

Simulation des Werkstoffflusses beim Ringwalzen  
mittels elementarer Plastizitätstheorie

Vom Fachbereich Maschinenbau  
der Universität Hannover  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur  
genehmigte Dissertation  
von

**Dipl.-Ing. Stefan Puller**  
**geboren am 26. Dezember 1967**  
**in Rahden**

**2003**

Referent:	Prof. Dr.-Ing. E. Doege
Koreferent:	Prof. Dr.-Ing. H. Meier
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. D. Besdo
Tag der Promotion:	08. August 2003

## Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Formelzeichen .....	III
Zusammenfassung.....	V
Abstract.....	VI
1 Einleitung .....	1
2 Problemstellung und Zielsetzung .....	4
3 Stand der Technik .....	6
3.1 Radial-Axial-Ringwalzen .....	6
3.1.1 Das Ringwalzverfahren.....	7
3.1.2 Das Walzen von Ringen mit rechteckigem Querschnitt .....	9
3.1.3 Das Walzen von Ringen mit profiliertem Querschnitt.....	10
3.1.4 Formfehler beim Ringwalzen .....	13
3.1.5 Prozessauslegung .....	16
3.2 Ansätze zur Ermittlung des Werkstoffflusses beim Ringwalzen.....	19
3.2.1 Finite-Elemente-Methode.....	19
3.2.2 Elementare Theorie und Verfahren der Oberen Schranke.....	21
3.2.3 Visioplastische Untersuchungen .....	24
4 Entwicklung des Simulationsverfahrens .....	27
4.1 Ermittlung der geometrischen Zusammenhänge im Radialwalzspalt.....	28
4.1.1 Geometrische Erfassung der radialen Umformzone .....	28
4.1.2 Berechnung der Stichabnahmen.....	31
4.2 Bestimmung der kinematischen Verhältnisse im Radialwalzspalt.....	35
4.2.1 Materialfluss in Umfangsrichtung .....	36
4.2.2 Materialfluss in radialer Richtung .....	38
4.2.3 Materialfluss in axialer Richtung .....	45
4.3 Simulationsprinzip .....	49
5 Realisierung des Simulationssystems.....	59
5.1.1 Geometrieditor .....	60

---

5.1.2	Strategieeditor.....	61
5.1.3	Materialauswahl .....	63
5.1.4	Berechnungsmodul .....	64
5.1.5	Visualisierungsmodul .....	65
5.1.6	Datenbankanbindung .....	67
6	Werkstoffflusssimulation mit dem Simulationssystem RingRoSi .....	68
6.1	Ringe mit rechteckigem Querschnitt .....	69
6.2	Ringe mit axialen Breitungseffekten .....	73
6.3	Ringe mit profiliertem Querschnitt .....	79
7	Zusammenfassung und Ausblick .....	92
8	Schrifttum .....	94

## Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
$\alpha$	mittlerer linearer Wärmeausdehnungskoeffizient	1/K
$A$	Fläche	m <sup>2</sup>
$A_R$	Reibungsfläche	m <sup>2</sup>
$A_S$	Scherfläche	m <sup>2</sup>
$C_1, C_2$	Konstante	m/s
$D_a, D_i$	Außen- bzw. Innendurchmesser des Rings	m
$D_d, D_w$	Durchmesser der Dorn- bzw. Hauptwalze	m
$D_d', D_w'$	fiktive Durchmesser der Dorn- bzw. Hauptwalze	m
$\dot{\varepsilon}_{ij}$	Formänderungsgeschwindigkeitstensor	1/s
$k$	Schubfließspannung	N/m <sup>2</sup>
$k_f$	Fließspannung	N/m <sup>2</sup>
$K_d, K_w$	Kontaktkurve der Dorn- bzw. Hauptwalze	m
$l_d, l_w$	gedrückte Länge an der Dorn- bzw. Hauptwalze	m
$m, m_1, m_2, m_3, m_4$	Faktoren	-
$M_d, M_w$	Mittelpunkt Dorn- bzw. Hauptwalze	m
$P$	(Gesamt-)Leistung	W=Nm/s
$P_R$	Reibungsleistung	W=Nm/s
$P_S$	Scherleistung	W=Nm/s
$P_V$	plastische Volumenleistung	W=Nm/s
$\varphi_d, \varphi_w$	Eintrittswinkel Dorn- bzw Hauptwalze	1
$\varphi_n$	Fließscheide	1
$\varphi$	Umformgrad	1
$\dot{\varphi}$	Umformgeschwindigkeit	1/s
$\dot{\varphi}_v$	Vergleichsformänderungsgeschwindigkeit	1/s

$(r, \varphi, y)$	Zylinderkoordinaten	(m, 1, m)
$R_a, R_i$	Außen- bzw. Innenradius des Rings	m
$R_d, R_w$	Radius der Dorn- bzw. Hauptwalze	m
$\Delta S$	(Gesamt-) Stichabnahme	m
$\Delta S_d, \Delta S_w$	Stichabnahme der Dorn- bzw. Hauptwalze	m
$T$	Temperatur	K, °C
$\Delta T$	Temperaturdifferenz	K
$\vec{V}$	Geschwindigkeitsvektor	m/s
$(V_r, V_\varphi, V_y)$	Komponenten des Geschwindigkeitsvektors	(m/s, 1/s, m/s)
$v_i$	Geschwindigkeitsfeld	m/s
$v_h$	Horizontalkomponente der Ringgeschwindigkeit	m/s
$v_{hw}$	Horizontalkomponente der Hauptwalzengeschwindigkeit	m/s
$v_{rd}, v_{rw}$	Radialkomponente von Dorn- bzw. Hauptwalzengeschwindigkeit	m/s
$v_{td}, v_{tw}$	Tangentialkomponente von Dorn- bzw. Hauptwalzengeschwindigkeit	m/s
$v_{ra}, v_{ri}$	freie Parameter	m/s
$\Delta v_h$	Voreilungsunterschied	m/s
$V$	Volumen	
$(x, y, z)$	kartesische Koordinaten	(m, m, m)

## Zusammenfassung

Kontinuierliche Produkt- und Prozessoptimierungen liefern einen entscheidenden Beitrag zur langfristigen Sicherung des Technologievorsprungs am Fertigungsstandort Deutschland. Hierbei spielen Simulationswerkzeuge eine wichtige Rolle. Auch in der mittelständisch geprägten deutschen Schmiede- und Ringwalzindustrie ist der Trend zum zunehmenden Einsatz von Simulationsprogrammen zu erkennen.

Bei der Auslegung eines Ringwalzprozesses ist es erforderlich, die Vorringgeometrie und die Walzstrategie, d.h. die Vorschübe und Drehzahlen der einzelnen Walzen, so aufeinander abzustimmen, dass die geforderte Endkontur möglichst optimal erreicht wird. Hierbei ist der Prozessplaner bis heute vorwiegend auf seine Erfahrung angewiesen. Wenn es gelingt, das Zusammenwirken zwischen den verschiedenen Prozessparametern und dem Werkstück in einem Walzprozess mit hinreichender Genauigkeit im Rechner abzubilden, so können bereits vor dem Produktionsstart gezielt Optimierungen durchgeführt und dadurch die Anzahl kostspieliger Probewalzungen auf ein Minimum beschränkt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher ein Simulationswerkzeug auf Basis der elementaren Plastizitätstheorie entwickelt, mit dem der Werkstofffluss beim Walzen von Ringen mit rechteckigem und auch profiliertem Querschnitt in kurzer Zeit berechnet werden kann. Zusammen mit der Vorform des Ringes werden die Vorschubverläufe von Dorn- und oberer Axialwalze sowie die Drehzahl der Hauptwalze als Eingangsgrößen für das Simulationsverfahren verwendet. Das Programm liefert als Ergebnis die Geometrie des Ringes zu jedem Zeitpunkt des Walzprozesses. Mit Hilfe von Variantenrechnungen für verschiedene Kombinationen von Ringvorform und Walzstrategie kann so überprüft werden, ob die gewählte Kombination zum gewünschten Walzergebnis führt.

Die praktische Anwendung des Systems bei verschiedenen Walzprozessen hat gezeigt, dass mit der Simulation gute Übereinstimmungen in den wesentlichen Geometriemerkmalen des Ringes erzielt werden können.

### **Schlagworte:**

Ringwalzen, Simulation, Elementare Plastizitätstheorie

## **Abstract**

A continuous optimisation of product and process contribute in a decisive way to a long-term consolidation of the lead in technology in Germany as location of production. In this context simulating tools play an important role. The trend of an increasing application of simulating programmes can even be found in the medium-sized German forging and ring rolling industry.

When planning a ring rolling process it is necessary to coordinate the pre-ring geometry and the roll strategy, i. e. the feed rates and the speed of the individual rolls in such a way that the demanded final profile (contour) can be achieved as optimally as possible. Up to now the planner of process has mainly to rely on this experience here. If he succeeds in reproducing the interaction of different parameters of process and the work piece on PC, it is possible, even before start of production, to carry out specific optimisation. As a result of this, the number of costly trial rolls can be reduced to a minimum.

For this reason a simulating tool has been developed on the basis of the elementary theory of plasticity within the framework of this work. Using this system, the material flow during the rolling procedure of rings with rectangular and shaped cross sections, as well, can be calculated at a short time. Together with the pre-form of the ring, the feed rates of mandrel and upper axial rolls as well as speed of main roll are used as input values for the simulation procedure. The result of the programme is to determine the geometry of the ring at each point of time of the rolling process. With the help of different combinations of pre-forms and rolling strategies it can be checked if the selected combination will lead to the desired result of rolling.

The practical application of the system for different rolling processes has shown that a good accordance with the essential geometric characteristics of the ring can be achieved.

### **keywords:**

ring rolling, simulation, elementary theory of plasticity

# 1 Einleitung

Die Entwicklung eines Simulationsverfahrens für den Umformprozess Ringwalzen bildet den Kern dieser Arbeit. Die Computersimulation im Sinne eines technisch anwendbaren Werkzeugs spielt dabei eine zentrale Rolle. Daher wird im folgenden das Thema Simulation mit dem Ziel der Begriffsbestimmung kurz diskutiert.

In der VDI Richtlinie 3633 wird Simulation wie folgt definiert:

*Simulation ist die Nachbildung eines dynamischen Prozesses in einem Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind.*

Analysiert man vor diesem Hintergrund beispielsweise menschliche Verhaltensweisen, so stellt man fest, dass zielgerichtetes Handeln stets die Folge eines ergebnisorientierten Entscheidungsprozesses ist. Eine wesentliche Voraussetzung bei der Entscheidungsfindung ist die menschliche Fähigkeit, die zu erwartenden Handlungsfolgen bereits im Vorfeld kalkulieren und bewerten zu können. Alle entscheidungsrelevanten Zusammenhänge der Realität müssen dafür in einem Denkmodell abgebildet werden. Im weitesten Sinne kann der Prozess des Denkens selbst daher als ursprünglichste Form der Simulation betrachtet werden /1/.

Die technische Simulation dagegen, häufig auch als digitale Simulation bezeichnet, basiert auf der Abbildung möglichst aller für die Analyse eines technischen Sachverhalts relevanten Zusammenhänge in Form von Gleichungssystemen. Weiterhin ist eine geeignete Berechnungsmethodik erforderlich, um bei Variation der Eingangsgrößen das Verhalten der Zielgrößen errechnen zu können.

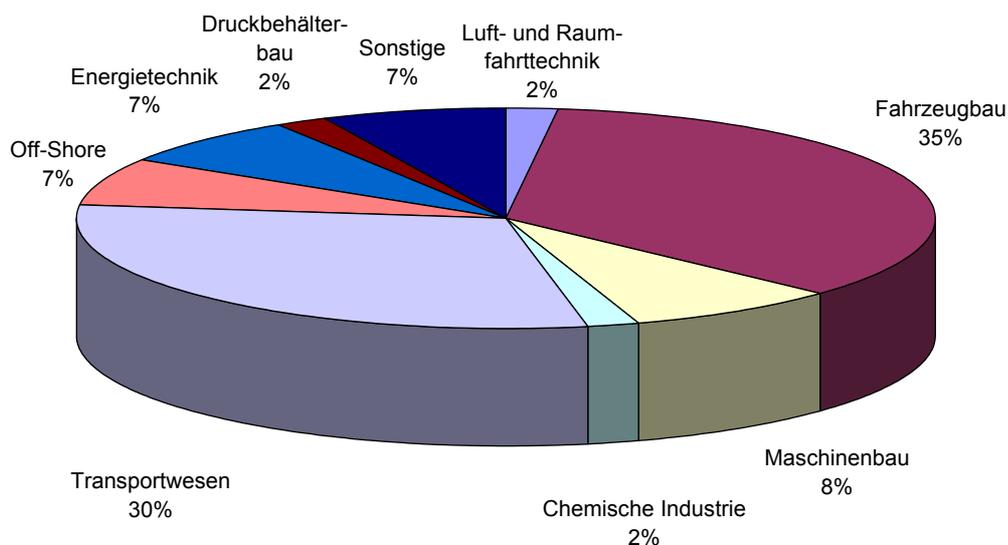
Diese Form der Simulation hat sich in den letzten 15 Jahren vom Werkzeug für den Spezialisten am Hochleistungsrechner zur kommerziell angebotenen PC-Software für den qualifizierten Berechnungs- und Entwicklungsingenieur gewandelt /2/. Moderne Produktionsbetriebe befassen sich zunehmend mit Simulationstechniken, um die auf Experimenten basierende "Trial and Error"-Methode zu ersetzen. Eine vorgeschaltete virtuelle Fertigung soll zielgerichtet, kostengünstig und schnell zur realen Fertigung führen. Insbesondere bei der Entwicklung und Erprobung sicherheitsrelevanter Bauteile in der Luft- und Raumfahrt sowie investitionsbedeutsamer Produkte der Kfz-, Anlagen- und Produktionstechnik ist die Simulation bereits fest in den Entwicklungszyklus integriert.

Die Palette der Simulationsverfahren im Maschinenbau ist vielfältig und reicht von dynamischen Bewegungs- und Belastungssimulationen (MKS) über die Simulation von Einbaupositionen einzelner Baugruppen (Digital Mockup) bis hin zur animierten

Darstellung komplexer kinematischer Systeme in einer virtuellen Welt (Virtual Reality). Im Bereich der Umformtechnik haben insbesondere Verfahren zur Strukturanalyse wie z.B. die Finite Elemente Methode eine große Bedeutung. Mit diesen Werkzeugen können detaillierte Aussagen hinsichtlich Materialfestigkeit und -verformung während eines Umformprozesses getroffen werden. Komplexe Massivumformprozesse wie beispielsweise das Gesenkschmieden oder das Ringwalzen erfordern häufig eine dreidimensionale Betrachtungsweise unter Einbeziehung der Temperatur und damit leistungsfähige Berechnungswerkzeuge.

Auch in der mittelständisch geprägten deutschen Schmiede- und Ringwalzindustrie ist der Trend zum zunehmenden Einsatz von Simulationsprogrammen zu erkennen. Bei einer Befragung der Mitgliedsunternehmen des Vereins Deutscher Eisenhüttenleute (VDEh) im Jahr 2000 nach der Art der durchgeführten Investitionen wurde die Einführung von Simulationsprogrammen nach Modernisierungen in den Bereichen Schmiedetechnologie und Arbeitsvorbereitung bereits an dritter Stelle genannt /3/. Gründe hierfür sind neben der verbesserten Anwendbarkeit der Software und fallender Hardwarekosten auch in den immer kürzer werdenden Produktentwicklungszyklen sowie den steigenden Bauteilanforderungen zu sehen.

Charakteristisch für die Branche sind Erzeugnisse aus hochlegiertem Stahl und Sonderlegierungen, die oftmals nach Kundenentwürfen gefertigt werden. Bild 1 zeigt die Lieferstruktur der im VDEh zusammengeschlossenen Ringwalzwerke.



Quelle: VDEh, 2000

Bild 1: Lieferstruktur der im VDEh zusammengeschlossenen Ringwalzwerke /3/

Die Lieferungen der Ringwalzindustrie gehen je zu einem Drittel in den Fahrzeugbau und in das Transportwesen, vorwiegend in Form von Rädern und Bandagen für Radsätze von Schienenfahrzeugen. Daneben sind der Maschinenbau mit 8%, die Off-Shore- und die Energietechnik mit je 7% mit Produkten wie Wälzlageringen und Flansche zu nennen.

In einer ständig expandierenden Produktpalette mit neuen Bauteilgeometrien und -werkstoffen zeigt sich der Bedarf an dem Einsatz eines leistungsfähigen Simulationswerkzeugs zur Prozessauslegung. Wenn es gelingt, das Zusammenwirken zwischen den verschiedenen Prozessparametern und dem Werkstück in einem Walzprozess mit hinreichender Genauigkeit im Rechner abzubilden, so können bereits vor dem Produktionsstart gezielt Optimierungen durchgeführt und dadurch die Anzahl kostspieliger Probewalzungen auf ein Minimum beschränkt werden. Insbesondere der Fertigungsanlauf von neuen Produkten, für die im Unternehmen noch keine Erfahrungswerte im Hinblick auf Vorformgeometrie und Prozessparameter vorliegen, kann durch den Einsatz eines geeigneten Simulationswerkzeugs schneller und zuverlässiger realisiert werden.

Darüber hinaus liefern kontinuierliche Produkt- und Prozessoptimierungen einen entscheidenden Beitrag zur langfristigen Sicherung des Technologievorsprungs am Fertigungsstandort Deutschland.

## 2 Problemstellung und Zielsetzung

Bei der Auslegung eines Ringwalzprozesses ist es erforderlich, die Voringeometrie und die Walzstrategie, d.h. die Vorschübe und Drehzahlen der einzelnen Walzen, so aufeinander abzustimmen, dass die geforderte Endkontur möglichst optimal erreicht wird. Mit Hilfe einer 3D-Simulation des Werkstoffflusses könnte das Zusammenwirken von Walzenzustellungen und Vorformgestalt in verschiedenen Kombinationen durchgerechnet und so der Walzprozess bereits vor dem Produktionsstart gezielt optimiert werden (Bild 2).

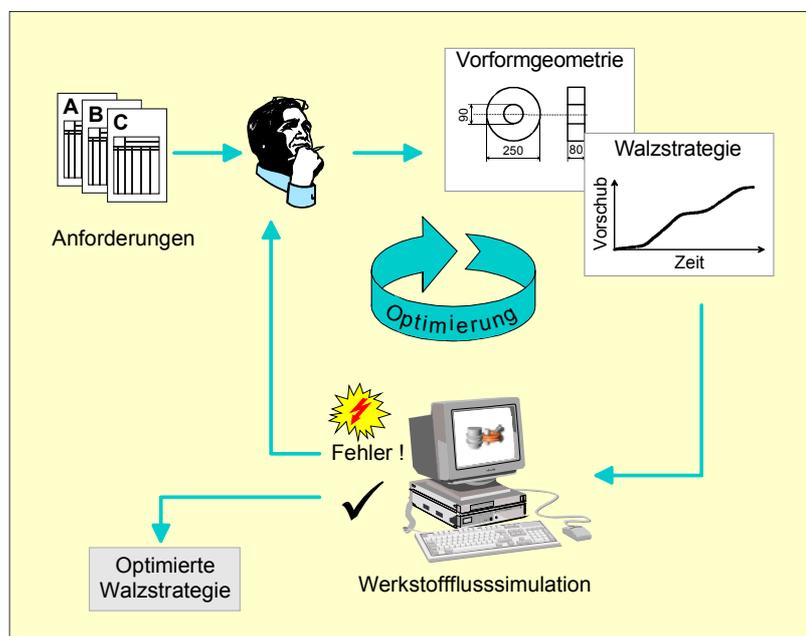


Bild 2: Werkstoffflusssimulation zur Ermittlung einer optimierten Walzstrategie

Für die Werkstoffflusssimulation existieren bislang noch keine Systeme, die den kompletten Ringwalzprozess bei vertretbarem Rechenaufwand und hinreichender Genauigkeit abbilden können. Um die wirtschaftliche Fertigung eines fehlerfreien Ringwalzproduktes mit kleinen Bearbeitungszugaben sicherzustellen, ist der Prozessplaner daher bis heute vorwiegend auf seine Erfahrung und die Ergebnisse kostenintensiver Probewalzungen angewiesen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, auf der Grundlage der elementaren Plastizitätstheorie ein Simulationssystem für das Walzen rechteckiger und profilierter Ringe zu entwickeln, das sich durch kurze Rechenzeit auszeichnet und somit dem Anwender als effizientes Hilfsmittel für die Prozessauslegung zur Verfügung steht.

Für das Simulationsverfahren werden die Vorform des Ringes und die Walzstrategie als Eingangsgrößen benötigt. Die Walzstrategie umfasst die Prozessgrößen Drehzahl der Hauptwalze und Vorschubverläufe von Dorn- und oberer Axialwalze. Das Simulationsprogramm liefert als Ergebnis die Geometrie des Ringes zu jedem Zeitpunkt des Walzprozesses. Ein Abgleich mit praktischen Walzversuchen ist erforderlich, um das System auf den verwendeten Werkstoff und die Umformtemperatur abzustimmen. Anschließend können mit dem Simulationsprogramm Variantenrechnungen für verschiedene Kombinationen von Ringvorform und Walzstrategie durchgeführt werden. So kann bereits vor einer kostenintensiven Probewalzung überprüft werden, ob die gewählte Kombination zum gewünschten Walzergebnis führt.

