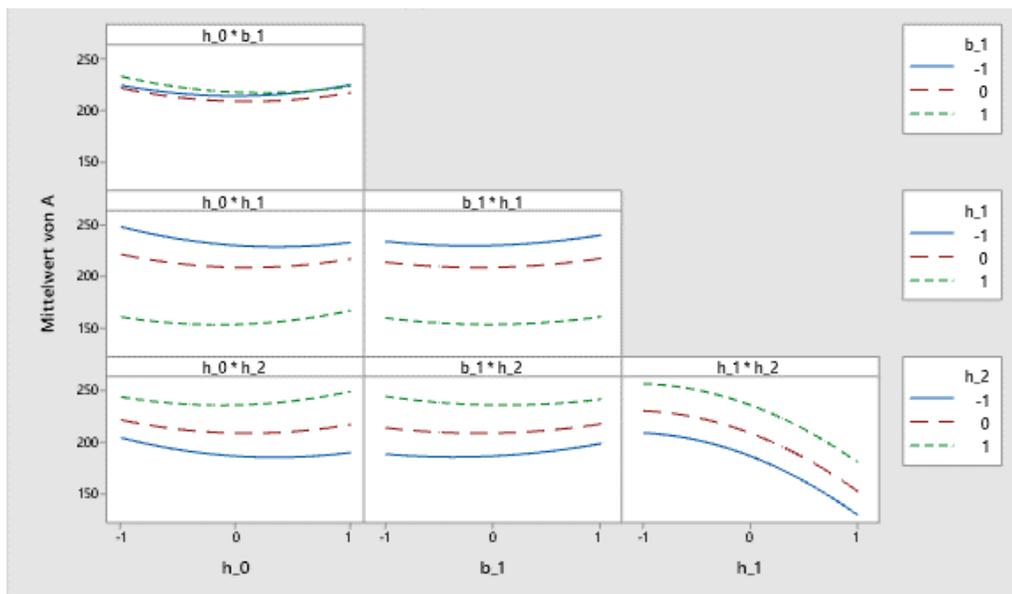


Abbildung 7.25: Wechselwirkungsdiagramm zum Einfluss der Umformraumgeometrie auf die Kontaktfläche beim kombinierten Walzen und Strangpressen

Die Abbildung 7.25 zeigt die paarweisen Wechselwirkungsdiagramme zu den Einzelfaktoren. Nur der Betrag der Abweichung der Parallelität der Darstellung von $h_0 * h_1$ ist groß genug zur Bewertung dieser Wechselwirkung als signifikant.

8 Zusammenfassung

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen experimentellen und numerischen Untersuchungen dienen der Analyse verschiedener Aspekte des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses, der Beurteilung der Anwendbarkeit der Methode der numerischen Umformsimulation zur Berechnung resultierender Prozessgrößen sowie der Entwicklung und Beurteilung statistischer Modelle zwecks Berechnung resultierender makroskopischer Prozesseigenschaften auf der Grundlage gegebener geometrischer Verhältnisse der Umformkammer.

Zur Untersuchung der Auswirkung einer Veränderung des Umformgrades und der Walzendrehzahl wurden experimentelle Versuche an einer Anlage im industriellen Maßstab durchgeführt. Drehmomente, Temperaturen und Drahtgeschwindigkeiten wurden bei der Versuchsdurchführung im Rahmen der gegebenen Möglichkeiten gemessen. Die Versuchsergebnisse zeigen eine Zunahme des Drehmomentes bei abnehmendem Drahtdurchmesser bzw. bei einer Zunahme des Umformverhältnisses. Eine Steigerung der Rotationsgeschwindigkeit der Arbeitswalzen reduziert das erforderliche Walzenmoment. Die Messung der Ein- und Ausgangstemperaturen des Werkstückes erfolgte aufgrund der begrenzt zur Verfügung stehenden Ressourcen mit einer unzureichenden Genauigkeit. Die erfassten Temperaturbereiche deuten auf eine tendenzielle Zunahme der Temperatur des austretenden Drahtes bei einer Zunahme des Umformgrades hin. Die Austrittsgeschwindigkeit des Versuchsmaterials steigt mit abnehmendem Drahtdurchmesser. Die Suche nach der Ursache für den drastischen Abfall der simulierten Drahtgeschwindigkeit der letzten Versuchsvariante unter Anwendung des entwickelten Reibmodells ist Gegenstand der fortsetzenden Untersuchung des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses.