## 3 Stand der Technik

### 3.1 Radial-Axial-Ringwalzen

Das Walzen von ringförmigen Bauteilen ist ein Umformverfahren, das bereits seit Beginn des Maschinenzeitalters existiert. So wurden beispielsweise in England schon um 1830 Ringe auf Radial-Walzmaschinen gefertigt /4/. Erste Radial-Axial-Ringwalzmaschinen wurden ca. 20 Jahre später entwickelt. Die entscheidenden Impulse in dieser Zeit kamen durch den sich rasch entwickelnden Eisenbahnverkehr und den damit verbundenen hohen Bedarf an Radreifen /38/.

Seit etwa 1950 ist die Entwicklung der Ringwalztechnologie durch eine zunehmende Automatisierung und die Verkettung mit anderen Maschinen zu Fertigungslinien gekennzeichnet /5/, /6/. Die Verwendung von kegeligen Axialwalzen und die Entwicklung eines verfahrenbaren Axialgerüsts führten zu einem Maschinenaufbau, dessen wesentliche Komponenten heute noch Bestandteile einer modernen Ringwalzanlage sind /7/.

Ab Anfang der 70er Jahre gab es bedingt durch den allgemeinen Fortschritt in der Mess- und Regelungstechnik auch beim Ringwalzen eine enorme Weiterentwicklung im antriebs- und steuerungstechnischen Bereich /8/, /9/, /10/, /11/, /12/. Auf Basis modernster Rechner- und Digitaltechnik befassen sich heute aktuelle Untersuchungen mit der Erfassung von Prozessinstabilitäten /13/ und der Entwicklung geeigneter Regelungsstrategien zu deren Vermeidung /14/.

Obwohl in der Vergangenheit verschiedene Untersuchungen /15/, /16/, /17/ zu einer Verbesserung des Prozessverständnisses beigetragen haben, ist es bis heute noch nicht gelungen, das Radial-Axial-Ringwalzen in seiner Gesamtheit vollständig zu beschreiben. Die Analyse und Optimierung des Ringwalzprozesses, und hierbei insbesondere die Betrachtung von profilierten Ringen, ist nach wie vor noch Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten /18/, /19/.

### 3.1.1 Das Ringwalzverfahren

Der Verfahrensablauf beim Ringwalzen besteht darin, dass ein konzentrisch ge-  
lochter Vorring zwischen glatten oder auch profilierten Walzen durch Verminderung  
der Wanddicke im Durchmesser aufgeweitet wird. Bei dem in Bild 3 dargestellten  
Prinzip des Radial-Axial-Ringwalzens wird zeitgleich die Ringhöhe mit einem zu-  
sätzlich in axialer Richtung wirkendem Kegelwalzenpaar reduziert. Diese kegelfö-  
rmigen Walzen werden auch als Axialwalzen bezeichnet.

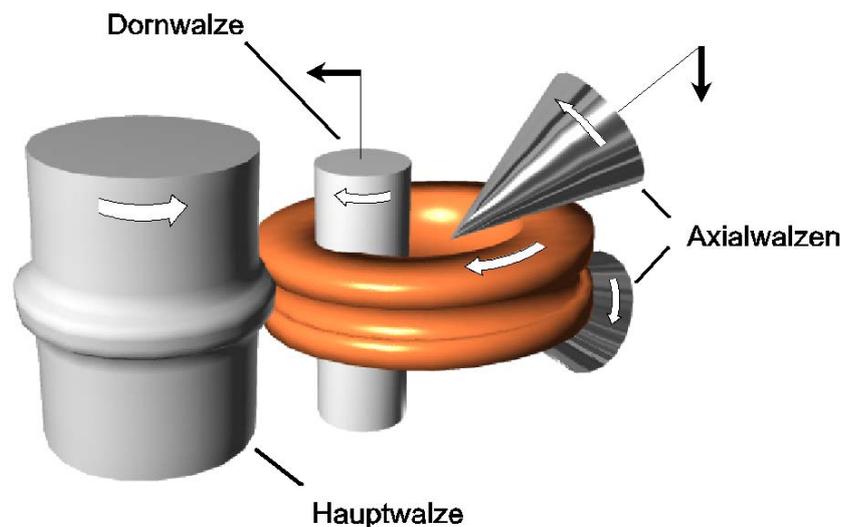
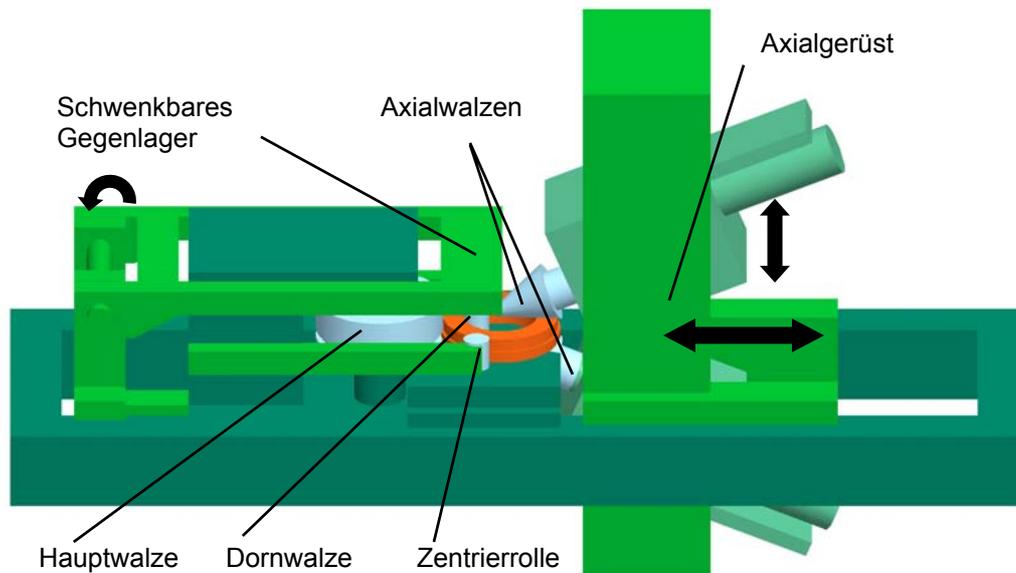


Bild 3: Prinzip des Radial-Axial-Ringwalzens

Die ortsfeste Hauptwalze wird mit konstanter Drehzahl angetrieben, während die Dornwalze im Schleppbetrieb arbeitet. Der Durchmesser der Dornwalze ist wesentlich kleiner als der der Hauptwalze, um den Materialverlust beim Lochen des Vorrings möglichst gering zu halten. Über die Drehzahl der angetriebenen Axialwalzen kann die Ringlage beeinflusst werden.



**Bild 4:** Aufbau eines Radial-Axial-Ringwalzwerkes des Typs RAW 20/16

Der erhitzte Ring wird auf diese Weise in zwei Walzspalten gleichzeitig umgeformt. Der Antrieb für die Drehbewegung der verschiedenen Walzen erfolgt über drehzahlregelte Gleichstrommotoren. Die Vorschübe von Dornwalze und Axialwalzen werden durch hydraulisch angetriebene Schlittensysteme realisiert. Zusätzlich wird das Axialgerüst, an dem sich die Axialwalzen befinden, während des Walzvorganges in radialer Richtung mitgeführt, damit die Axialwalzen ständig im Eingriff bleiben können. Des Weiteren befinden sich seitlich des Ringes zwei über hydraulische Zentrierarme positionierbare Zentrierrollen, die zur Stabilisierung des Ringes während des Walzvorganges dienen. Aus diesen parallel ablaufenden Bewegungen ergeben sich hohe Anforderungen an die Maschinensteuerung, insbesondere vor dem Hintergrund, dass nach einem stabilen Prozessverlauf die gewünschte Endgeometrie reproduzierbar erreicht werden soll.

Die Produktpalette mittels Ringwalzen gefertigter Bauteile reicht von Wälzlagerrollen über Flansche bis hin zu Radbandagen für Schienenfahrzeuge. Bild 5 zeigt den Radsatz eines Schienen-Nahverkehrsfahrzeugs, bei dem im Ringwalzverfahren hergestellte Radreifen zum Einsatz kommen.

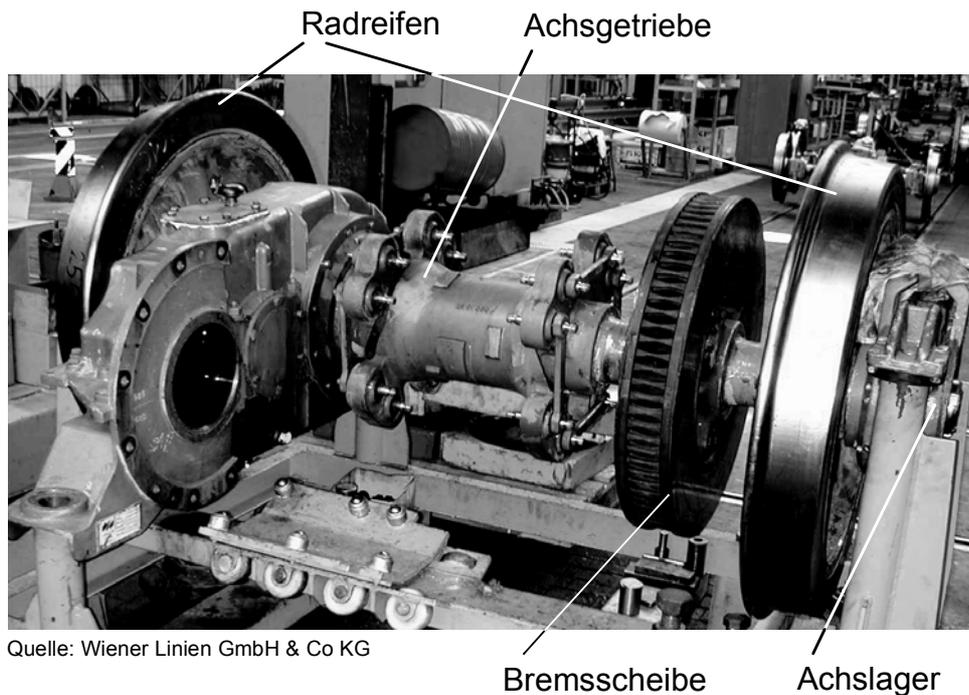


Bild 5: Radsatz für den Schienen-Nahverkehr

### 3.1.2 Das Walzen von Ringen mit rechteckigem Querschnitt

Ringe mit rechteckigem Querschnitt gehören zu den klassischen Produkten, die auf einem Radial-Axial-Ringwalzwerk gefertigt werden können. Im Allgemeinen werden rechteckige Ringe nach dem Geometrieverhältnis von Höhe zu Breite ihres Profilquerschnitts klassifiziert [20]. Danach ergeben sich hülsen- oder scheibenförmige Ringe bzw. Ringe mit quadratischem Querschnitt (Bild 6).

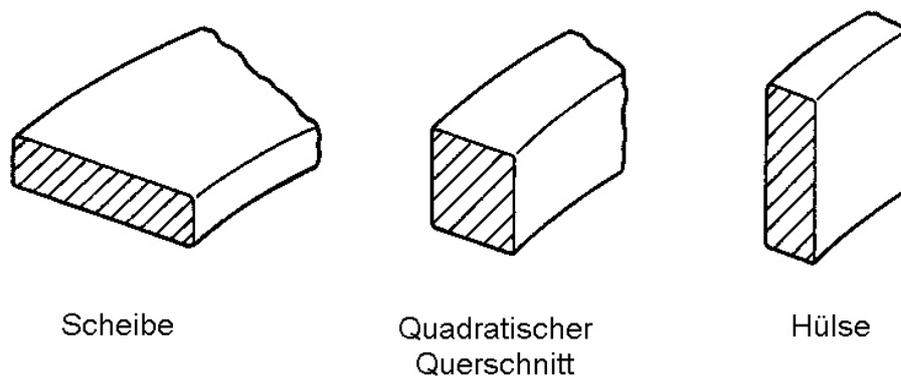


Bild 6: Beispiele rechteckiger Ringquerschnitte

Das Walzen rechteckiger Ringprofile erfolgt mit unprofilieren Walzen durch Umformung sowohl im Radial- als auch im Axialwalzspalt. Im Hinblick auf den Werkstofffluss ergibt sich daraus ein System mit 2 Freiheitsgraden. So kann beispielsweise das Material im Radialwalzspalt sowohl in Umfangsrichtung als auch in axialer Richtung fließen. Dagegen wird der Werkstofffluss in Richtung von Haupt- und Dornwalze durch die Walzen selbst behindert. Ein Höhenwachstum des Ringes aufgrund eines Materialflusses in axialer Richtung ist unerwünscht, da dieser nicht zur Vergrößerung des Ringdurchmessers beiträgt. Dieser Effekt wird auch als axiale Breitung bezeichnet.

Analoge Überlegungen gelten für den Axialwalzspalt in Bezug auf die Breitung in radialer Richtung (Wandstärke). Die in einem Walzspalt entstehende Breitung muss zusätzlich zu den sich aus den programmierten Vorschüben ergebenden Materialbewegungen im gegenüberliegenden Walzspalt wieder mit abgewalzt werden. Neben einer erhöhten Maschinenbelastung kann es bei bestimmten Material- und Geometriekonstellationen dazu kommen, dass Material insbesondere im Kantenbereich des Ringes nur noch hin und her gewalzt wird, ohne dass der Ring nennenswert wächst. Die Folge davon ist meist eine lokale Überhitzung des Werkstoffs, die einher geht mit der Gefahr von nicht mehr korrigierbaren Walzfehlern bis hin zur Materialzerstörung. In /21/ wird diese Thematik am Beispiel von Titanlegierungen eingehend untersucht. In Abhängigkeit der geometrischen Verhältnisse des Ringes lassen sich Walzstrategien ermitteln, mit denen eine entstehende Breitung vielfach wieder sicher verwalzt werden kann.

### **3.1.3 Das Walzen von Ringen mit profiliertem Querschnitt**

Beim Walzen von Ringen mit profiliertem Querschnitt werden Haupt- und/oder Dornwalzen eingesetzt, die entsprechend des zu erzielenden Ringprofils auf ihrer Mantelfläche konturiert sind und das Walzkaliber bilden. Mit der Radial-Axial Ringwalztechnologie können sowohl innen- als auch außenprofilierete Ringe gefertigt werden. Bild 7 zeigt Beispiele walzbarer Profilquerschnittsformen.

Das Herstellen axial profilierter Ringe auf konventionellen Radial-Axial-Ringwalzmaschinen ist ohne geeignete Zusatzeinrichtung nicht möglich. Die Schwierigkeit ist hierbei, dass sowohl das Durchmesserwachstum des Ringes als auch die Reduzierung der Wanddicke im Radialwalzspalt die Lage des Ringes relativ zu den profilierten Axialwalzen beeinflusst. In /23/ wird eine Verfahrenserweiterung beschrieben, mit der axial profilierter, scheibenförmige Ringe ausschließlich durch Umformung im Axialwalzspalt mit symmetrischer axialer Zustellung der profilierten Kegelwalzen gewalzt werden können. Aktuelle Untersuchungen befassen

sich mit der Entwicklung eines neuen inkrementellen Umformverfahrens auf der Basis eines Drückwalzverfahrens /24/. Da es sich hierbei jedoch um Sonderverfahren handelt, werden im Folgenden nur radiale Ringprofile betrachtet.

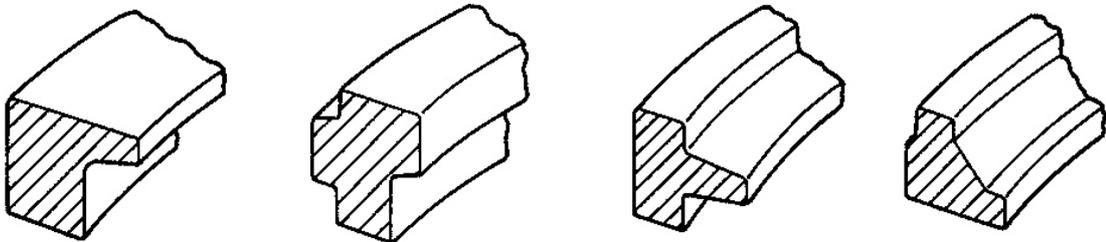
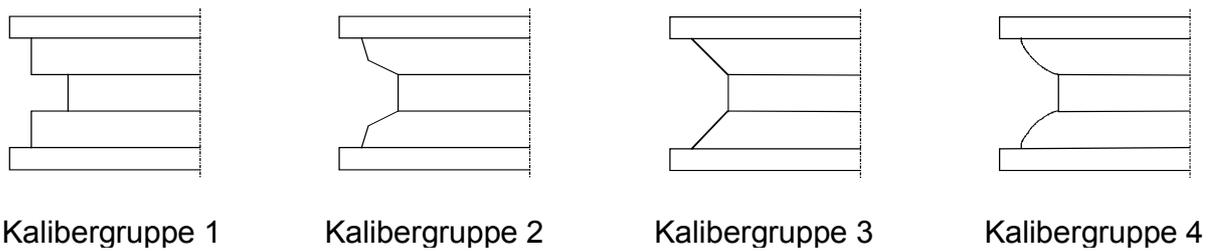


Bild 7: Beispiele für walzbare radiale Profilquerschnittsformen nach /22/

Im Vergleich zum konventionellen Walzen flacher, profilierter Werkstücke wie z.B. Schienenprofilen, ist der Walzprozess zum Herstellen profilierter, runder Ringe weitaus schwieriger zu beherrschen. In konventionellen Walzstraßen kann mit einer Vielzahl von Gerüsten eine Folge unterschiedlicher Walzkaliber realisiert werden, die jeweils eine optimale Massenverteilung von Stich zu Stich ermöglichen /25/. Nur in Sonderfällen erfolgt das Warmwalzen von Profilen in einem Stich /26/. Dagegen werden innen- oder außenprofilierter Ringe in nur einem Kaliber, das durch Haupt- und Dornwalze gebildet wird, gefertigt. Im Verlauf eines Walzprozesses ändert sich bei festliegender Geometrie des Kalibers nur der Walzspalt, d.h. der Abstand zwischen den Walzen. An allen Stellen des Walzspaltes ist diese Änderung je Zeiteinheit gleich groß, bezogen auf die jeweilige Wanddicke des Ringes kann es jedoch zu Unterschieden kommen. In Abhängigkeit von der Vorform des Ringes entstehen so unterschiedliche Umformgrade in einzelnen Zonen des Ringes. Insbesondere bei unsymmetrischen Profilen oder in Bereichen geringer Wandstärke wächst der Ring dadurch ungleichmäßig, er wird konisch, bauchig oder reißt sogar /27/.

In einem Forschungsvorhaben des IBF der RWTH Aachen wurden Grundlagenuntersuchungen zum Walzen profilierter Ringe durchgeführt /16/. Ziel dieser Arbeit war es, auf der Grundlage empirischer Untersuchungen die Einflüsse auf die Kaliberfüllung und Profilausbildung beim Walzen von symmetrischen Aussen-T-Profilen zu untersuchen. Dabei wurden insbesondere die Vorgaben für die radiale Zustellung, die Walzgeschwindigkeit und die Geometrie der Hauptwalze (Kaliber) variiert. Die Einteilung der verschiedenen Geometrien in Kalibergruppen wurde gemäß Bild 8 vorgenommen.

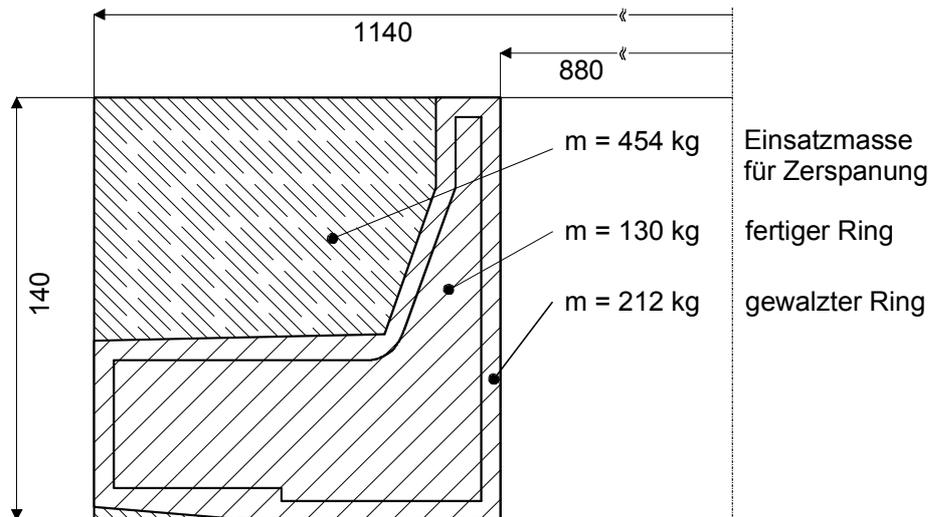


**Bild 8:** Einteilung der Hauptwalzengeometrien in Kalibergruppen nach /16/

Insbesondere bei Kalibern der Gruppe 3 konnte aufgrund der gradlinigen, nicht abgesetzten Flanken ein günstiger Materialquerfluss in das Kaliber hinein realisiert werden. Hier wirkten sich Variationen der Wandstärke und der bezogenen Wandstärkenabnahme des Ringes im Vergleich zu den anderen Gruppen weniger stark auf die Profillfüllung aus. Zusammenfassend konnte festgestellt werden, dass die Abstimmung der Geometrie von Ringvorform und Kaliber maßgeblich für einen hohen Füllgrad war.

Eine weitere Schwierigkeit beim Walzen profilierter Ringe liegt darin, die gewünschte Profillfüllung genau dann vollständig abgeschlossen zu haben, wenn der Fertigungsdurchmesser erreicht ist. Abhängig von den Randbedingungen im Walzprozess kann der Fertigungsdurchmesser und damit das Abschaltkriterium bereits erreicht werden, obwohl das Profil noch nicht vollständig ausgebildet ist. Es kann andererseits aber auch vorkommen, dass ein bereits gefülltes Profil wieder leer gezogen wird, wenn weitergewalzt werden muss, um den Enddurchmesser zu erzielen.

Eine auf die geometrischen Verhältnisse abgestimmte Walzstrategie ist daher beim Walzen profilierter Ringe ebenso erforderlich wie die Berücksichtigung geeigneter Bearbeitungszugaben, um aus Prozessschwankungen resultierende Formfehler auszugleichen. Eine Analyse der Bearbeitungszugaben hat gezeigt, dass das Aufmaß für die mechanische Bearbeitung am gewalzten Ring den größten Anteil am Materialverlust vom Rohteil bis zum Fertigung ausmacht /28/. Bild 9 zeigt exemplarisch die Massenbilanz eines gewalzten Flansches /29/. Wirtschaftlich ist es äußerst ungünstig, den Flansch zerspanend aus einem Rechteckring zu fertigen. Man käme hierbei nur auf eine Nutzmasse von weniger als einem Drittel der Einsatzmasse. Demgegenüber kann durch Verwendung einer profilierten Hauptwalze deutlich endkonturnäher gearbeitet werden.

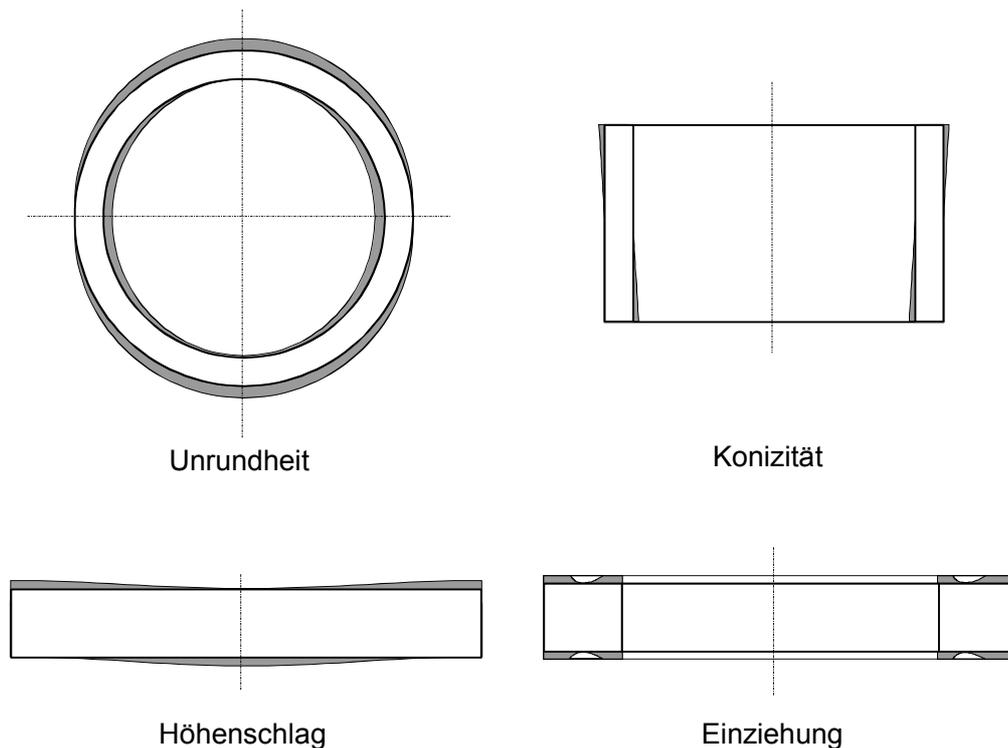


**Bild 9:** Massenbilanz eines gewalzten Flansches nach /29/

Hohes Einsparpotenzial bei den Materialkosten durch Verwendung profilierter Walzen ist insbesondere dann gegeben, wenn die Form des Ringes stark profiliert ist oder aber wenn das gewalzte Material extrem teuer ist, wie beispielsweise bei Ringen aus Titan- und Nickelbasislegierungen, wie sie in der Luft- und Raumfahrttechnik Anwendungen finden. Da im Walzprozess entstehende Fehler der Ringgeometrie wesentlichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit dieses Umformverfahrens haben, werden im Folgenden typische Formfehler zusammengefasst.

### 3.1.4 Formfehler beim Ringwalzen

Formfehler beim Ringwalzen können durch eine Vielzahl von Störeinflüssen und deren Kombinationen verursacht werden. In der Vergangenheit wurden verschiedene Steuerungskonzepte entwickelt, um den Walzprozess weitgehend automatisch ablaufen zu lassen und fehlerfreie Ringe zu walzen /30/, /31/. Die Praxis in den Unternehmen der Ringwalzindustrie zeigt jedoch, dass trotz stetiger Verbesserungen in diesem Bereich manuelle Eingriffe des erfahrenen Maschinenbedienpersonals in den Walzprozess häufig nach wie vor noch erforderlich sind, um Walzfehler und damit die Produktion von Ausschuss zu vermeiden.



**Bild 10:** Typische Formfehler beim Ringwalzen

*Lieb* hat sich in /32/ detailliert mit der Entstehung verschiedener Formfehler und Maßnahmen zu deren Minimierung befasst. **Bild 10** zeigt eine Auswahl typischer Formfehler beim Ringwalzen.

### **Unrundheit**

Die Abweichung des Ringes von der idealen runden Form wird als Unrundheit bezeichnet und ist einer der am häufigsten vorkommenden Fehler beim Ringwalzen. Wesentliche Einflussgröße auf die Unrundheit ist die in radialer Richtung auf den Ring wirkende Axialgerüstkraft, die aus der Summe der Relativgeschwindigkeiten zwischen Kegelwalzen und Ring resultiert /33/.

Eine gezielte Beeinflussung der Relativgeschwindigkeiten – und damit auch der sich daraus ergebenden Axialgerüstkraft – ist durch Verlagerung des Ringes aus der Maschinenlängsachse möglich. Hier kann durch manuelle Vorgabe eines Verlagerungswinkel durch den Maschinenbediener in die Steuerung eingegriffen werden. Diese Funktion spielt auch insbesondere beim Profilwalzen für das Erzielen einer guten Profulfüllung eine wesentliche Rolle.

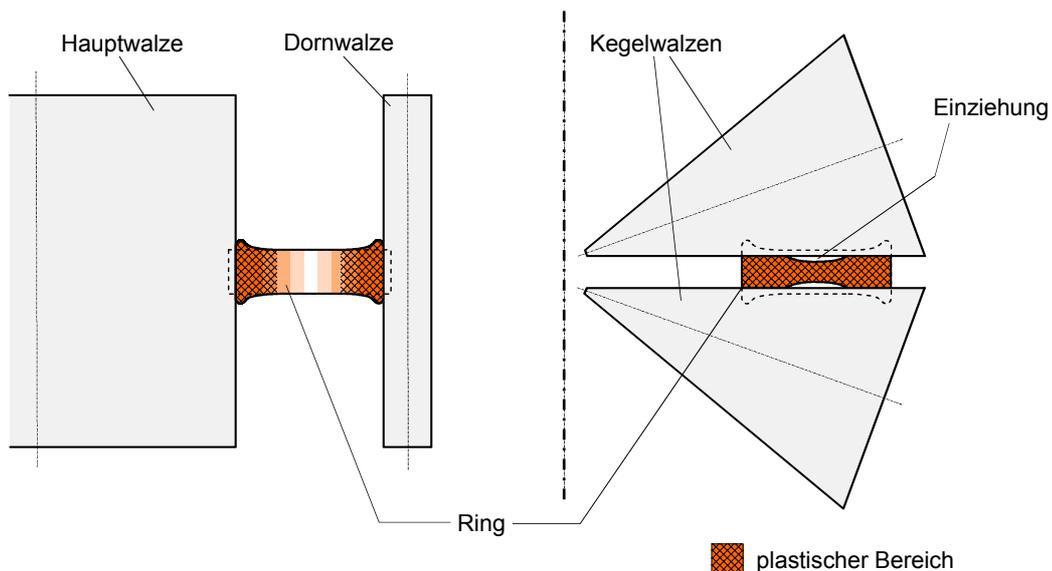
## Konizität und Höhenschlag

Bei dem als Konizität bezeichneten Walzfehler sind die Mantellinien des Ringes geneigt. Der Außendurchmesser und/oder der Innendurchmesser sind dabei Funktionen der Ringhöhe. Eine wesentliche Ursache für diesen Walzfehler liegt in einer bereits fehlerhaften Vorform des Ringes. Nach einem nicht einwandfreien Lochvorgang kann der Ring beispielsweise eine konische Innenmantelfläche besitzen. Dieser Defekt kann in bestimmten Grenzen durch eine gezielte Neigung der Dornwalze ausgeglichen werden /20/.

Der Höhenschlag wird durch periodische Krümmungen der Stirnfläche eines Ringes in axialer Richtung charakterisiert. Die Entwicklung dieses Walzfehlers, der auch als axiale Welligkeit bezeichnet wird, hängt von den Drehzahlen der Axialwalzen ab. Durch Drehzahldifferenzen zwischen oberer und unterer Kegelwalze werden Abweichungen der im Idealfall gleich großen Antriebsmomente erzeugt. Im Zusammenwirken mit dem Walztisch ergibt sich ein in axialer Richtung auf den Ring wirkendes Biegemoment /32/. Zur Vermeidung des Höhenschlags sind korrekte Maschineneinstellungen und insbesondere die Abstimmung der axialen Antriebsmomente Voraussetzung.

## Einziehungen

In /34/ wurde das Entstehen von Einziehungen an den Stirnseiten scheibenförmiger Ringe, auch „Fischmaulbildung“ genannt, untersucht.



**Bild 11:** Entstehung von Einziehungen nach /35/

Beim Walzen von Ringen mit scheibenförmigem Querschnitt tritt prinzipiell eine Wulstbildung im Radialwalzspalt auf, da aufgrund der relativ geringen momentanen Umformgrade nur die Zonen in Walzennähe plastifiziert werden und das Material vom restlichen Querschnitt an der Streckung behindert wird (Bild 11). Der entstandene ungleichmäßige Querschnitt läuft eine halbe Ringumdrehung später in den Axialwalzspalt ein. Dort kommt es zu einer unterschiedlichen bezogenen Abnahme der Ringhöhe. Im Bereich der Wulstzonen hat das Material dadurch eine höhere Streckneigung als im mittleren Bereich. Aufgrund des Materialzusammenhalts erfolgt jedoch eine gleichmäßige Streckung des gesamten Ringquerschnitts /35/. Ergebnis dieser Dehnung im mittleren Bereich ist eine Einziehung. In /36/ werden experimentelle Untersuchungen zum Walzen profilierter Ringe mit Einziehungen vorgestellt.

Damit solche Walzfehler weitgehend vermieden werden, müssen die Werkzeugzustellungen und damit die Stichabnahmen im Radial- und Axialwalzspalt aufeinander abgestimmt werden. Da sich die Ringgeometrie während des Walzablaufes ständig ändert, muss das Vorschubverhältnis kontinuierlich an die aktuellen Gegebenheiten angepasst werden. Die Wahl der richtigen Walzstrategie kann somit zu einer Minimierung dieses Fehlers führen.

### 3.1.5 Prozessauslegung

Eine wichtige Aufgabe des Prozessplaners ist die optimale Auslegung des Walzprozesses zur effektiven Produktion fehlerfreier Ringe. Ausgehend von der zu erzielenden Fertigform müssen unter Berücksichtigung der Leistungsgrenzen der Anlage die Kinematik der Walzen (Walzstrategie) und die Geometrie der Vorform festgelegt werden.

Im folgenden werden unter dem Begriff Walzstrategie die Prozessgrößen

- Vorschubverlauf der Dornwalze,
- Vorschubverlauf der oberen Axialwalze und
- Drehzahl der Hauptwalze

zusammengefasst. Weitere Prozessparameter wie beispielsweise Ringverlagerungswinkel und Zentrierrollenpositionen werden hier nicht betrachtet.

Eine typische Vorform für das Walzen von Ringen mit rechteckigem Querschnitt ist der bombierte Ring (Bild 12). Üblicherweise werden diese Vorformen durch einen vierstufigen Umformprozess aus zylinderförmigen Abschnitten von Stangenmaterial hergestellt. Das Volumen der Ringvorform wird durch das Volumen des Fertigringes

unter Berücksichtigung von Bearbeitungszugaben und Zunderverlusten bestimmt. In /37/ wird ein Programm vorgestellt, mit dem diese Auslegung rechnergestützt erfolgen kann.



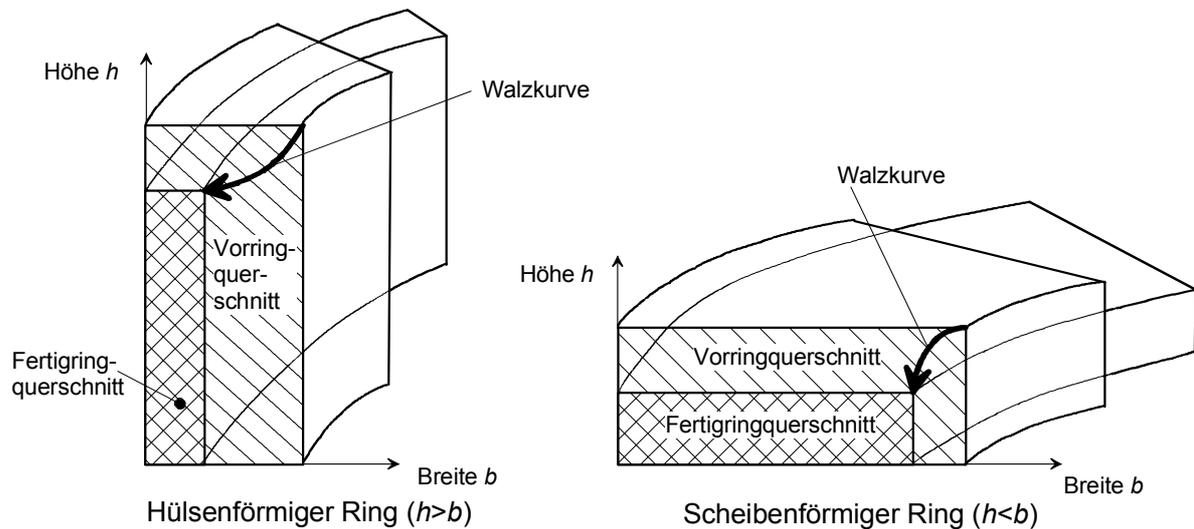
Bild 12: Bombierter Ring nach dem Lochen

Die einzelnen Umformstufen bei der Vorformherstellung sind üblicherweise Anstauchen, Vorlochen, Durchlochen und Stauchen auf Fertigmaß. Der Lochdurchmesser sollte hierbei nur wenig größer als der Dorndurchmesser der Ringwalzanlage sein, um den Materialverlust durch den Lochvorgang gering zu halten.

Für das Walzen von profilierten Ringen mit großer Profiltiefe gegenüber der Ringbreite sind häufig Werkstücke mit aufwendigerer Vorform erforderlich. Die Grenzen der Vorformvariation ergeben sich hier aus Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Je genauer die Vorform dem Fertigring geometrisch angepasst werden muss, desto höher sind die Kosten dafür. Daher ist man zunächst bestrebt, einfach herzustellende Vorformen wie bombierte oder rechteckige Ringe mit speziell auf den Fertigring abgestimmten Walzstrategien zu kombinieren.

Eine wichtige Eingangsgröße für eine Ringwalzanlage ist das zu jedem Zeitpunkt definierte Verhältnis von Höhe zu Breite des Ringes, die sog. Walzkurve. In der Maschinensteuerung werden aus der vom Anwender vorgegebenen Walzkurve unter Berücksichtigung der Leistungsgrenzen der Anlage die jeweiligen Vorschübe von Dorn und Axialwalzen berechnet. Diese zeitlichen Verläufe der Walzenbewegungen werden in Verbindung mit der Drehzahl der Hauptwalze als Walzstrategie bezeichnet. Zusammen mit der Vorform des Ringes wird die Walzstrategie als Eingangsgröße für das im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Simulationsverfahren verwendet. Ausgangsgröße ist die Geometrie des Ringes zu jedem Zeitpunkt des Walzprozesses.

**Bild 13** zeigt zwei typische Walzkurven, nach denen der Ring von seiner Anfangs- in seine Endgeometrie überführt wird. Es ist zu erkennen, dass bei hülsenförmigen Ringen zunächst mehr Material in der Höhe abgewalzt wird, bevor später im Walzprozess die Abnahmen in der Wandstärke überwiegen. Bei scheibenförmigen Ringen sind die Verhältnisse umgekehrt.



**Bild 13:** Typische Walzkurven für hülsen- und scheibenförmige Ringe /38/

Diese Walzkurven beinhalten die Umsetzung von Technologiestudien, die bei der Fa. Wagner in Dortmund durchgeführt wurden. Ergebnis dieser Untersuchungen war, dass sich der größtmögliche Anteil der Verformungsarbeit dann zur Streckung des Ringes in Umfangsrichtung umsetzen lässt, wenn man während der Hauptwalzphase das Verhältnis Höhen- zur Wanddickenabnahme gleich dem Verhältnis Wanddicke zu Höhe hält /38/.

Um das Zusammenspiel zwischen gewählter Walzstrategie und Vorform des Ringes bereits vor dem Produktionsstart gezielt überprüfen und ggf. optimieren zu können, bedarf es eines leistungsfähigen Berechnungswerkzeugs. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationssystem wurde vor diesem Hintergrund konzipiert und ermöglicht es, den Werkstofffluss und damit die entstehende Ringgeometrie einschließlich der Profillfüllung für einen Walzprozess vorherzusagen /39/. Das Simulationsprogramm liefert die Aussage, ob mit den gewählten Größen Vorform des Ringes und Walzstrategie das gewünschte Walzergebnis erzielt werden kann.

## 3.2 Ansätze zur Ermittlung des Werkstoffflusses beim Ringwalzen

Als Ausgangspunkt zur Berechnung des Werkstoffflusses stehen die 10 Grundgleichungen der Plastomechanik zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um ein Differentialgleichungssystem, das 3 Kräfte-Gleichgewichtsbedingungen, 1 Fließkriterium und 6 Spannungs-Verzerrungs-Beziehungen beinhaltet /40/. In diesen Gleichungen treten 10 unbekannte Größen auf, die im Allgemeinen Funktionen von Ort und Zeit sind. Dieses System der Grundgleichungen ist so komplex, dass es bis heute nicht gelungen ist, es allgemeingültig vollständig analytisch zu lösen /41/. Daher ist man bei der Lösung praktischer Fragestellungen darauf angewiesen, entweder numerisch eine möglichst gute Approximation der exakten Lösung zu finden oder das System durch zulässige Näherungen zu vereinfachen.

Im Bereich der numerischen Berechnungen hat sich die Finite Elemente Methode (FEM) zu einem leistungsstarken Werkzeug entwickelt, nicht zuletzt aufgrund der rasanten Steigerung der Rechenleistung der verwendeten Computer. Aber auch die auf Vereinfachungen basierenden Lösungsmethoden haben nach wie vor noch ihre Berechtigung, insbesondere da sie vergleichsweise schnell Tendenzaussagen in Bezug auf die Wirkung einzelner Umformparameter ermöglichen. Aus diesem Grund werden analytische Simulationsmodelle häufig auch zur Prozessregelung in Echtzeit eingesetzt /42/. Im Folgenden werden verschiedene Lösungsverfahren im Hinblick auf den Ringwalzprozess diskutiert.

### 3.2.1 Finite-Elemente-Methode

In vielen Bereichen der Umformtechnik werden heute Simulationswerkzeuge wie die FEM zur Prozessauslegung erfolgreich eingesetzt. Ende der 80er Jahre wurden die ersten 2-dimensionalen FEM-Modelle für das Walzen von Ringen mit Rechteckquerschnitt vorgestellt /43/. In den folgenden Jahren gab es eine Vielzahl von Autoren, die sich mit der Erweiterung auf 3-D Modelle beschäftigten /44/, /45/, /46/ /47/. Häufig beschränkten sich diese dreidimensionalen FEM-Simulationen allerdings auf die Analyse der Umformung eines Ringsegmentes in jeweils einem der Walzspalte /48/. In einem weiteren Ansatz wurde die FEM-Rechnung im Walzspalt auf ein 2-D Problem reduziert, während der Werkstofffluss in Umfangsrichtung analytisch berechnet wurde /49/.

Wenn jedoch auch der Einfluss der momentan noch nicht umgeformten Ringbereiche sowie die Koppelung der beiden Umformzonen nicht vernachlässigt werden soll, so ist eine vollständige Vernetzung des Ringes unumgänglich. Hierbei ist zu-

nächst eine über den gesamten Ringumfang sehr feine räumliche Diskretisierung erforderlich, die sich an den Erfordernissen in den Umformzonen orientiert. Der Prozess an sich ist instationär, d.h. im Gegensatz zum Längswalzen beispielsweise kann hier der Prozess nicht nur bis zum Erreichen eines stationären Zustands analysiert werden. Vielmehr muss der gesamte Walzprozess mit häufig mehr als 60 Ringumdrehungen berechnet werden. Hieraus resultieren prinzipiell sehr hohe Rechenzeiten.