Die experimentellen Versuche wurden mit der Methode der finiten Elemente nachgebildet. Messwerte und Simulationsergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Veränderungen der Beträge der berechneten Momente zwischen den einzelnen Versuchen zeigen eine gute Übereinstimmung verglichen mit den gemessenen Veränderungen aus den Versuchen. Die simulierten Temperaturen des austretenden Drahtes liegen wie auch die gemessenen Austrittstemperaturen unter der Eingangstemperatur des Versuchsmaterials. Entgegen der tendenziellen Abnahme der gemessenen Austrittstemperaturen bei abnehmendem Drahtquerschnitt zeigen die berechneten Ergebnisse eine Temperaturzunahme des Drahtes. Die gemessenen und die berechneten Geschwindigkeiten der Versuche zeigen eine gute Übereinstimmung bzgl. Betrag und Verhalten bei Veränderungen der Randbedingungen.

Um den Materialfluss innerhalb der Umformkammer des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses einer Untersuchung zugänglich zu machen, wurde ein experimenteller visioplastischer Versuch an der industriellen Anlage durchgeführt. Hierzu wurden horizontale und vertikale Kupferstiftreihen in ein Gussstück aus Aluminium eingearbeitet.

Das Versuchsmaterial wurde durch die Anlage umgeformt. Der Prozess wurde gestoppt, während sich das präparierte Werkstück innerhalb der Umformkammer befand. Anschließend wurde das Gussstück aus der Anlage entnommen. Eine computertomographische Analyse des Werkstückes ermöglicht eine differenzierte Darstellung von Aluminium und Kupfer. Die Untersuchung der Entwicklung der Umformung der Kupferstiftreihen in Prozessrichtung lässt Schlussfolgerungen auf den im Inneren des Werkstückes vorliegenden Materialfluss zu. Aus der diesbezüglichen Analyse konnten Charakteristika im Stofffluss des kombinierten Walz- und Strangpressprozesses identifiziert werden. Der experimentelle Versuch wurde durch ein Simulationsmodell nachgebildet und der berechnete Stofffluss wurde mit dem ermittelten realen Stofffluss verglichen. Die Charakteristik der Verformung der modellierten Stiftreihen zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus dem Experiment und gibt die bei der Analyse der experimentellen Ergebnisse ermittelten charakteristischen Merkmale wieder. Die Höhe der Verformung der Kupferstiftnachbildungen aus der Simulation war im Vergleich zur experimentell ermittelten Verformung geringer. Eine Betrachtung der Verteilung der Materialflussgeschwindigkeiten im mittigen Längsquerschnitt aus den Ergebnissen der Simulation ist ein Beleg für die doppelte Änderung der Geschwindigkeitsverhältnisse zwischen Werkstückrand und Werkstückkern. Diese Änderung der Verhältnisse erklärt die doppelte Richtungsänderung der Gestalt der vertikalen Kupferstifte. Weiter lassen die Simulationsergebnisse und die metallographischen Lichtbildaufnahmen der Ausbildung des metallischen Gefüges in identischer Weise auf die Ausbildung einer Toten Zone neben der Matrizenöffnung schließen, die in ihrer Gestalt mit der Ausbildung der Toten Zone beim indirekten Strangpressen übereinstimmt.