Mit dem Ziel der Minimierung dieser Rechenzeiten entwickelten *Kobayashi et al.* einen Ansatz unter Verwendung von 2 unterschiedlichen Netzen /50/. Die Berechnung der Geschwindigkeiten erfolgt in einem ortsfesten Netz, das nur in den Walzspalten sehr fein diskretisiert ist, während im übrigen Bereich mit einer groben Auflösung gearbeitet wird. Die mit der FEM ermittelten Geschwindigkeitsfelder werden auf ein materialgebundenes Netz übertragen und zur Berechnung der Deformationen verwendet. Die Änderung von Position und Geometrie werden zur Berechnung des nächsten Zeitschritts auf das feste Netz zurückübertragen. Eine Weiterentwicklung dieses Konzepts wird in /51/ vorgestellt. Neuere Untersuchungen befassen sich mit thermisch-mechanisch gekoppelten Simulationsrechnungen /52/, /53/.

*Koch* gibt in seiner Dissertation 1998 /54/ einen Überblick über die verschiedenen Ansätze einschließlich der damit verbundenen Schwierigkeiten und kommt zu dem Schluss, dass trotz großer Anstrengungen auf diesem Gebiet bis in jüngster Zeit nur Simulationen mit sehr großen Vereinfachungen oder Vernachlässigungen möglich sind. Weiterhin diskutiert er den Einsatz eines expliziten Lösungsverfahrens zur Berechnung des Materialflusses am Beispiel eines rechteckigen Ringes. Die Rechenzeit für 9 Ringumdrehungen betrug ca. 90 CPU-h auf einer Workstation IBM RS6000. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass bereits vereinfachende Annahmen wie z.B. isotherme Umformung, keine Zustellung der Kegelwalzen, keine Berücksichtigung der Zentrierrollen, getroffen wurden. *Koch* stellt auch fest, dass im Gegensatz zu expliziten Verfahren mit impliziten Methoden derzeit selbst die Simulation von wenigen Ringumdrehungen nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

Neueste Entwicklungen /55/, /56/, /57/ tragen dazu bei, die Anwendbarkeit der FEM durch Verkürzung der Rechenzeiten zu verbessern. In /58/ wird ein Konzept mit adaptiver Netzgenerierung vorgestellt. Ausgangspunkt ist eine automatische Modelldiagnose, welche zu jedem Zeitpunkt die Güte des aktuellen Rechennetzes kontrolliert. Bei ungenügender Qualität wird ein neues angepasstes Rechennetz aus einem parallel mitgeführten Geometrienetz erzeugt. Die Datenübertragung vom alten auf das neue Netz erfolgt mittels Spline-Interpolation. Auch bei diesem Ansatz wird die Vernetzung des Ringes im Radial- und Axialwalzspalt mit genügend feiner

Auflösung durchgeführt, während die Bereiche zwischen den Walzspalten sehr grob vernetzt werden. Dadurch gelingt es, den Walzprozess eines Ringes mit rechteckigem Querschnitt mit 25 Ringumdrehungen in einer Rechenzeit von 108 CPU-Stunden zu berechnen. Noch ungünstigere Verhältnisse ergeben sich bei der Berechnung profilierter Ringe. In /58/ wird eine FEM-Rechnung unter geometrisch vergleichbaren Voraussetzungen wie für die in dieser Arbeit in Kapitel 6.3 durchgeführten Simulationsrechnungen vorgestellt. Zur Berechnung von 7 Ringumdrehungen ist bei Verwendung einer adaptiven Netzgenerierung immer noch eine Rechenzeit von 232 CPU-Stunden ( $\cong$  9,5 Tage) erforderlich.

Zusammenfassend kann davon ausgegangen werden, dass es noch geraume Zeit dauern wird, bis Ergebnisse mit praktikablen Rechenzeiten bei hinreichender Genauigkeit erzielt werden können. Insbesondere wenn man die Tatsache berücksichtigt, dass für eine Prozessauslegung leicht mehrere Dutzend Variationsrechnungen mit unterschiedlichen Prozessparametern erforderlich sind.

Vor diesem Hintergrund erscheint es angebracht, auch weiterhin alternative Simulationsprinzipien auf Eignung zu prüfen und weiter zu entwickeln, wenn damit gezielt einzelne Fragestellungen wie z.B. die nach dem Walzprozess entstehende Ringgeometrie beantwortet werden können. Dabei muss beachtet werden, dass die bei der Modellierung erforderlichen Vereinfachungen zwangsläufig zu Einschränkungen hinsichtlich des Gültigkeitsbereiches und der Genauigkeit der Aussagen führen.

### 3.2.2 Elementare Theorie und Verfahren der Oberen Schranke

Unter dem Begriff der elementaren (Plastizitäts-)Theorie werden Lösungsansätze zusammengefasst, die auf der Basis von vereinfachenden Annahmen zunächst für die Grundumformverfahren Schmieden, Walzen, Durchziehen und Durchdrücken entwickelt worden sind /41/. Die grundlegenden Ansätze wurden bereits zu Beginn des 20. Jahrhunderts von *Siebel* /59/ und *v. Kármán* /60/ aufgestellt und von *Lippmann* und *Mahrenholtz* /61/ auf die heutige Form vereinheitlicht. Die Grundidee dabei ist, die Kinematik des jeweiligen Umformprozesses so stark zu vereinfachen, dass rein statische Lösungen möglich werden. In der plastischen Zone werden Volumenelemente gewählt, die nur in einer Richtung infinitesimal klein sind, in den beiden anderen Richtungen aber eine endliche Ausdehnung haben. In Abhängigkeit von der Form dieser Elemente teilt man die Verfahren in Streifen-, Scheiben-, oder Röhrentheorie ein. Weiterführende Zusammenhänge können der einschlägigen Literatur entnommen werden /40/, /61/.

Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover ist das Ringwalzen in Verbindung mit elementaren Methoden seit einiger Zeit Gegenstand von Forschungsaktivitäten /62/, /63/. Dabei wurden unter anderem Modelle entwickelt, mit denen eine mathematische Beschreibung des Werkstoffflusses beim Radial-Axial-Walzen von Ringen mit Rechteckquerschnitten möglich ist.

*Aboutour* /64/ hat ein Programm für einen Großrechner erstellt, mit dem der Konstrukteur bei der Auslegung der notwendigen Ringvorformen unterstützt wird. Hierbei wird auch der Werkstofffluss stark vereinfacht simuliert. Grundlage ist dabei ein Rechenmodell, das auf der Verwendung von in der Umformzone radial angeordneten Stäbchen basiert /65/. Der aufgestellte Berechnungsansatz setzt voraus, dass während der Umformung die Stäbchenform immer beibehalten wird. Dies hat zur Konsequenz, dass ein Werkstofffluss in axialer Richtung nur konstant über die Wanddicke berechnet werden kann. Effekte wie die Fischmaulbildung, die aufgrund eines über den Ringquerschnitt unterschiedlichen axialen Werkstoffflusses entsteht, konnten daher mit diesem Programm nicht erfasst werden.

Ein weiteres Verfahren zur näherungsweisen Analyse von Umformprozessen ist das sog. Schrankenverfahren. Bei Umformvorgängen, bei denen die Berechnung der Umformleistung sehr aufwendig ist, ist es oft von Vorteil, die genaue Lösung zwischen einer unteren und einer oberen Schranke einzugrenzen. Die Schrankenätze der Plastomechanik gestatten quantitative Aussagen über die Umformleistung, ohne dass die sich in der Umformzone einstellenden Spannungs- und Geschwindigkeitsfelder zuvor genau bekannt sein müssen /66/. Insbesondere die obere Schranke hat bei ingenieurmäßigen Fragestellungen eine deutlich höhere Bedeutung als die untere, da sich hier ein zu hoher Wert für die Umformleistung oder -kraft ergibt und man so beispielsweise bei der Auslegung von Maschinen auf der „sicheren Seite“ liegt. Dieser Sachverhalt wird sowohl zur Analyse von Schmiede-/67/, /68/ als auch von Ringwalzprozessen /69/, /70/ verwendet. Insbesondere Untersuchungen zur Berechnung von Umformkräften und -drehmomenten sind in der Literatur zu finden /71/, /72/, /73/.

*Fan* /74/ beschreibt einen Ansatz für die Simulation des Werkstoffflusses beim Walzen von Ringen mit rechteckigem Querschnitt nach dem oberen Schrankenverfahren. Da mit Hilfe dieses Ansatzes ermittelte Geschwindigkeitsfelder in das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsverfahren einfließen, wird an dieser Stelle das Verfahren der Oberen Schranke näher vorgestellt.

Die Schrankenaussagen für plastische Probleme wurden von *Prager* und *Hodge* /75/ aus den Extremalprinzipien der von *Mises* Theorie abgeleitet. Ausgangs-

punkt ist hierbei eine Leistungsbetrachtung für den Umformprozess eines sich vollständig im plastischen Zustand befindlichen Körpers. Die von außen dem Prozess zugeführte Leistung  $P$  ist gleich der Summe der im Volumen umgesetzten inneren Leistungen. Diese setzt sich zusammen aus der Volumenleistung  $P_V$ , der Reibungsleistung  $P_R$  und der Scherleistung  $P_S$  /40/, /76/.

$$P = P_V + P_R + P_S \quad (1)$$

Die Volumenleistung entspricht der im Volumen umgewandelten Leistung durch plastische Formänderung und berechnet sich unter Verwendung des von Miseschen Stoffgesetzes zu:

$$P_V = \int_V k_f \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}} dV = \int_V k_f \dot{\phi}_v dV \quad (2)$$

mit  $\dot{\epsilon}_{ij}$ : Formänderungsgeschwindigkeitstensor  
 $\dot{\phi}_v$ : Vergleichsformänderungsgeschwindigkeit  
 $k_f$ : Fließspannung,  $V$ : Volumen

Die Reibleistung berücksichtigt Anteile, die in der Wirkfuge zwischen Werkzeug und Werkstück dissipiert werden. Sie ergibt sich bei Verwendung des Reibfaktormodells, bei dem der Betrag der Reibungsschubspannung ein fester Bruchteil  $m$  der Schubfließspannung  $k$  ist, zu:

$$P_R = \int_{A_R} m k |v_{rel}| dA_R \quad \text{mit } 0 < m < 1, k = k_f / 2 \quad (3)$$

mit  $v_{rel}$ : Relativgeschwindigkeit,  $A_R$ : Reibfläche

Bei der Anwendung des Schrankenverfahrens ist es häufig zweckmäßig, die Umformzone in Gebiete aufzuteilen, in denen unterschiedliche Ansätze für die Geschwindigkeitsfelder gewählt werden. Aufgrund der Volumenkonstanz ist dabei zu fordern, dass die Normalkomponente der Geschwindigkeit auch an den Bereichsgrenzen stetig ist. Die Tangentialkomponente der Geschwindigkeit darf unstetig sein. Die Tangentialgeschwindigkeitsdifferenz  $v_{rel}$  führt dann jedoch zu einem (fiktiven) Abscheren des Materials entlang der Bereichsgrenzen  $A_S$ . In der Leistungsbilanz muss dieser Scheranteil  $P_S$  berücksichtigt werden. Als Schubspannung wirkt die Schubfließspannung  $k$ , folglich kann (3) mit  $m = 1$  übernommen werden:

$$P_S = \int_{A_S} k |v_{rel}| dA_S \quad (4)$$

Die Kernaussage des Satzes von der oberen Schranke lautet nach /71/:

*Unter allen Geschwindigkeitsverteilungen, die kinematisch zulässig sind, d.h. den Randbedingungen für die Geschwindigkeiten und der Bedingung der Volumenkonstanz genügen, liefert das wirkliche Geschwindigkeitsfeld den kleinsten Wert für die über die Umformzone summierte innere Leistung.*

Geht man von einem kinematisch zulässigen Geschwindigkeitsfeld  $v_i^*$  aus, so besagt der Satz von der oberen Schranke, dass die mit  $v_i^*$  berechnete Umformleistung stets größer ist als die mit dem wahren Geschwindigkeitsfeld  $v_i$  berechnete:

$$P(v_i^*) > P(v_i) \quad (5)$$

Das Geschwindigkeitsfeld  $v_i^*$  ist nun zweckmäßig so zu wählen, dass nach Berücksichtigung der Randbedingungen noch ein oder mehrere freie Parameter verbleiben, die so zu bestimmen sind, dass die Umformleistung  $P(v_i^*)$  ein Minimum annimmt. In der simulationstechnischen Anwendung werden die Parameter wie bei einer Regression gezielt variiert, so dass die innere Umformleistung kleiner wird. Nach [40] kann davon ausgegangen werden, dass sich dann auch das Geschwindigkeitsfeld weiter der Realität nähert.

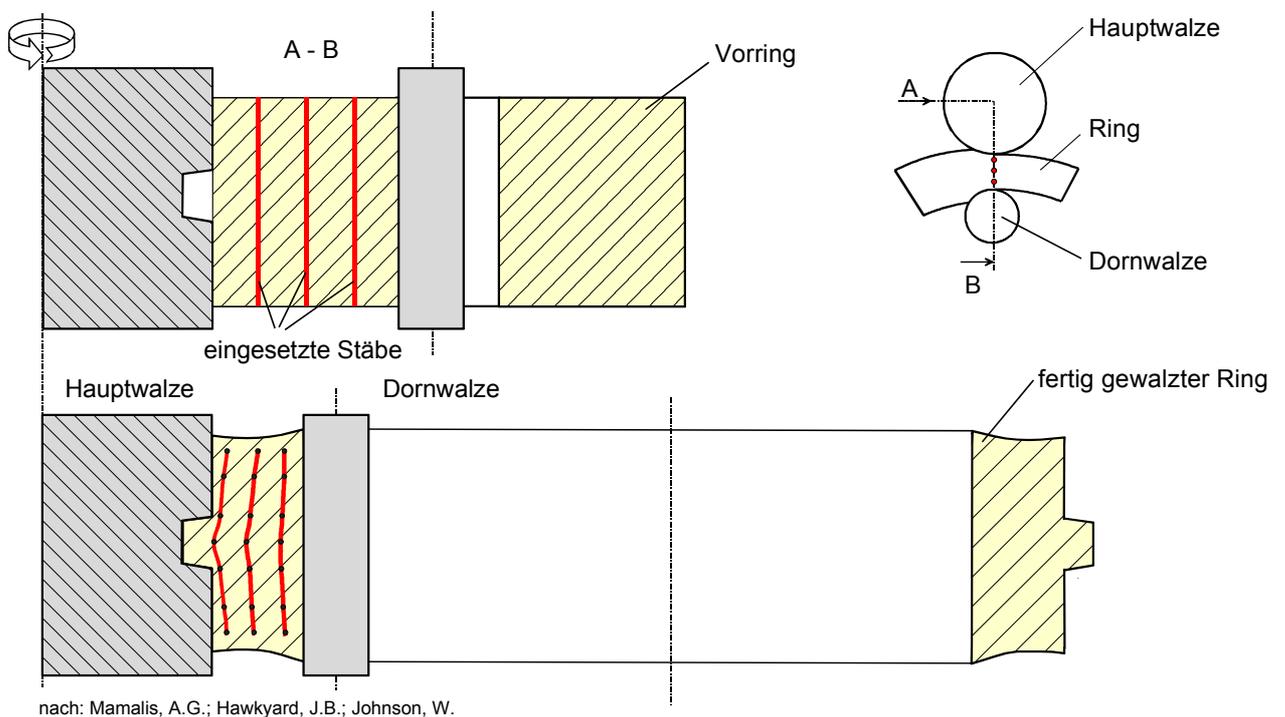
Nutzt man diesen Zusammenhang für die Simulation des Werkstoffflusses beim Ringwalzen, so ist zunächst ein geeignetes Geschwindigkeitsfeld in 3 Richtungen mit freien Parametern im Walzspalt anzusetzen und damit die innere Leistung in der Umformzone zu berechnen. Gelingt es nun, durch Parametervariation ein Minimum der über die Umformzone summierten inneren Leistung zu finden, so kommt der gewählte Ansatz mit dem ermittelten Parametersatz dem realen Geschwindigkeitsfeld sehr nahe. Mit Hilfe dieses so bestimmten Geschwindigkeitsfeldes kann durch Integration über die Zeit die Verformung des Rings und damit die Ringgeometrie an jedem Ort berechnet werden.

### 3.2.3 Visioplastische Untersuchungen

Die visioplastische Methode ist ein experimentelles Verfahren und eignet sich in erster Linie zur Ermittlung des Geschwindigkeitsfeldes in einem stationären Umformprozess. Hierzu werden Markierungen in Form von Liniennetzen auf der Oberfläche oder in einer Symmetrieebene des Werkstücks angebracht. Aus der zeitabhängigen Verschiebung der Markierungen kann auf die Materialbewegung und damit auf die Geschwindigkeit geschlossen werden. Bei stationären Umformvorgängen wie beispielsweise dem Strangpressen kann die gesamte Information über das Geschwindigkeitsfeld in der Umformzone durch die Auswertung des verzerrten Li-

niennetzes entnommen werden. Demgegenüber muss bei instationären Prozessen wie dem Ringwalzen ein mehrmaliges Ausmessen in kurzen Zeitabständen erfolgen. Dadurch ergibt sich ein hoher experimenteller Aufwand, der die Verbreitung dieses Verfahrens im Bereich der Ringwalztechnologie bisher verhindert hat.

Visioplastische Untersuchungen sind trotz des eingeschränkten Anwendungsbereiches gut geeignet, um Stoffflussmodelle oder theoretische Ansätze für Gesetzmäßigkeiten in plastischen Materialbewegungen zu verifizieren /77/. So wird beispielsweise in /78/ der Werkstofffluss beim Warmwalzen von Stäben mit Hilfe dieser Methode untersucht. *Mamalis* /79/ hat Ringwalzversuche mit Blei- und Aluminiumlegierungen durchgeführt. In Bild 14 ist das Prinzip dieser Untersuchungen dargestellt. In Bleiringe, die das Werkstoffflussverhalten eines heißen Stahlrings simulieren sollten, wurden in definierten Abständen Löcher gebohrt und Stäbe aus einer mit dem Werkstoff des Ringes vergleichbaren Legierung eingesetzt. Durch Beobachtung der Verformung dieser Stäbe zu unterschiedlichen Prozesszeitpunkten können Rückschlüsse auf den Werkstofffluss in radialer Richtung und in Umfangsrichtung gewonnen werden.



**Bild 14:** Visioplastische Untersuchungen beim Ringwalzen

*Weber* /80/ berichtet ebenfalls über experimentelle Untersuchungen, bei denen in den Ring Stifte eingelassen wurden. Diese Stifte erfuhren an der Ringinnenseite

eine stärkere Verformung in Ringumfangsrichtung als an der Ringaußenseite. Daraus folgte er eine unterschiedlich starke Streckung des Rings an Ringinnen- und Ringaußenseite.

*Kneschke /81/* verwendet zur Validierung seiner hydrodynamischen Walztheorie für das konventionelle Flachwalzen visioplastische Untersuchungen. Hierbei wurden in Walzproben aus technischem Aluminium Kupferdrähte eingeschmolzen, deren Verformung ein anschauliches Bild vom Werkstofffluss lieferten /82/. Der Ansatz seiner theoretischen Arbeiten ist, das Walzgut beim Warmwalzen als eine zähe Flüssigkeit aufzufassen und somit die Gesetze der Mechanik zäher Medien anzuwenden. Die hierfür geltenden Navier-Stokesschen Gleichungen werden für eindimensionale Strömung gelöst. Aus den Lösungen lassen sich die Druckverteilung im Walzspalt sowie die Lage der Fließeiche in Abhängigkeit der Walzparameter analytisch bestimmen. Es ergibt sich hier analog zur klassischen Theorie des Flachwalzens /83/ in der Geschwindigkeitsverteilung ebenfalls eine Voreil- und eine Nacheilzone, die durch die Fließeiche voneinander getrennt werden. Bild 15 zeigt qualitativ die nach der hydrodynamischen Walztheorie ermittelte Geschwindigkeitsverteilung im Walzspalt bei zwei gleich großen, gleichmäßig angetriebenen Walzen.

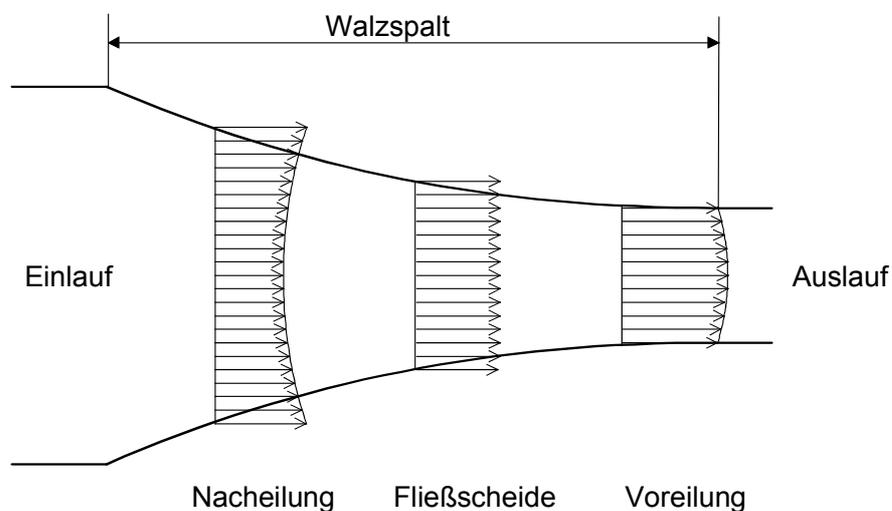


Bild 15: Geschwindigkeitsverteilung im Walzspalt bei Gleichantrieb der Walzen (Flachwalzen) nach /82/

In /84/ wird eine Erweiterung dieses Ansatzes vorgestellt, die auf ein nichtlineares partielles Differentialgleichungssystem führt und daher eine iterative Lösung erfordert.

## 4 Entwicklung des Simulationsverfahrens

Das Simulationsprinzip des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Verfahrens basiert auf analytischen Ansätzen zur Beschreibung der Materialgeschwindigkeiten in Kombination mit iterativen Deformationsberechnungen kleiner Volumenelemente im Walzspalt. Mit dem auf dieser Grundlage entwickelten Softwarewerkzeug kann der Werkstofffluss für das Walzen rechteckiger und auch profilierter Ringe in kurzer Zeit berechnet werden.

Analog zur Theorie des Flachwalzens kann auch für das Ringwalzen ein Geschwindigkeitsansatz in Umfangsrichtung abgeleitet werden (vgl. Kap. 4.2.1). In [74] werden die freien Parameter des Ansatzes für das Walzen von Ringen mit rechteckigem Querschnitt exemplarisch nach dem Verfahren der oberen Schranke bestimmt. Der ermittelte Geschwindigkeitsansatz wird in dieser Arbeit auch für das Walzen profilierter Ringe übernommen.

In radialer Richtung werden die Einflüsse auf die Materialbewegung nach Dorn- und Hauptwalze separiert und je nach Kontaktsituation zwischen Ring und Walzen überlagert (vgl. Kap. 4.2.2). Ursächlich für den radialen Materialfluss sind die Stichabnahmen an Haupt- und Dornwalze  $\Delta S_w$  und  $\Delta S_d$ , deren Verhältnis zueinander sich im Laufe des Walzprozesses kontinuierlich ändert.

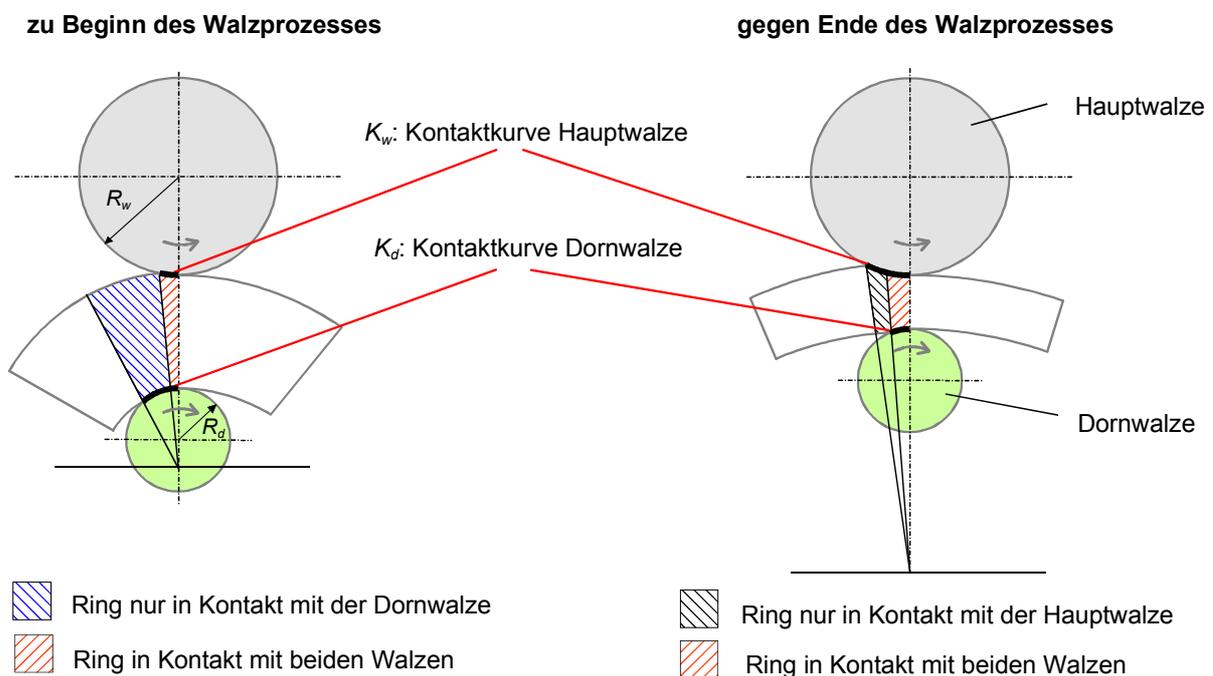
Die Modellierung des Werkstoffflusses in axialer Richtung ermöglicht die Beschreibung von Effekten wie die Fischmaulbildung, die aufgrund von über der Ringbreite unterschiedlichem axialen Werkstofffluss entsteht. Der Ringquerschnitt am Walzspalteingang wird hierfür in kleine Volumenelemente zerlegt, die dann im Walzspalt unter dem Einfluss der ermittelten Geschwindigkeitsfelder in radialer und in Umfangsrichtung deformiert werden (vgl. Kap. 4.2.3). Fordert man für jedes Element lokal die Volumenkonstanz, so ergeben sich am Walzspaltausgang Elemente, deren Höhe sich aus der veränderten Breite und Länge errechnen lässt. Die Bilanzierung aller Höhen- und Breitenänderungen der vertikal bzw. horizontal in einer Ebene liegenden Elemente ergibt basierend auf dem Ringquerschnitt am Walzspalteingang das neue Ringquerschnittsprofil.

Der Axialwalzspalt wird im Rahmen dieser Arbeit vereinfacht betrachtet, da die wesentlichen Beiträge für das Ringwachstum und die damit verbundenen großen Materialbewegungen im Radialwalzspalt verursacht werden. Simulationstechnisch wird das durch den Kegelwalzenvorschub verdrängte Werkstoffvolumen vollständig dem Durchmesserwachstum des Ringes zugeordnet.

## 4.1 Ermittlung der geometrischen Zusammenhänge im Radialwalzspalt

### 4.1.1 Geometrische Erfassung der radialen Umformzone

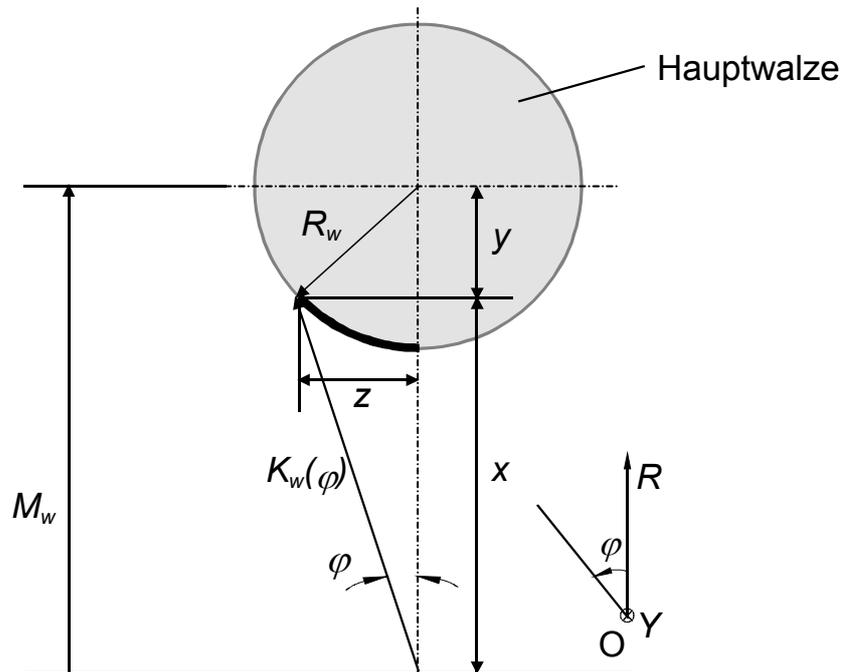
Da die Geometrien von Hauptwalze, Dorn und Ring rotationssymmetrisch sind, bietet sich für die mathematische Beschreibung des Ringwalzvorganges ein zylindrisches Koordinatensystem an. Der Ursprung des Koordinatensystems wird dabei in den Ringmittelpunkt gelegt. Der Werkstofffluss im Walzspalt wird wesentlich durch die Kontaktverhältnisse zwischen Ring und Walzen bestimmt. Bild 16 zeigt zwei typische Situationen während des Walzprozesses.



**Bild 16:** Radiale Kontaktzustände an Haupt- und Dornwalze

Auf der linken Seite ist eine Kontaktsituation zu Beginn des Walzvorganges dargestellt. Der Ring hat noch einen relativ kleinen Durchmesser. Ein kleiner Bereich des Ringes steht in Kontakt mit beiden Walzen, während eine größere Zone nur Kontakt mit der Dornwalze hat. Während des Walzens ändert sich die Kontaktsituation kontinuierlich. Rechts ist ein Zeitpunkt gegen Ende des Walzprozesses abgebildet. Ergänzend zu dem Bereich mit beidseitigem Walzenkontakt gibt es eine Zone, die ausschließlich mit der Hauptwalze in Kontakt steht. Die Kontaktkurven  $K_w$  und  $K_d$  hängen damit von aktueller Ringgeometrie und vom Dornvorschub ab und müssen für jeden diskreten Zeitschritt neu berechnet werden. Die Gleichungen für die Kon-

taktkurven ergeben sich im gewählten Koordinatensystem aus folgendem Ansatz (Bild 17):



**Bild 17:** Geometrische Abhängigkeiten

$$K_w^2 = x^2 + z^2 \quad (6)$$

$$R_w^2 = y^2 + z^2 \quad (7)$$

$$M_w = x + y \quad (8)$$

$$\cos \varphi = \frac{x}{K_w} \quad (9)$$

$M_w$  und  $M_d$  bezeichnen im Folgenden die Positionen von Hauptwalze und Dorn im gewählten Koordinatensystem, dessen Nullpunkt im Ringmittelpunkt liegt. Da der Ring während des Walzprozesses wächst, verschiebt sich auch sein Mittelpunkt in Bezug auf die ortsfeste Hauptwalze. Daher ändern sich die Positionen  $M_w$  und  $M_d$  kontinuierlich und müssen für jeden Zeitpunkt neu ermittelt werden.  $R_a$  und  $R_i$  bezeichnen den Ringaußen- bzw -innendurchmesser.

(6) - (7) und dann (8) und (9) eingesetzt ergibt  $K_w$  in Abhängigkeit von  $\varphi$ :

$$K_w^2 - 2K_w M_w \cos \varphi + M_w^2 + R_w^2 = 0 \quad (10)$$

Auflösen nach  $\varphi$  liefert an der Stelle  $K_w = R_a$  den Kontaktwinkel zur Hauptwalze  $\varphi_w$  (vgl. Bild 18):

$$\varphi_w = \arccos\left(\frac{R_a^2 - R_w^2 + M_w^2}{2R_a \cdot M_w}\right) \quad (11)$$

Die Lösung der quadratischen Gleichung (10) für den betrachteten Bereich der Kontaktkurve an der Hauptwalze ergibt:

$$K_w(\varphi) = M_w \cdot \cos \varphi - \sqrt{R_w^2 - (M_w \cdot \sin \varphi)^2} \quad (12)$$

Analoge Betrachtungen für die Kontaktkurve am Dorn führen zu:

$$\varphi_d = \arccos\left(\frac{R_i^2 - R_d^2 + M_d^2}{2R_i \cdot M_d}\right) \quad (13)$$

$$K_d(\varphi) = M_d \cdot \cos \varphi - \sqrt{R_d^2 - (M_d \cdot \sin \varphi)^2} \quad (14)$$

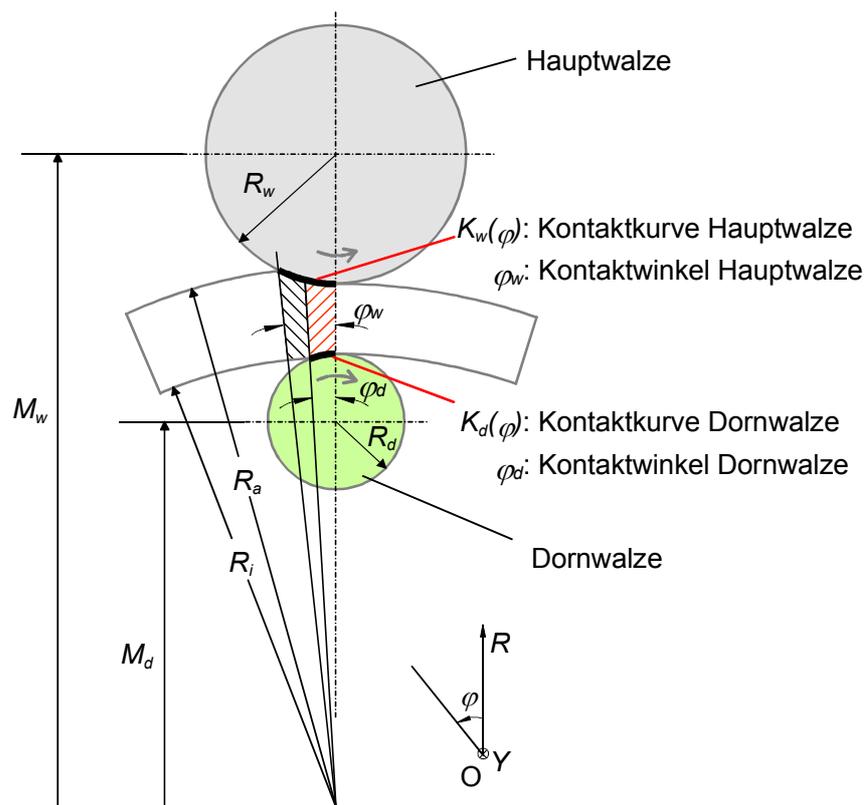


Bild 18: Definition der Winkel  $\varphi_w$  und  $\varphi_d$



Zur Ermittlung der jeweiligen Anteile werden die gedrückten Längen  $l_w$  und  $l_d$  verwendet. Als gedrückte Längen werden analog zum symmetrischen Flachwalzen die Projektionen der Kontaktlängen zwischen Walzen und Walzgut bezeichnet. Beim Flachwalzen mit gleich großen Arbeitswalzen und ebenem Walzgut sind die gedrückten Längen gleich groß und ergeben sich in erster Näherung zu /41/:

$$l = \sqrt{R \cdot \Delta S} \quad (15)$$

mit  $l$ : gedrückte Länge,  $R$ : Radius der Walzen,  $\Delta S$ : Gesamtstichabnahme

/85/ und auch /34/ ermitteln unter Ausnutzung geometrischer Beziehungen und Verwendung der gleichen Näherung wie /41/ die gedrückten Längen beim Walzen von Ringen zu:

$$l_w = \sqrt{\Delta S_w \cdot D_a \cdot D_w / (D_a + D_w)} \quad (16)$$

$$l_d = \sqrt{\Delta S_d \cdot D_i \cdot D_d / (D_i - D_d)} \quad \text{für } D_i \geq 1,5 \cdot D_d \quad (17)$$

Die verwendete Vereinfachung schränkt den Gültigkeitsbereich von Gl. (17) ein. Für Ringinnendurchmesser  $D_i < 1,5 D_d$  muss die exakte Lösung bestimmt werden und somit ergibt sich:

$$l_d = \sqrt{\Delta S_d \cdot (D_i - \Delta S_d \cdot z) \cdot z} \quad \text{für } D_i < 1,5 \cdot D_d \quad (18)$$

$$\text{mit } z = (D_d - \Delta S_d) / (D_i - D_d + 2 \cdot \Delta S_d)$$

$$\text{Definiert man } D'_w = D_a \cdot D_w / (D_a + D_w) \quad (19)$$

$$\text{und } D'_d = D_i \cdot D_d / (D_i - D_d) \quad (20)$$

als fiktive Walzendurchmesser so erhält man:

$$l_w = \sqrt{\Delta S_w \cdot D'_w} \quad (21)$$

$$l_d = \sqrt{\Delta S_d \cdot D'_d} \quad \text{für } D_i \geq 1,5 \cdot D_d \quad (22)$$

Die fiktiven Walzendurchmesser  $D'_w$  und  $D'_d$  entsprechen Walzendurchmessern, die bei nicht gekrümmten Walzgut mit den Stichabnahmen  $\Delta S_w$  und  $\Delta S_d$  die gedrückten Längen  $l_w$  und  $l_d$  ergeben würden. Zu Beginn einer Walzung ist  $D_i$  nur wenig größer als  $D_d$  und somit kann der fiktive Dorndurchmesser ein Vielfaches des realen Durchmessers betragen, während der fiktive Hauptwalzendurchmesser er-

heftlich kleiner als der reale sein kann. Da sich im Verlauf einer Walzung  $D_a$  und  $D_i$  verändern, nähern sich die fiktiven Walzendurchmesser asymptotisch den realen Werkzeugdurchmessern /34/.

Um die Stichabnahmen  $\Delta S_w$  und  $\Delta S_d$  zu ermitteln, sind Annahmen bezüglich der gedrückten Längen erforderlich. In vielen Untersuchungen wird die Näherung  $l_w = l_d$  verwandt /86/, /87/, /88/. Damit lassen sich die Stichabnahmen nach (16) und (17) durch Umstellen der Gleichung und für den Fall (18) iterativ bestimmen. Auf Basis dieser Näherung wird auch die Berechnung der Stichabnahmen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt. In /89/ wird eine empirisch ermittelte Beziehung für das Verhältnis  $\Delta S_w/\Delta S_d$  dargestellt.

$$\frac{\Delta S_w}{\Delta S_d} = 3,36 \cdot \left( D'_d / D'_w \right)^{1,46} \cdot (D_m / D_a)^{5,23} \quad (23)$$

mit  $D_m$ : mittlerer Ringdurchmesser

Ein Vergleich mit der Simulationsrechnung nach dem in dieser Arbeit vorgestellten Prinzip ergibt für einen Ring mit rechteckigem Querschnitt eine qualitativ gute Übereinstimmung des Verlaufs von  $\Delta S_w/\Delta S_d$ . Der Vergleich wurde für einen Hauptwalzendurchmesser von 460 mm und einen Dorndurchmesser von 150 mm durchgeführt (Bild 20). Der dabei verwendete Dornvorschubverlauf entsprach dem eines realen Walzprozesses und ist in Bild 21 dargestellt.

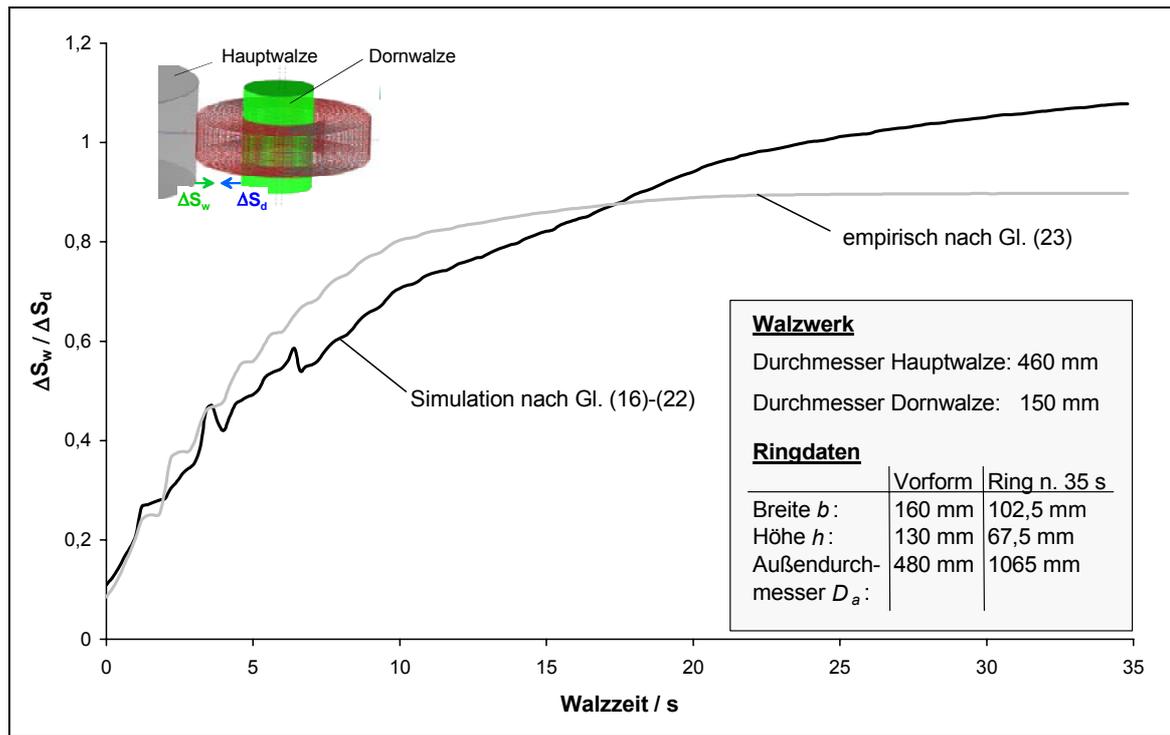


Bild 20: Vergleich des Verhältnisses der Stichabnahmen  $\Delta S_w / \Delta S_d$  von Simulationsrechnung und empirisch ermitteltem Zusammenhang nach Gleichung (23)

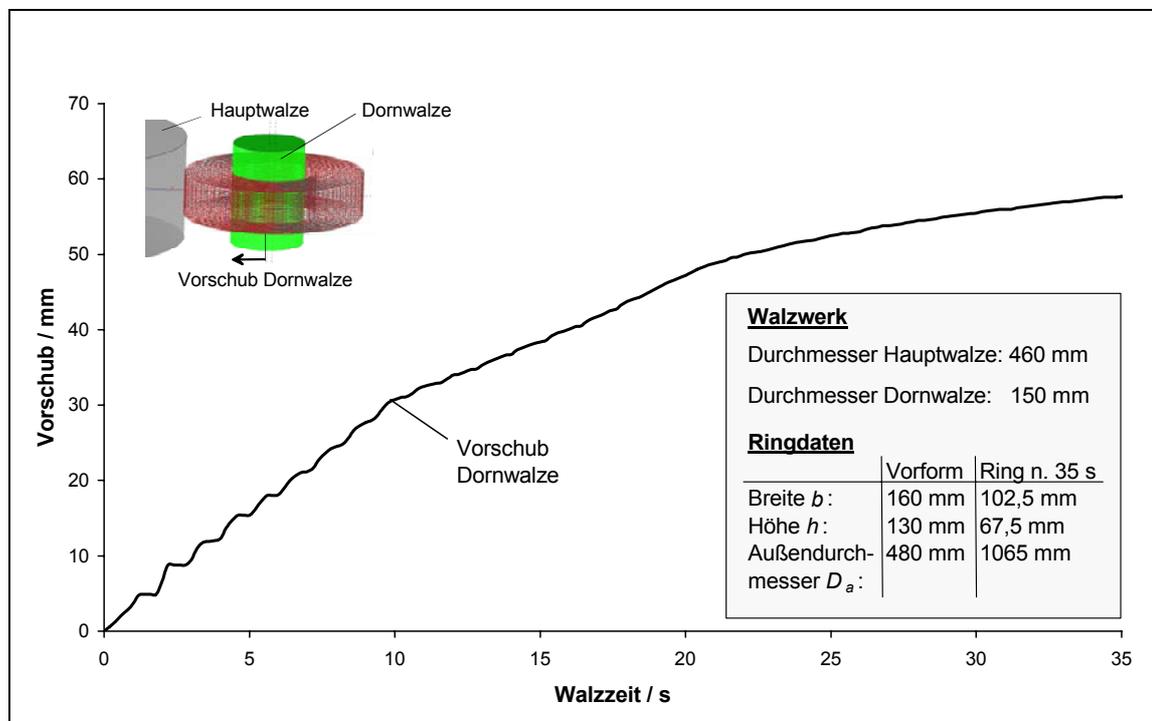


Bild 21: Vorschubverlauf von Dornwalze bei der Vergleichsrechnung nach Bild 20

## 4.2 Bestimmung der kinematischen Verhältnisse im Radialwalzspalt

Die Zerlegung des Ringwalzprozesses in der Simulation in quasistationäre Teilprozesse ermöglicht die Beschreibung der Materialgeschwindigkeit als eine Funktion des geometrischen Ortes unabhängig von der Zeit.