Zwecks Untersuchung sowie numerischer Modellierung der im Prozess vorliegenden Reibung wurden axiale Reibtests durchgeführt. Aus den Ergebnissen dieser Versuche wurde ein mathematisches Modell zur Bestimmung des Reibkoeffizienten in Abhängigkeit von Temperatur und Kontaktdruck entwickelt. Aus den Versuchsergebnisse geht hervor, das zwischen den Arbeitswalzen und dem Werkstück bei den im Prozess vorliegenden Temperaturen und Drücken nahezu durchgängig von Haftreibung ausgegangen werden kann. Ab einer Temperatur von $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt bereits bei einem Kontaktdruck von 50 MPa Haftreibung vor.

Die sich ergebenden Reibkoeffizienten aus den Ergebnissen der Anwendung des entwickelten Reibmodells in den numerischen Nachbildungen der experimentellen Versuche bestätigen die sich überwiegend in der Kontaktzone einstellende Haftung zwischen Werkstück und Walzen. Nur in den Randbereichen der Kontaktzonen werden geringere Reibkoeffizienten im Modell berechnet.

Eine Parameterstudie, deren unterschiedliche Simulationsmodellvarianten in der Gestalt der Umformgeometrie variierten, wurde zur Untersuchung der Zusammenhänge zwischen der Auslegung der Größen zur Definition der Gestalt der Umformkammer und resultierenden Prozessgrößen durchgeführt. Weiter wurden auf der Grundlage der si-

mulierten Ergebnisse statistische Modelle entwickelt, welche eine Berechnung der untersuchten Prozessgrößen unter Vorgabe der Umformgeometrie ermöglichen. Durch die statistische Auswertung der Studienergebnisse wurden die auf die resultierenden Prozessgrößen signifikant Einfluss nehmenden Faktoren der Umformgeometrie identifiziert und deren Charakteristik der Einflussnahme wurde beschrieben. Durch eine Analyse der Residuen der entwickelten Regressionsmodelle und die Betrachtung von Kennzahlen zur Bewertung der Vorhersagegüte der Modelle konnten Aussagen zur Qualität der einzelnen Modelle getroffen werden. Weitere Anpassungen und eine dadurch resultierende Verbesserung der Vorhersagegüte der entwickelten Regressionsmodelle durch eine Reduktion der Betrachtung der Einflussfaktoren auf solche mit signifikantem Einfluss wurden bewusst nicht unternommen. Die durchgeführte Parameterstudie hatte die hauptsächliche Aufgabe, die Einflüsse der Geometrie der Umformung zu untersuchen. Zur Entwicklung von statistischen Modellen zur Vorhersage absoluter Prozessgrößen, die sich zur Anwendung in der industriellen Praxis eignen, ist die Berücksichtigung einer Vielzahl weiterer Einfluss nehmender Randbedingungen erforderlich. Als Beispiele solcher Randbedingungen können die Temperatur des einlaufenden Gussprofils, die Temperatur der Arbeitswalzen, die Temperatur der Matrize, die Rotationsgeschwindigkeit der Walzen sowie die Wärmeübergänge zwischen den Kontaktpartnern und die unterschiedlichen Verläufe der Beschreibungen des Umformverhaltens variierender Werkstückwerkstoffe benannt werden.

Literatur

- [Ale72] J. M. Alexander. “On the Theory of Rolling”. In: *Proceedings of the Royal Society* (1972), S. 537–546.
- [Ale80a] J. M. Alexander. “MICRO COMPUTER PROGRAMS FOR ROLLING AND EXTROLLING”. In: *Department of Mechanical Engineering, University of Surrey* (1980).
- [Ale80b] J. M. Alexander und A. N. Tilakasiri. *A STUDY OF THE PROCESS OF EXTROLLING*. 1980.
- [Aleoj] J. M. Alexander und K. Hatakeyama. *ON THE HOT EXTROLLING OF ALUMINIUM*. o.J.
- [Alf10] I. Alfaro u. a. “Simulation of Porthole Die Extrusion Process comparing NEM and FEM modelling”. In: *Key Engineering Materials* 424 (2010), S. 97–104.
- [Alt13] Dietrich Altenpohl. *Aluminium und Aluminiumlegierungen*. Springer-Verlag, 2013.
- [Bat02] Klaus-Juergen Bathe. *Finite-Elemente-Methode*. Springer-Verlag, 2002.
- [Bir13] Arndt Birkert, Stefan Haage und Markus Straub. *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen*. Springer-Verlag, 2013.
- [Boe08] Alfred Boege. *Vieweg Handbuch Maschinenbau: Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik*. Springer-Verlag, 2008.
- [Buz11] Thorsten M. Buzug. *Einfuehrung in die Computertomographie: Mathematisch-physikalische Grundlagen der Bildrekonstruktion*. Springer-Verlag, 2011.
- [Cle08] Thomas Cleff. *Deskriptive Statistik und moderne Datenanalyse: eine computergestuetzte Einfuehrung mit Excel, SPSS und STATA*. Springer-Verlag, 2008.
- [Dal13] R. Dalheimer u. a. *Lehrbuch der Umformtechnik: Band 2 Massivumformung*. Springer-Verlag, 2013.
- [Ded13] Stanislav Dedov. “Untersuchungen zur Entwicklung einer kombinierten Gieß-Umformtechnologie zur Herstellung hochwertiger Aluminium Bauteile”. Diss. Technische Universitaet Bergakademie Freiberg, 2013.
- [Doe10] Eckart Doege und Bernd-Arno Behrens. *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Springer-Verlag, 2010.
- [Doe86] E. Doege, H. Meyer-Nolkemper und I. Saeed. *Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe: mit Fließkurven fuer 73 Werkstoffe und einer grundlegenden Einfuehrung*. Hanser Verlag Muenchen, 1986.

- [Dov15] Nikolai N. Dovzhenko und Sergey B. Sidelnikov. “Innovative Technologies of Metal Forming Based on Combination Processes of Casting, Extruding and Rolling”. In: *Journal of Siberian Federal University* (Aug. 2015), S. 57–60.
- [Dro18] Guenter Drossel u. a. *Aluminium Taschenbuch 2: Umformung, Gießen, Oberflächenbehandlung, Recycling*. Beuth Verlag, 2018.
- [Fis35] Ronald Aylmer Fischer. *The Design of Experiments*. Oliver und Boyd, 1935.
- [Fre02] H. Frenzen und A. Wehrstedt. *Werkstoffparameter fuer die FEM-Simulation – Neue Herausforderungen fuer die Materialpruefung*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2002.
- [Fri17] Horst E. Friedrich. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Springer-Verlag, 2017.
- [Gal12] Sven Gall. “Grundlegende Untersuchungen zum Strangpressen von Magnesiumblechen und deren Weiterverarbeitung: Mikrostruktur und mechanische Eigenschaften”. Diss. Technische Universitaet Berlin, 2012.
- [Gal17] Roman Galiev. “Research of Combined Rolling-Extrusion Process for Production of Long Deformed Semi-Finished Products from Aluminum Alloys of Various Alloying Systems”. Diss. Sibirskiy Federal’nyy Universitet, 2017.
- [Ger07] Horst Gers. *Strangpressen: Tagungsband des Symposiums Strangpressen des Fachausschusses Strangpressen der DGM*. John Wiley & Sons, 2007.
- [Ger89] Branimir Borissov Gerginov. “INVESTIGATIONS INTO CONTINUOUS EXTRUSION”. Diss. Imperial College of Science und Technology London, 1989.
- [Gue15] Gerhard Guetl. *Methoden zur Optimierung der Produktion*. BACHELOR + MASTER PUBLISHING, 2015.
- [Hen78] Arno Hensel und Thilo Spittel. *Kraft- und Arbeitsbedarf bildsamer Formgebungsverfahren*. VEB Deutscher Verlag fuer Grundstoffindustrie Leipzig, 1978.
- [Her13] Ekbert Hering, Juergen Triemel und Hans-Peter Blank. *Qualitaetsmanagement fuer Ingenieure*. Springer Verlag, 2013.
- [Her17] Ekbert Hering und Rolf Martin. *Optik fuer Ingenieure und Naturwissenschaftler: Grundlagen und Anwendungen*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
- [Hir58] S. Hirst und D. H. Ursell. “Some limiting Factors in the Extrusion of Metals”. In: *Proceedings of the Conference on Technology of Engineering Manufacture, The Institution of Mechanical Engineers* (1958), S. 151.
- [Hol06] Sven Holsten. *FEM-unterstuetzte Parameterstudie des Innengewinde-Fertigungsverfahrens Gewindefurchen*. kassel university press GmbH, 2006.
- [Hor07] P. Hora, C. Karadogan und L. Tong. “Neue Entwicklungen im Bereich der virtuellen Abbildung von Strangpressprozessen”. In: *Symposium Strangpressen des Fachausschusses Strangpressen der DGM* (2007).