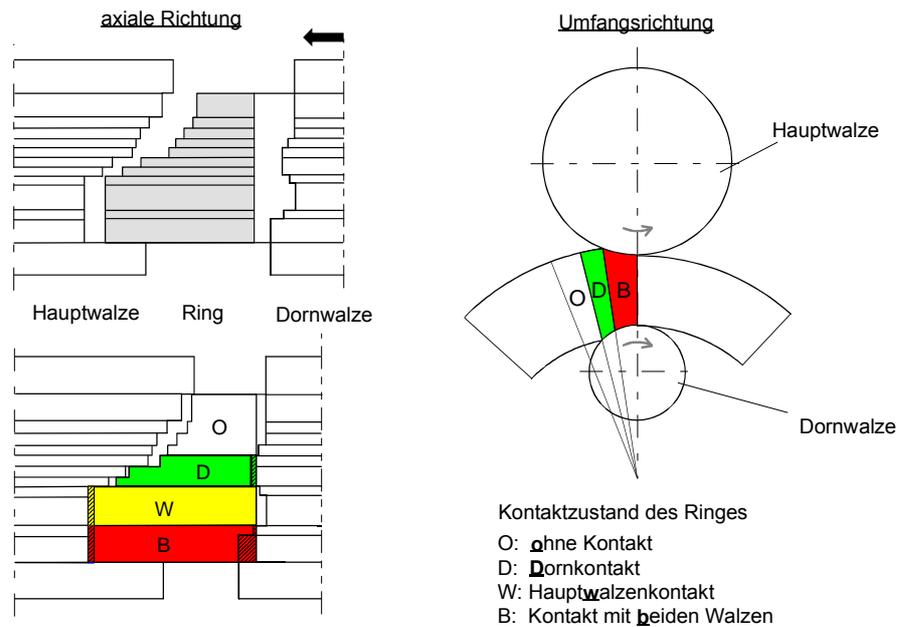
$$\vec{V} = f(\varphi, r, y) \quad (24)$$

Definiert man die Komponenten des Geschwindigkeitsvektors als Winkelgeschwindigkeit  $v_\varphi$ , Radialgeschwindigkeit  $v_r$  und Axialgeschwindigkeit  $v_y$  so ergibt sich:

$$v_\varphi = f_1(\varphi, r, y), \quad v_r = f_2(\varphi, r, y), \quad v_y = f_3(\varphi, r, y) \quad (25)$$

Soll das Schrankenverfahren angewandt werden, so müssen nun geeignete Funktionen  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  gefunden werden, die zum einen die kinematischen Randbedingungen erfüllen und zum anderen freie Parameter beinhalten, damit eine Minimierung der Umformleistung durchgeführt werden kann.

Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover hat *Fan* in /74/ Untersuchungen über geeignete Geschwindigkeitsansätze durchgeführt. Hier wird der Radialwalzspalt abhängig vom Kontaktzustand des Ringes in Elemente aufgeteilt, in denen in radialer Richtung unterschiedliche Geschwindigkeitskomponenten angesetzt werden. Bild 22 zeigt das Prinzip der Segmentierung der Umformzone in axialer und in Umfangsrichtung. Je nach Kontaktzustand des Ringes mit den Walzen gibt es Bereiche ohne, mit dornseitigem, mit hauptwalzenseitigem oder mit beiderseitigem Kontakt.



**Bild 22:** Segmentierung der Umformzone in axialer und in Umfangsrichtung (nach /74/)

Es ist festzustellen, dass das Ermitteln der inneren Umformleistung im Falle eines profilierten Ringes erheblichen Aufwand erfordert, da in allen Segmenten an den Bereichsgrenzen Anteile zur Scherleistung aufgrund von unterschiedlichen Tangentialgeschwindigkeiten entstehen. Auch die Berücksichtigung eines über die Ringbreite unterschiedlichen axialen Werkstoffflusses würde die Berechnung der inneren Leistung weiter verkomplizieren. Daher wird in /74/ die Leistungsbilanz zunächst nur für das Walzen von Ringen mit rechteckigem Querschnitt durchgeführt. Hier kann die Segmentierung der Umformzone in axialer Richtung entfallen.

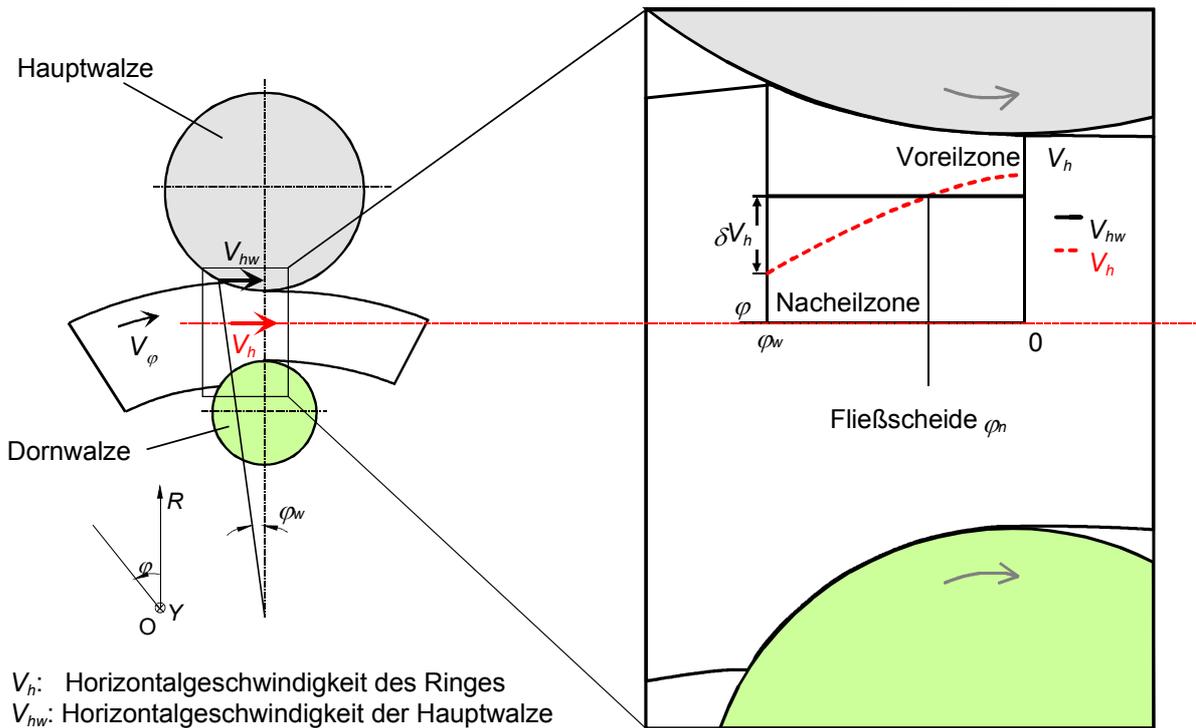
#### 4.2.1 Materialfluss in Umfangsrichtung

In der Theorie des Flachwalzens ergibt sich ein Walzgutgeschwindigkeitsprofil im Walzspalt, das durch die Fließscheide in eine Vor- und eine Nacheilzone geteilt wird /90/. Überträgt man diesen Sachverhalt auf den Ringwalzprozess, so lässt sich die Materialgeschwindigkeit im Radialwalzspalt nach Bild 23 darstellen.

Analog zum Flachwalzen werden im Folgenden die Horizontalkomponenten  $v_h$  der Geschwindigkeiten betrachtet. Die Winkelgeschwindigkeiten  $v_\varphi$  lassen sich unter Verwendung von Winkel und Radius leicht bestimmen.

Die Horizontalkomponente der Umfangsgeschwindigkeit der Hauptwalze  $v_{hw}$  ist hier über den Walzspalt als konstant angesetzt. Genau genommen ist sie eine Funktion

des Winkels  $\varphi$ , sie lässt sich jedoch für kleine Winkel ( $\varphi < 15^\circ$ ) hinreichend genau als Konstante beschreiben, wie sich leicht zeigen lässt.



**Bild 23:** Horizontalgeschwindigkeiten im Walzspalt

In **Bild 23** ist der Verlauf der Horizontalgeschwindigkeit  $v_h$  des Ringes im Walzspalt qualitativ dargestellt. In der Nacheilzone ist die Geschwindigkeit des Walzguts kleiner, in der Voreilzone größer als die Horizontalkomponente der Walzenumfangsgeschwindigkeit. Der Schnittpunkt der beiden Kurven  $\varphi_n$  wird Fließscheide genannt. Nur hier sind die Geschwindigkeiten von Hauptwalze und Ring gleich groß.

Der folgende Ansatz für die Geschwindigkeit des Materials im Walzspalt beschreibt den dargestellten Verlauf:

$$v_h(\varphi) = v_{hw} - \Delta v_h \frac{\varphi^2 - \varphi_n^2}{\varphi_w - \varphi_n} \quad (26)$$

Der Ansatz (26) erfüllt die folgenden Bedingungen:

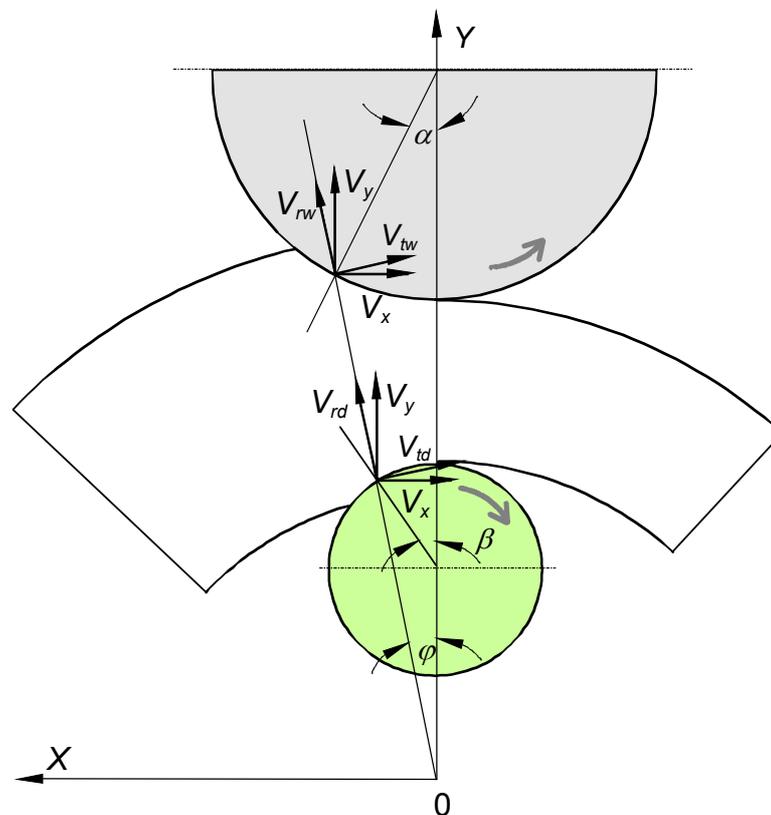
Nacheilzone ( $\varphi > \varphi_n$ )	:	$v_h < v_{hw}$
Voreilzone ( $\varphi < \varphi_n$ )	:	$v_h > v_{hw}$
Fließscheide ( $\varphi = \varphi_n$ )	:	$v_h = v_{hw}$
Walzspaltausgang: ( $\varphi = 0$ )	:	$\frac{\partial v_h}{\partial \varphi} = 0$

(Kontinuität zwischen verformten und unverformten Bereich)

Über die freien Parameter Nacheilungsunterschied  $\Delta v_h$  am Walzspalteingang und Fliessscheide  $\varphi_n$  lässt sich die Horizontalkomponente der Materialgeschwindigkeit  $v_h(\varphi)$  an verschiedene Walzvorgänge anpassen. *Fan* hat in /74/ die Parameter für den Ringwalzprozess nach dem Verfahren der oberen Schranke bestimmt. Dieser Ansatz für die Geschwindigkeit in Umfangsrichtung wird in der vorliegenden Arbeit übernommen.

#### 4.2.2 Materialfluss in radialer Richtung

In /74/ wird die Randbedingung verwendet, dass die Geschwindigkeitskomponenten senkrecht zur Oberfläche der Walzen gleich null sein müssen, um einen Ansatz in radialer Richtung aufzustellen.



**Bild 24:** Geschwindigkeitskomponenten an den Walzenoberflächen (nach /74/)

Zerlegt man nach Bild 24 die Radial- und Tangentialkomponenten der Materialgeschwindigkeit an Hauptwalze  $v_{rw}$ ,  $v_{tw}$  und Dornwalze  $v_{rd}$ ,  $v_{td}$  in ihre  $x$ - und  $y$ -Anteile und fordert man, dass die Summe der Materialgeschwindigkeiten senkrecht zur Walzenoberfläche gleich Null ist, so ergeben sich die Bedingungen:

$$v_y \cos \alpha + v_x \sin \alpha = 0 \quad (\text{Hauptwalze}) \quad (27)$$

$$v_y \cos \beta - v_x \sin \beta = 0 \quad (\text{Dornwalze}) \quad (28)$$

Betrachtet man exemplarisch die Hauptwalze, so sind:

$$v_x = v_{tw} \cos \varphi - v_{rw} \sin \varphi \quad (29)$$

$$v_y = v_{rw} \cos \varphi + v_{tw} \sin \varphi \quad (30)$$

Setzt man (27) in (29) und (30) ein, so ergibt sich:

$$v_{rw} = -v_{tw} \frac{\sin \varphi \cos \alpha + \cos \varphi \sin \alpha}{\cos \varphi \cos \alpha - \sin \varphi \sin \alpha} \quad (31)$$

Verwendet man zur Beschreibung der Radialgeschwindigkeit  $v_{rw}$  die Kontaktkurve  $K_w(\varphi)$  nach Gleichung (12) unter Berücksichtigung der geometrischen Beziehungen:

$$\sin \alpha = \frac{K_w(\varphi)}{R_w} \sin \varphi \quad \text{und} \quad v_{hw} = v_{tw} \cos \varphi \quad (32)$$

dann folgt:

$$v_{rw}(\varphi) = -\frac{v_{hw}}{\cos \varphi} \cdot \frac{\sin \varphi \cos \left( \arcsin \left( \frac{K_w(\varphi)}{R_w} \sin \varphi \right) \right) + \cos \varphi \frac{K_w(\varphi)}{R_w} \sin \varphi}{\cos \varphi \cos \left( \arcsin \left( \frac{K_w(\varphi)}{R_w} \sin \varphi \right) \right) - \sin^2 \varphi \frac{K_w(\varphi)}{R_w}} \quad (33)$$

Analoge Betrachtungen für die Dornwalze ergeben einen ähnlich komplexen Ansatz für den Anteil  $v_{rd}$ . Weiterhin müssen die an den Walzenoberflächen ermittelten Anteile von Dorn  $v_{rd}$  und Hauptwalze  $v_{rw}$  in Abhängigkeit der Koordinate  $r$  gebracht und überlagert werden.

$$v_r(r, \varphi) = f(v_{rw}) + f(v_{rd}) \quad (34)$$

Der Verlauf der radialen Geschwindigkeit kann mit diesen Gleichungen zwar numerisch berechnet werden, ist allerdings nicht mehr einfach gedanklich konstruierbar. Eine analytisch geschlossene Leistungsberechnung im Rahmen der Anwendung des Schrankenverfahrens wird damit ebenfalls relativ aufwendig und ohne Vereinfachungen nicht mehr praktikabel durchführbar. Darüber hinaus müsste bei der Betrachtung profilierter Ringe auch eine Abhängigkeit in  $y$ -Richtung berücksichtigt werden.

Um beispielsweise die plastische Formänderungsleistung zu bestimmen, sind zunächst die Formänderungsgeschwindigkeiten in Zylinderkoordinaten zu ermitteln /91/:

$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_{rr} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} & \dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi} &= \frac{\partial v_\varphi}{r\partial\varphi} + \frac{v_r}{r} & \dot{\varepsilon}_{yy} &= \frac{\partial v_y}{\partial y} \\ \dot{\varepsilon}_{r\varphi} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_r}{r\partial\varphi} + \frac{\partial v_\varphi}{\partial r} - \frac{v_\varphi}{r}\right) & \dot{\varepsilon}_{ry} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_r}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial r}\right) & \dot{\varepsilon}_{\varphi y} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_\varphi}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{r\partial\varphi}\right)\end{aligned}\quad (35)$$

Mit der Vergleichsformänderungsgeschwindigkeit

$$\dot{\varphi}_v = \sqrt{\frac{2}{3}\left(\dot{\varepsilon}_{rr}^2 + \dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi}^2 + \dot{\varepsilon}_{yy}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{r\varphi}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{\varphi y}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{ry}^2\right)}\quad (36)$$

ergibt sich nach Gleichung (2) die plastische Formänderungsleistung  $P_V$  zu:

$$P_V = \frac{2k_f}{\sqrt{3}} \int_V \sqrt{\frac{1}{2}\left(\dot{\varepsilon}_{rr}^2 + \dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi}^2 + \dot{\varepsilon}_{yy}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{r\varphi}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{\varphi y}^2 + 2\dot{\varepsilon}_{ry}^2\right)} dV\quad (37)$$

Es lässt sich feststellen, dass sich das Ermitteln der verschiedenen Richtungsableitungen für die Bestimmung der einzelnen Komponenten des Formänderungsgeschwindigkeitstensors bei Verwendung von Ansätzen wie (33) sehr kompliziert gestaltet. /74/ hat exemplarisch eine Leistungsminimierung für das Walzen von Ringen mit rechteckigem Querschnitt durchgeführt und daraus die freien Parameter von (26) bestimmt.