- [Kam10] Matthias Kammler. “Localization of the Shear Zone in Extrusion Processes by means of Finite Element Analysis”. In: *Key Engineering Materials* 424 (2010), S. 221–226.
- [Kam98] Dr. Catrin Kammer. *Aluminium-Taschenbuch; Band 1: Grundlagen und Werkstoffe*. Aluminium-Zentrale Duesseldorf, 1998.
- [Kam99] Dr. Catrin Kammer. *Aluminium-Taschenbuch; Band 2: Umformen von Aluminium Werkstoffen, Gießen von Aluminium-Teilen, Oberflächenbehandlung von Aluminium, Recycling und Ökologie*. Aluminium-Zentrale Daesseldorf, 1999.
- [Kan13] Dae-Kern Kang. *Finite Elemente Simulation von Massivumformvorgaengen mit Beruecksichtigung des Kontaktproblems und der radialen Anisotropie*. Springer-Verlag, 2013.
- [Kar10] C. Karadogan, R. Gruebler und P. Hora. “A new cone-friction test for evaluating friction phenomena in extrusion processes”. In: *Key Engineering Materials* 424 (2010), S. 161–166.
- [Kle10] Bernd Klein. *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau*. Springer-Verlag, 2010.
- [Kle16] Wilhelm Kleppmann. *Versuchsplanung - Produkte und Prozesse optimieren*. Carl Hanser Verlag Muenchen Wien, 2016.
- [Kop76] Reiner Kopp und Herbert Wiegels. *Zur Berechnung des Kraft- und Arbeitsbedarfes beim Strangpressen*. Westdeutscher Verlag, 1976.
- [Kop99] Reiner Kopp und Herbert Wiegels. *Einfuehrung in die Umformtechnik*. Verlagsgruppe Mainz, 1999.
- [Kup19] Deutsches Kupferinstitut. *Waermebehandlung von Kupferwerkstoffen*. 2019.
- [Lan88] Kurt Lange. *Umformtechnik - Handbuch fuer Industrie und Wissenschaft*. Springer-Verlag, 1988.
- [Len02] J. G. Lenard. *Metal Forming Science and Practice: A State-of-the-Art Volume in Honour of Professor J.A. Schey's 80th Birthday*. Elsevier, 2002.
- [Mis10] W. Z. Misiolek und W. R. Van Geertruyden. “Combined numerical and MICROtrmicos characterization for prediction of physical properties in extruded aluminium alloys”. In: *Key Engineering Materials* 424 (2010), S. 1–8.
- [Mue07] Soeren Mueller. “Weiterentwicklung des Strangpressens von AZ Magnesiumlegierungen im Hinblick auf eine Optimierung der Mikrostruktur, des Gefueges und der mechanischen Eigenschaften”. Diss. Technische Universitaet Berlin, 2007.
- [Mue10] J. Muehlhause, S. Gall und S. Mueller. “Simulation of the co-extrusion of hybrid Mg/Al profiles”. In: *Key Engineering Materials* 424 (2010), S. 113–119.

-
- [Mue14] Soeren Mueller. *Experimentelle und numerische Untersuchungen zur Vorhersage der Stranggeschwindigkeiten beim Einsatz von Mehrlochmatrizen*. Techn. Ber. Forschungszentrum Strangpressen - Technische Universitaet Berlin, 2014.
- [Neg17] Maik Negendank. “Untersuchungen zum Strangpressen von Aluminiumhohlprofilen mit axial variabler Wandstaerke”. Diss. Technische Universitaet Berlin, 2017.
- [Ost14] Friedrich Ostermann. *Anwendungstechnologie Aluminium*. Springer-Vieweg, 2014.
- [oV03] oV. *DIN 8582:2003-09 Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Uebersicht*. Deutsches Institut fuer Normung, 2003.
- [oV91] oV. *Climate Change: The Ipcc Response Strategies*. Island Press - Intergovernmental Panel on Climate Change, 1991.
- [Ove18] Christian Overhagen. “Modelle zum Walzen von Flach- und Vollquerschnitten”. Diss. Universitaet Duisburg-Essen, 2018.
- [Pfe11] Tilo Pfeifer und Robert Schmitt. *Fertigungsmesstechnik*. Oldenbourg Verlag, 2011.
- [Poe13] Klaus Poehland. *Werkstoffpruefung fuer die Umformtechnik: Grundlagen, Pruefmethoden, Anwendungen*. Springer-Verlag, 2013.
- [Rin07] D. Ringhand. “Einsatz der Prozesssimulation beim Strangpressen von Schwermetallen”. In: *Symposium Strangpressen des Fachausschusses Strangpressen der DGM (2007)*.
- [San13] Vidal Sanabria, Soeren Mueller und Walter Reimers. “A New High Speed Friction Test for Extrusion Processes”. In: *Key Engineering Materials* 585 (2013), S. 33–39.
- [Sch06] Marco Schikorra. “Modellierung und simulationsgestuetzte Analyse des Verbundstrangpressens”. Diss. Technische Universitaet Dortmund, 2006.
- [Sch14] Karlheinz Schiebold. *Zerstoerungsfreie Werkstoffpruefung - Durchstrahlungspruefung*. Springer-Verlag, 2014.
- [Sid05] S.B. Sidelnikov, N.N. Dovzhenko und I.N. Dovzhenko. “MODELING AND DEVELOPING PROCESSES OF INTEGRATED ALUMINIUM AND ALUMINIUM ALLOYS PROCESSING ABASED ON THE METHODS OF CONTINUOUS CASTING, ROLLING AND EXTRUSION”. In: *State University of Non-ferrous Metals and Gold (2005)*.
- [Sie10] Karl Siebertz, David van Bebber und Thomas Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Springer Vieweg, 2010.

-
- [Sok15] Ruslan E. Sokolov und Sergey B. Sidelnikov. “Application of Methods Combined Treatment for Obtaining Welding Wire from Silumins”. In: *Journal of Siberian Federal University* (Aug. 2015), S. 180–184.
- [Spu12] Guenter Spur. *Handbuch Umformen*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012.
- [Sta85] Ulf Stahlberg und Anders Goeransson. “HEAVY REDUCTIONS BY MEANS OF EXTROLLING: A THEORETICAL ANALYSIS INCLUDING SOME MATERIAL ASPECTS”. In: *Journal of Mechanical Working Technology* (1985).
- [Ste18] Erwin Stein, René de Borst und Thomas J. R. Hughes. *Encyclopedia of Computational Mechanics*. Wiley, 2018.
- [Sto13] Thomas F. Stocker u. a. *CLIMATE CHANGE 2013: The Physical Science Basis*. Techn. Ber. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013.
- [Ton02] Tatsuya Tonogi, Kazuhiko Okazato und Saburou Tsukada. “Precise Extrusion Technology by Conform Process for Irregular Sectional Copper”. In: *HITACHI CABLE REVIEW* 21 (Aug. 2002), S. 77–82.
- [Val10] Henry S. Valberg. *Applied metal forming including FEM analysis*. Cambridge University Press, 2010.
- [Zas10] J. Zasadzinski u. a. “Numerical Analysis of Aluminium Alloys, Extrusion Through Porthole Dies”. In: *Key Engineering Materials* 424 (2010), S. 105–111.