In der Literatur werden bei der Anwendung des Schrankenverfahrens häufig Vereinfachungen durchgeführt bzw. Symmetrien festgelegt oder ausgenutzt /67/. Beim Fließpressen beispielsweise existiert Axialsymmetrie, so dass alle Größen von  $\varphi$  unabhängig sind. Damit vereinfachen sich die Gleichungen (35) zu:

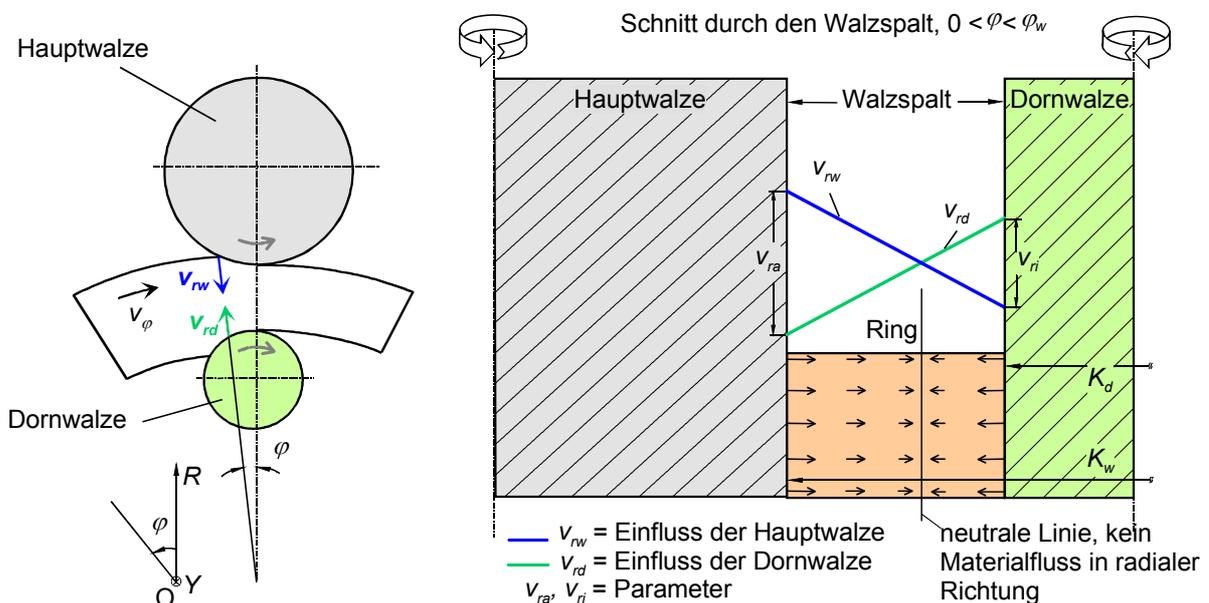
$$\begin{aligned}\dot{\varepsilon}_{rr} &= \frac{\partial v_r}{\partial r} & \dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi} &= \frac{v_r}{r} & \dot{\varepsilon}_{yy} &= \frac{\partial v_y}{\partial y} \\ \dot{\varepsilon}_{r\varphi} &= 0 & \dot{\varepsilon}_{ry} &= \frac{1}{2}\left(\frac{\partial v_r}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial r}\right) & \dot{\varepsilon}_{\varphi y} &= 0\end{aligned}\quad (38)$$

Soll dagegen für einen Walzprozess eines profilierten Ringes eine analytische Ermittlung der Umformleistung mit dem Ziel der Parameterbestimmung nach dem Schrankenverfahren durchgeführt werden, so verkompliziert sich die Berechnung gegenüber der in /74/ enthaltenen Betrachtung noch um die Abhängigkeit der Geschwindigkeiten von der axialen Richtung. Gleichzeitig entfallen im Bereich des Profils notwendige Randbedingungen für die Geschwindigkeiten an den Werkzeug-

oberflächen, so dass mit einer Minimierung der Umformleistung die freien Parameter nicht mehr trivial bestimmbar werden.

Um der Forderung nach einem plausiblen Ansatz der Geschwindigkeiten in radialer Richtung zu entsprechen, wurden im Rahmen dieser Arbeit die Einflüsse auf die Materialbewegung nach Dorn- und Hauptwalze separiert und je nach Kontaktsituation zwischen Ring und Walzen überlagert. Insbesondere fanden dabei die Kontaktbedingungen in axialer Richtung Berücksichtigung, so dass auch ein Materialfluss in das Kaliber einer profilierten Walze abgebildet werden kann.

Dabei spielen die nach 4.1.2 für jedes Zeitinkrement ermittelten Stichabnahmen beider Walzen eine wesentliche Rolle. Je höher eine Stichabnahme ist, desto größer ist die daraus resultierende Materialverdrängung in radialer Richtung. Zu Beginn eines Walzprozesses ergibt sich aufgrund der besonderen Geometrieverhältnisse beim Ringwalzen ein größerer Einfluss der Dornwalze, während im Laufe des Prozesses der Einfluss der Hauptwalze zunimmt. Dieses spiegelt sich in dem sich ändernden Verhältnis der Stichabnahmen  $\Delta S_w/\Delta S_d$  wider und muss auch durch die verwendeten Geschwindigkeitsansätze abgebildet werden. Bild 25 zeigt einen Ansatz bei dem linear über den Walzspalt abfallende Einflüsse von Dorn- und Hauptwalze angesetzt wurden.



**Bild 25:** Linear abfallende Geschwindigkeitsansätze in radialer Richtung

Der Materialgeschwindigkeitseinfluss der Hauptwalze ist mit  $v_{rw}$  bezeichnet, der der Dornwalze mit  $v_{rd}$ . Die Parameter  $v_{ra}$  und  $v_{ri}$  ergeben sich aus den Startwerten an den Walzenoberflächen sowie den Steigungen der Geraden. Steht der Ring in Kon-

takt mit beiden Walzen, z.B. beim Walzen von Ringen mit rechteckiger Kontur, so sind die beiden Einflüsse zu überlagern. Werden dagegen außenprofilierte Ringe gewalzt, so ist im Profilbereich der Hauptwalze nur der Anteil der Dornwalze  $v_{rd}$  wirksam. Formulieren lässt sich dieser Ansatz unter Verwendung der Kontaktfunktionen  $K_w$  und  $K_d$  wie folgt /92/:

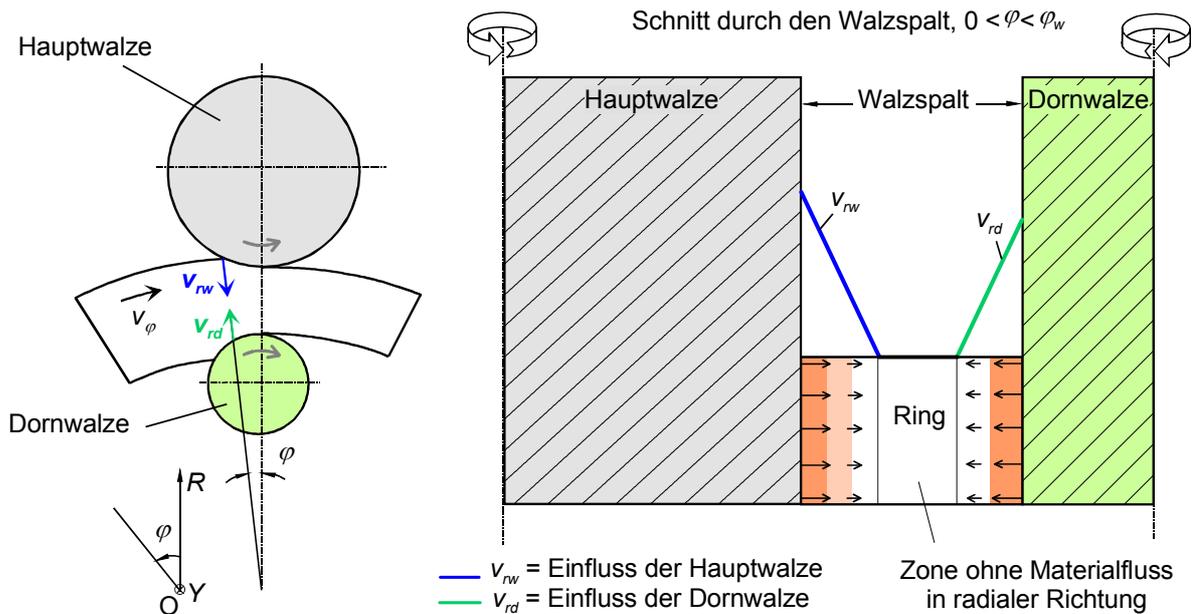
$$v_{rw}(R, \varphi) = \frac{C_1 + v_{ra}(\varphi)}{K_w(\varphi) - K_d(\varphi)} (R - K_d(\varphi)) + C_2 \quad (39)$$

$$v_{rd}(R, \varphi) = \frac{C_1 - v_{ri}(\varphi)}{K_w(\varphi) - K_d(\varphi)} (R - K_d(\varphi)) + v_{ri}(\varphi) + C_2 \quad (40)$$

$$v_r = v_{rd} - v_{rw} \quad (41)$$

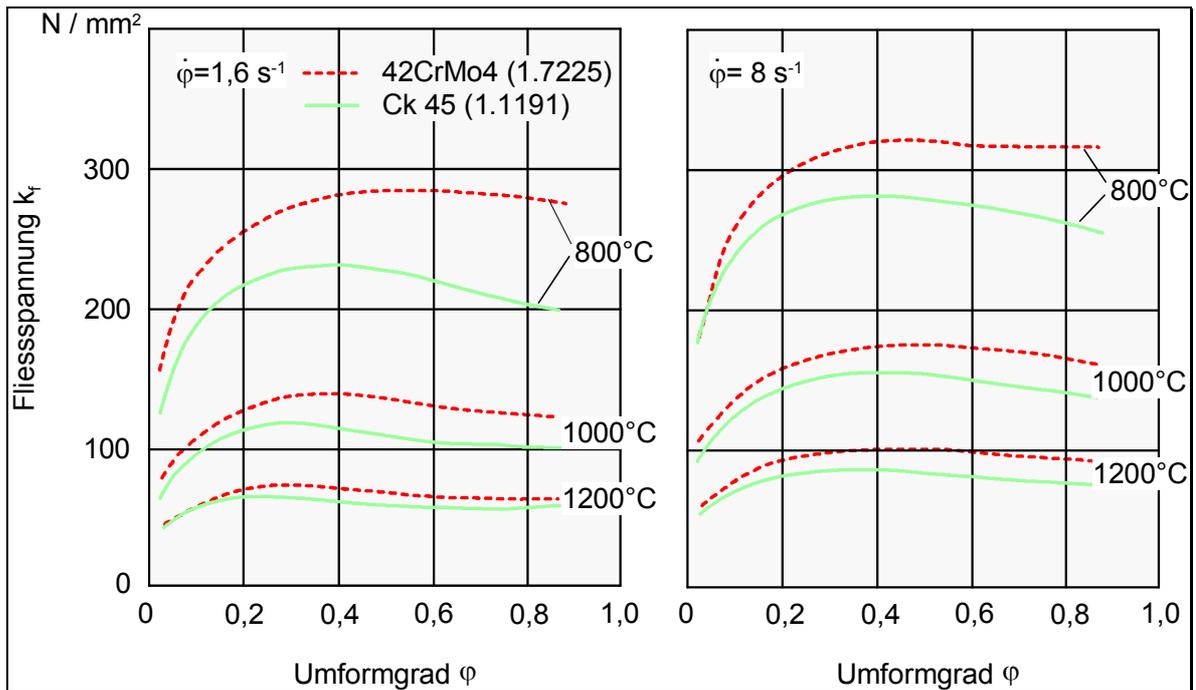
$C_1$  und  $C_2$  sind dabei Konstanten, die die absoluten Startwerte der Funktionen  $v_{rw}$  und  $v_{rd}$  an den Walzenoberflächen definieren. In der Anwendung innerhalb der Simulation werden die Konturen von Ring und Walzen axial in Elemente unterteilt, so dass die dargestellte Überlagerung der Geschwindigkeiten nach (41) in axialer Richtung stückweise, abhängig von der aktuellen Kontaktsituation, erfolgen kann.

Nach diesem Ansatz gibt es im Schnittpunkt der beiden Geraden keine Materialbewegung in radialer Richtung. Bei großer Steigung der Geraden kann sich sogar eine Zone ergeben, in der kein radialer Materialfluss stattfindet, d.h. dass der Ring in seiner Breite nicht vollständig durchformt wird (Bild 26).



**Bild 26:** Auswirkungen von steil abfallenden Geschwindigkeitsansätzen auf den Materialfluss in radialer Richtung im Walzspalt

Die Durchformung ist abhängig von Materialeigenschaften und Temperatur. Die Fließspannung  $k_f$  charakterisiert den Zusammenhang dieser Größen in Abhängigkeit von Umformgrad und Umformgeschwindigkeit. Daher liegt es nahe, die Steigung der Geraden abhängig von der Fließspannung einzustellen. Folglich müssen damit auch beide Steigungen als gleich groß definiert werden. Typische Warmfließkurven, in denen  $k_f$  über  $\varphi$  aufgetragen wird, liefern ab einem bestimmten Umformgrad  $\varphi$  bei konstanter Temperatur und konstanter Umformgeschwindigkeit auch ein relativ konstantes Niveau für die Fließspannung  $k_f$  (Bild 27).



**Bild 27:** Warmfließkurven der Werkstoffe 42CrMo4 (1.7225) und Ck 45 (1.1191)

Um die Geschwindigkeitsansätze einfach zu halten, wird im Rahmen einer Simulationsrechnung von einer aus der Fließkurve ermittelten und während des Prozesses konstant gehaltenen Fließspannung ausgegangen.

Die Startwerte der Geschwindigkeitsfunktionen  $v_{rw}$  und  $v_{rd}$  an den Walzenoberflächen werden durch die jeweiligen Stichabnahmen festgelegt und somit für jedes Zeitinkrement neu berechnet. So gelingt es, abhängig von den aktuell vorliegenden Geometrieverhältnissen in Verbindung mit dem für das Zeitinkrement vorgegebenen Vorschub des Dornes unterschiedliche Einflüsse von Dorn- und Hauptwalze an der jeweils gegenüberliegenden Seite des Walzspalts abzubilden. Praktische Versuche beim Walzen von außenprofilierten Ringen haben gezeigt, dass keineswegs, wie man zunächst vermuten könnte, die an der Dornseite erfolgte Stichabnahme  $\Delta S_d$  auch vollständig zu einer Verlagerung von Material in radialer Richtung in das Profil der Hauptwalze hinein führt. Vielmehr ist es meist so, dass abhängig von den aktuellen Walzverhältnissen nur ein Teil der Stichabnahme  $\Delta S_d$  auch zur Profilfüllung beiträgt. Das Material wird folglich nicht um den gesamten Betrag des Dornvorschubs in das Profil der Hauptwalze „hineingeschoben“. Dieses korrespondiert mit den Ansätzen eines über den Walzspalt in radialer Richtung abfallenden Einflusses der Stichabnahmen.

Weiterhin kann mit dem gewählten Ansatz für die radiale Geschwindigkeit auch berücksichtigt werden, dass bei unterschiedlichen Ringbreiten eine gleich große

Stichabnahme an der Dornseite zu verschiedenen Auswirkungen auf der Hauptwalzenseite führt. Dieses ergibt sich aus der während einer Simulation konstant gehaltenen Steigung der Geraden, die abhängig von der Fließspannung definiert wurde.

Im Rahmen von Simulationsrechnungen mit verschiedenen Ansätzen in radialer Richtung konnte gezeigt werden, dass mit Potenzfunktionen anstelle der einfachen linearen Abhängigkeit nach (39) und (40) gute Übereinstimmungen mit praktischen Versuchen erzielt werden (Kap 6.3).

### 4.2.3 Materialfluss in axialer Richtung

Zur Bestimmung des Werkstoffflusses in axialer Richtung eignet sich die Volumenkonstanzbedingung:

$$\dot{\varepsilon}_{rr} + \dot{\varepsilon}_{\varphi\varphi} + \dot{\varepsilon}_{yy} = 0 \quad (42)$$

Einsetzen von (35) liefert:

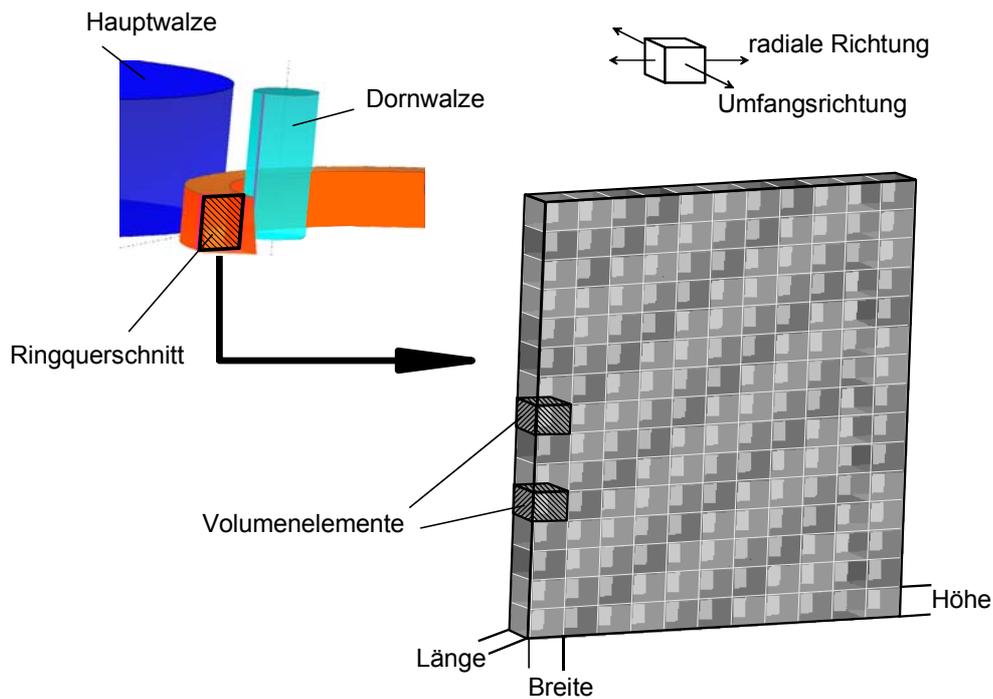
$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0 \quad (43)$$

Fan löst in /74/ die Gleichung (43) analytisch durch Integrieren über  $y$ , ersetzt dabei  $\frac{\partial v_\varphi}{r \partial \varphi}$  durch  $-\frac{\partial v_\varphi}{r \partial \varphi}$ , da  $\varphi$  und  $v_\varphi$  im gewählten Koordinatensystem entgegengesetzt orientiert sind und fordert  $v_y = 0$  für  $y = 0$ . Dies ergibt:

$$v_y = - \left( -\frac{\partial v_\varphi}{r \partial \varphi} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) y \quad (44)$$

Allerdings ist hierbei wiederum vorausgesetzt, dass  $v_r$  und  $v_\varphi$  unabhängig von  $y$  sind. Daher ist der Ansatz in dieser Form für profilierte Ringe nicht verwendbar.

Vorteile liefert hier eine räumlich inkrementelle Betrachtungsweise, bei der die Forderung nach Volumenkonstanz lokal erfüllt wird. In der Simulation wird der Ringquerschnitt am Walzspalteingang in kleine Volumenelemente zerlegt (Bild 28).



**Bild 28:** Volumenelemente am Walzspalteingang

Diese Elemente werden beim Durchqueren des Walzspalts unter dem Einfluss der angesetzten Geschwindigkeiten nach (26) und (41) in radialer und in Umfangsrichtung verformt und damit in ihrer Breite und Länge verändert. Innerhalb eines Simulationsschrittes werden die geometrischen und kinematischen Randbedingungen konstant gehalten. Die Deformationen der Elemente in radialer und in Umfangsrichtung lassen sich durch zeitliche Integration aus den Geschwindigkeitsansätzen berechnen:

$$\Delta \vec{s} = \int_{t_s} \vec{V}(r, \varphi, y) \cdot dt \quad (45)$$

$t_s$ : Zeit, die ein Element für den Durchlauf durch den Walzspalt benötigt

Die Zeit  $t_s$ , die ein Element zum Durchqueren des Walzspaltes braucht, ist neben der Drehgeschwindigkeit des Ringes insbesondere von der Länge des Walzspaltes abhängig, die sich aus den Stichabnahmen und den Walzenkontaktwinkeln  $\varphi_w$  und  $\varphi_d$  für jeden Simulationsschritt neu berechnen lässt (vgl. Gl.(11) u. Gl. (13)). Abhängig von den Stichabnahmen und der Kontaktsituation zwischen Ring und Walzen im betrachteten Simulationsschritt ergeben sich kontinuierlich variierende Deformationen der Elemente.



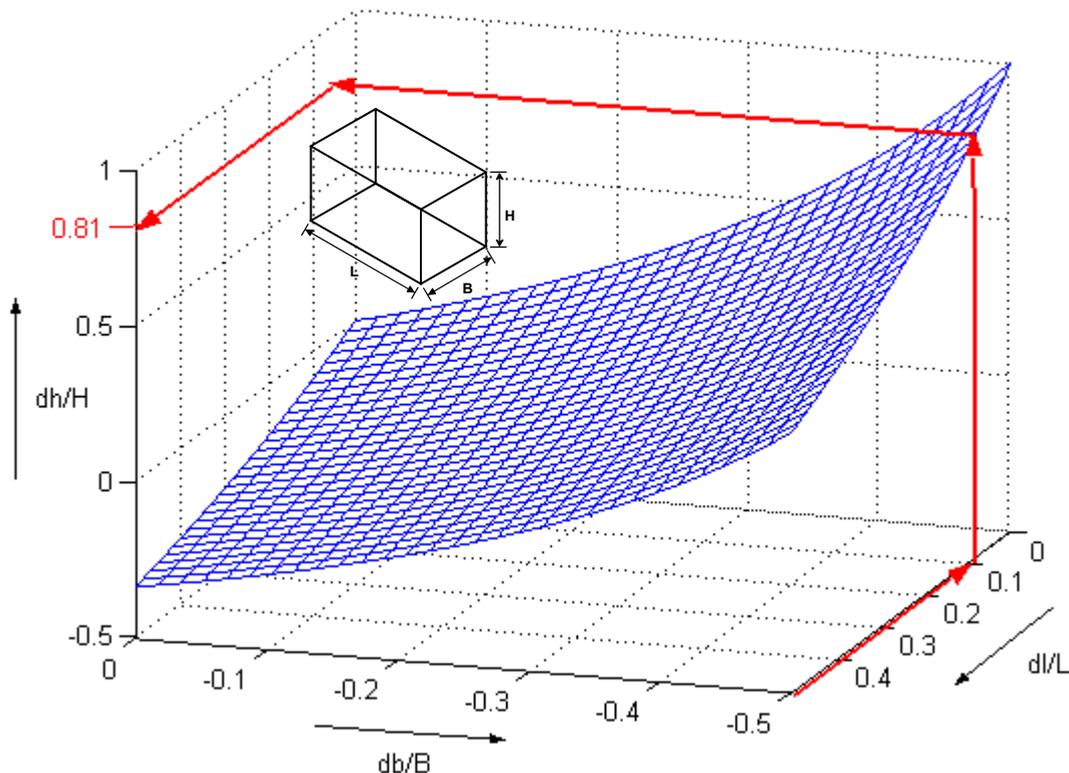
$$H \cdot B \cdot L = (H + dh) \cdot (B + db) \cdot (L + dl) \quad (46)$$

$$\text{mit } dh = dh_1 + dh_2 \text{ und } db = db_1 + db_2$$

Löst man die Gleichung nach  $dh$  auf, so ergibt sich:

$$dh = H \cdot \left( \frac{1}{(1 + db/B)(1 + dl/L)} - 1 \right) \quad (47)$$

**Bild 30** zeigt den Zusammenhang zwischen den Geometrieänderungen eines Volumenelementes in den 3 Raumrichtungen eines kartesischen Koordinatensystems. Für jede Kombination von Breiten- und Längenänderung kann aus dem Kennfeld die sich ergebende Höhenänderung ermittelt werden. Exemplarisch kann dem Diagramm entnommen werden, dass bei Halbierung der Elementbreite und gleichzeitiger Längenänderung von nur 10 % die Elementhöhe auf das 1,8-fache ihres Anfangswertes ansteigt. Positive Verhältnisse von  $dh/H$  liefern Beiträge zum unerwünschten Wachstum des Ringes in der Höhe, negative können zu Einziehungen in axialer Richtung führen.



**Bild 30:** Abhängigkeit der Höhenänderung von Längen- und Breitenänderung des Volumenelements

Durch Superposition aller Höhenänderungen der vertikal in einer Ebene liegenden Elemente kann die Ringaußenkontur stückweise berechnet werden.

### 4.3 Simulationsprinzip

Im Folgenden wird das Simulationsprinzip am Beispiel des Durchlaufs eines rechteckigen Ringquerschnitts durch den Radialwalzspalt dargestellt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind Haupt- und Dornwalze, die in diesem Beispiel mit ebener Mantelfläche ohne Profil versehen sind, in den Bildern 31-33 und 35-39 nicht mit dargestellt. Für den hier betrachteten Simulationsschritt wird aus Gründen der Darstellbarkeit eine Walzsituation angenommen, bei der die Stichabnahmen an Haupt- und Dornwalze gleich groß sind.

Beim Einlauf in den Radialwalzspalt wird die Ringkontur durch eine Punktemenge approximiert, wobei die einzelnen Punkte durch Geradenstücke miteinander verbunden sind (Bild 31). Die Anzahl der Punkte ist abhängig von der vor dem Simulationsstart gewählten Auflösung. Die Punkte werden auf der Ringquerschnittskontur gleichmäßig so positioniert, dass sich gegenüberliegende Punkte sowohl in radialer als auch in axialer Richtung ergeben.

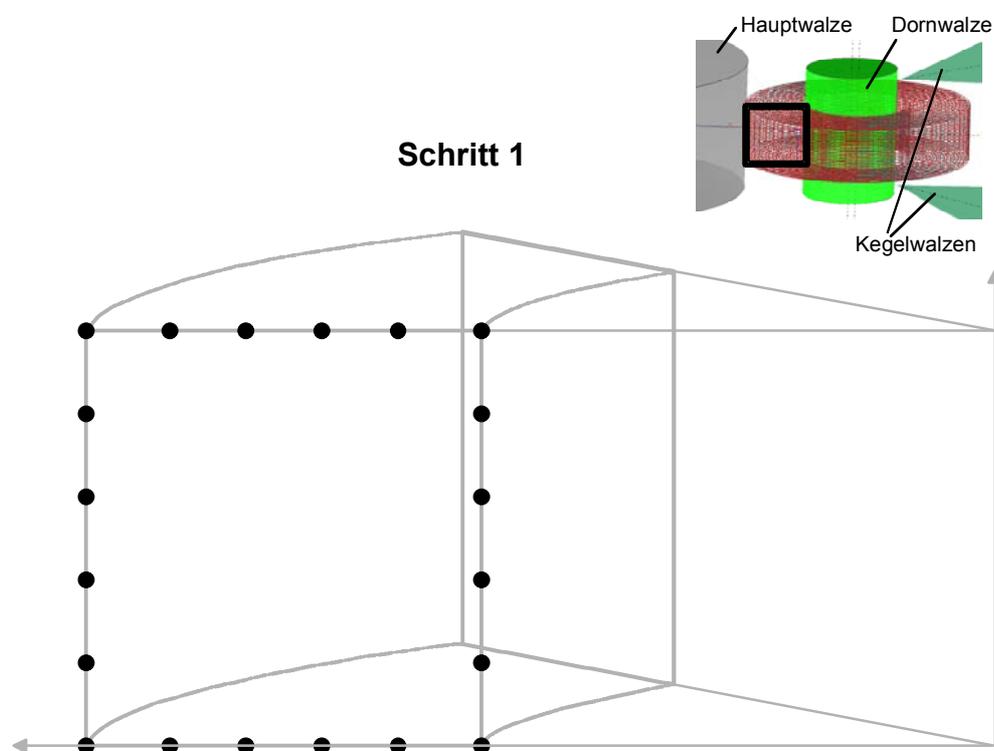


Bild 31: Simulationsprinzip Radialwalzspalt: Ermittlung der Konturpunkte

Im zweiten Schritt werden sukzessive nacheinander je zwei gegenüberliegenden Punkte miteinander verbunden, so dass eine 2-dimensionale Vernetzung des Ringquerschnitts entsteht (Bild 32). Die Knotenpunkte des Netzes sind für die Simulation wichtige Stützstellen, da an diesen Stellen der Bewegungszustand des Materials für alle drei Raumrichtungen ermittelt wird. Im Gegensatz zur FEM werden im weiteren Simulationsverlauf nicht die Verzerrungen dieses Netzes berechnet, sondern die Knotenpunkte dienen als Mittelpunkte kleiner, ideeller Ringsegmente, die im Ringquerschnitt positioniert werden (Bild 33).

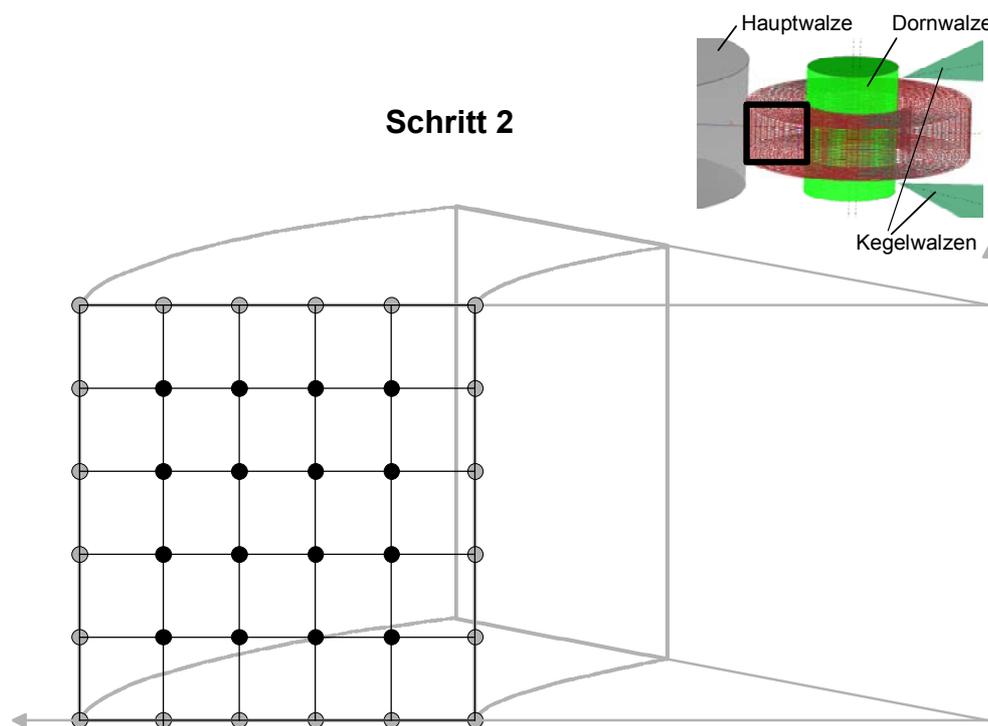
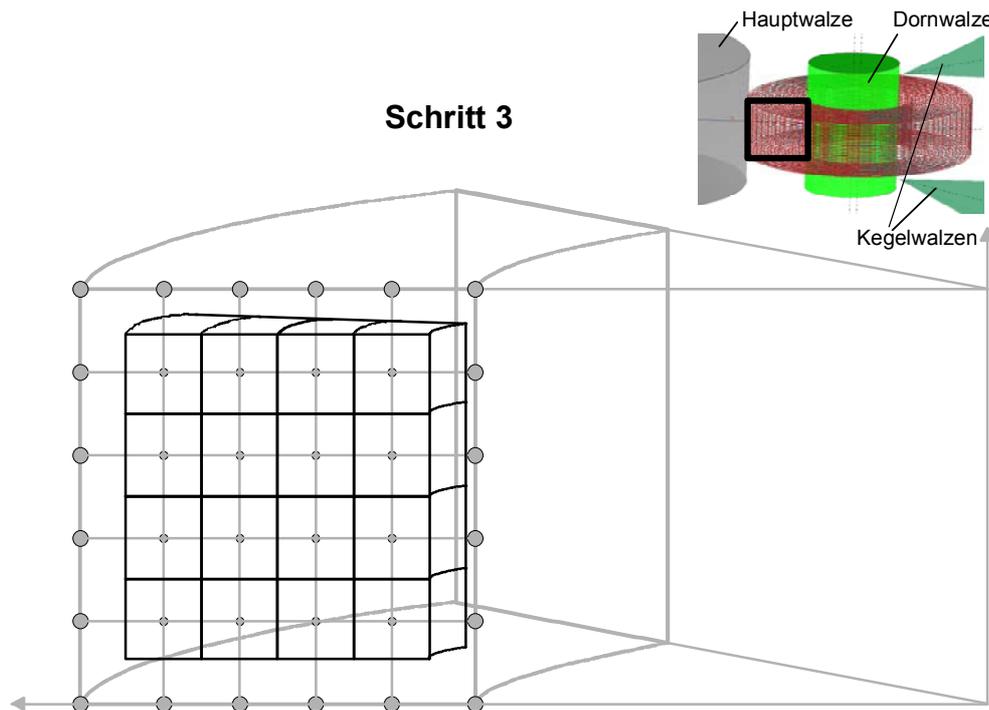


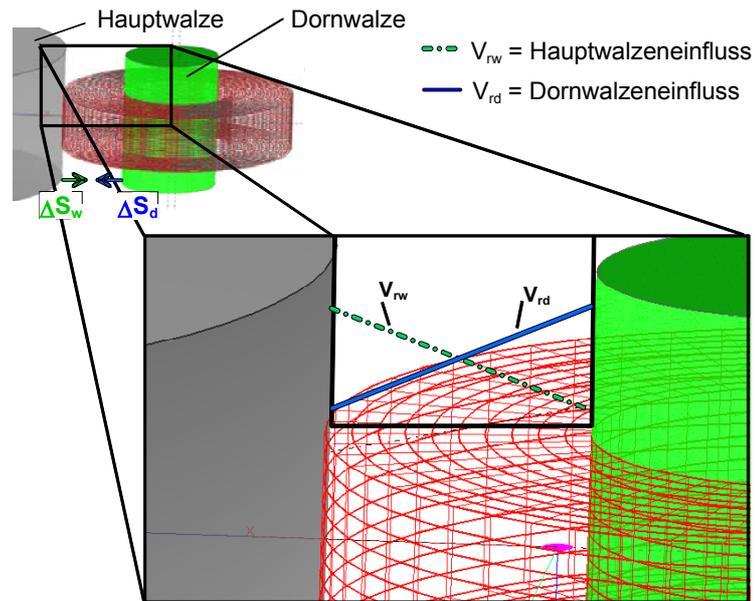
Bild 32: Simulationsprinzip Radialwalzspalt: Vernetzung des Ringquerschnitts

Ursache für die Materialbewegung in radialer Richtung sind die Stichabnahmen von Haupt- und Dornwalze  $\Delta S_w$  und  $\Delta S_d$ . Aufgrund des Ringwachstums ändert sich das Verhältnis der Stichabnahmen von Haupt- und Dornwalze kontinuierlich (vgl. Kap. 4.1.2). Für den aktuell betrachteten Simulationsschritt sind diese als gleich groß angenommen worden. Bei gleich großen Stichabnahmen werden zwangsläufig alle an Haupt- und Dornwalze anliegenden Punkte der Ringkontur um den gleichen Betrag in Richtung der Mitte des Ringquerschnitts verschoben.

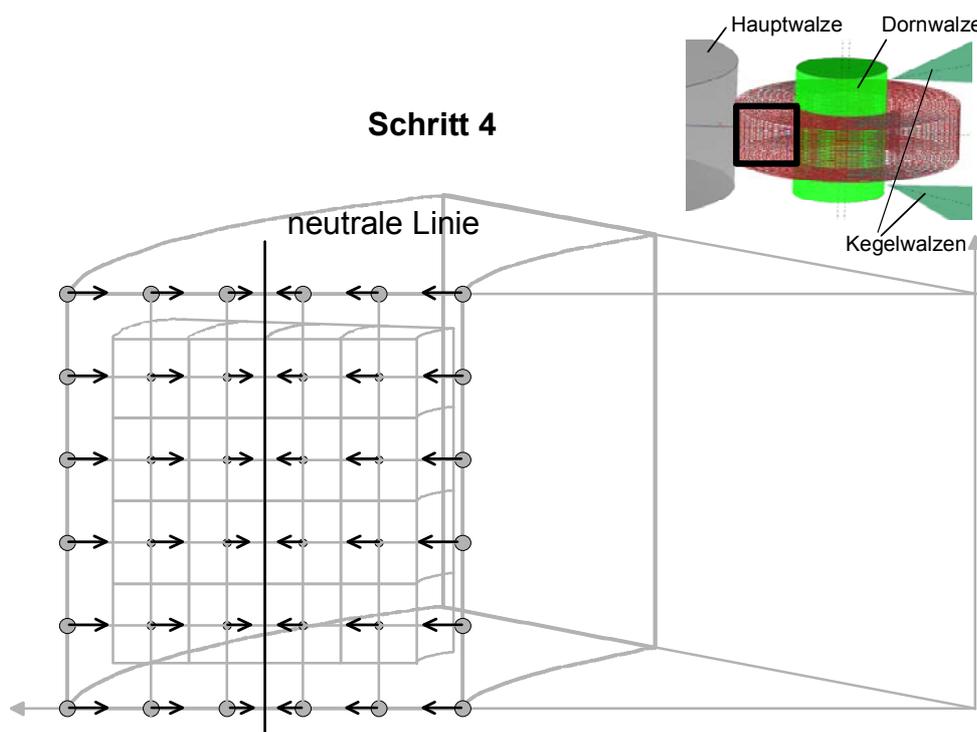


**Bild 33:** Simulationsprinzip Radialwalzspalt: Positionierung der Volumenelemente

Die Bewegung der Knotenpunkte des Netzes im Innern des Ringes dagegen ist abhängig von dem Materialgeschwindigkeitsansatz in radialer Richtung. Geht man beispielsweise von einem linear über den Walzspalt abfallenden Einfluss der jeweiligen Walze aus, wie in [Bild 34](#) dargestellt, so ergibt sich bei den hier gewählten Randbedingungen eine Linie, an der keine Materialbewegung stattfindet. Diese Linie ist in [Bild 35](#) als neutrale Linie bezeichnet und liegt nur im Fall gleich großer Stichabnahmen in der Mitte des Ringquerschnitts. Fallen die Einflüsse der beiden Walzen sehr stark über dem Walzspalt ab, d.h. haben die Geraden des Geschwindigkeitsansatzes nach Kap. 4.2.2 eine große Steigung, so kann das zu einer neutralen Zone ohne radiale Materialbewegung in der Mitte des Ringes führen. Mit diesem Simulationsansatz kann daher prinzipiell auch eine geringe Durchformung des Ringes mit Umformzonen nur in walzennahen Bereichen abgebildet werden.



**Bild 34:** Linear über den Walzspalt abfallende Einflüsse von Haupt- und Dornwalze



**Bild 35:** Simulationsprinzip Radialwalzspalt: Verschiebung von Netz- und Konturpunkten

Der Vergleich mit Walzversuchen hat gezeigt, dass gute Simulationsergebnisse erzielt werden können, wenn die radiale Materialbewegung mit Hilfe eines Exponentialansatzes berechnet wird (vgl. Kap. 6.2). Danach lassen sich die Verschiebungen  $\Delta x$  der Netz und Konturpunkte wie folgt ermitteln:

$$\Delta x = \left( \frac{x_n - x}{x_n} \right)^{m \cdot k_f} \cdot \Delta S_w \quad \text{für } 0 \leq x < x_n \quad (48)$$

$$\Delta x = \left( \frac{x - x_n}{b - x_n} \right)^{m \cdot k_f} \cdot \Delta S_d \quad \text{für } x_n \leq x < b$$

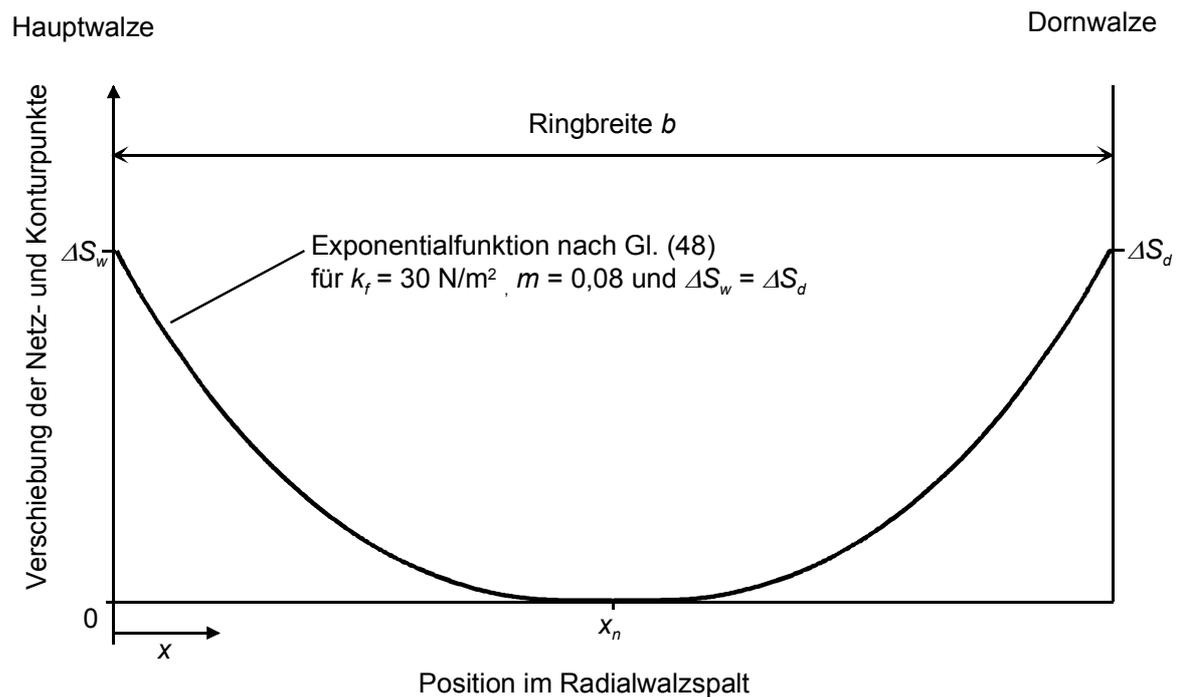
$$\text{mit } x_n = \frac{\Delta S_w}{\Delta S_w + \Delta S_d} \cdot b$$

$\Delta S_w$ : Stichabnahme der Hauptwalze

$\Delta S_d$ : Stichabnahme der Dornwalze

$k_f$ : Fließspannung,  $m$ : Faktor  $b$ : Ringbreite

$x_n$ : neutrale Linie



**Bild 36:** Verlauf der Exponentialfunktion nach Gl. (48)

**Bild 36** zeigt den Verlauf der Exponentialfunktion nach Gl. (48) exemplarisch für eine Fließspannung von  $30 \text{ N/m}^2$ . Der Faktor  $m$  wurde durch Walzversuche empirisch ermittelt. Aus dem Funktionsverlauf kann an jeder Stelle im Walzspalt die Verschiebung eines Netzpunktes in radialer Richtung abgelesen werden. Der in **Bild 36**

dargestellte Verlauf ergibt sich für den Fall gleich großer Stichabnahmen an Haupt- und Dornwalze und beidseitigem Kontakt des Ringes mit den Walzen. Da sich die Kontaktsituation des Ringes mit den Walzen und die Verhältnisse der Stichabnahmen während eines Walzprozesses kontinuierlich ändern, ergeben sich für jeden Simulationsschritt ein veränderter Verlauf der Exponentialfunktion und damit auch unterschiedlich große Verschiebungen der Netzpunkte.

Unabhängig vom gewählten Materialgeschwindigkeitsansatz werden für jeden Knotenpunkt des Netzes die Einflüsse beider Walzen berücksichtigt. Die daraus resultierende Bewegung in radialer Richtung ist in Bild 35 mit Pfeilen angedeutet. Durch Interpolation der radialen Bewegungen zweier in einer Ebene nebeneinander liegender Knotenpunkte kann im fünften Schritt die Kantenverschiebung der Volumenelemente berechnet werden (Bild 37).

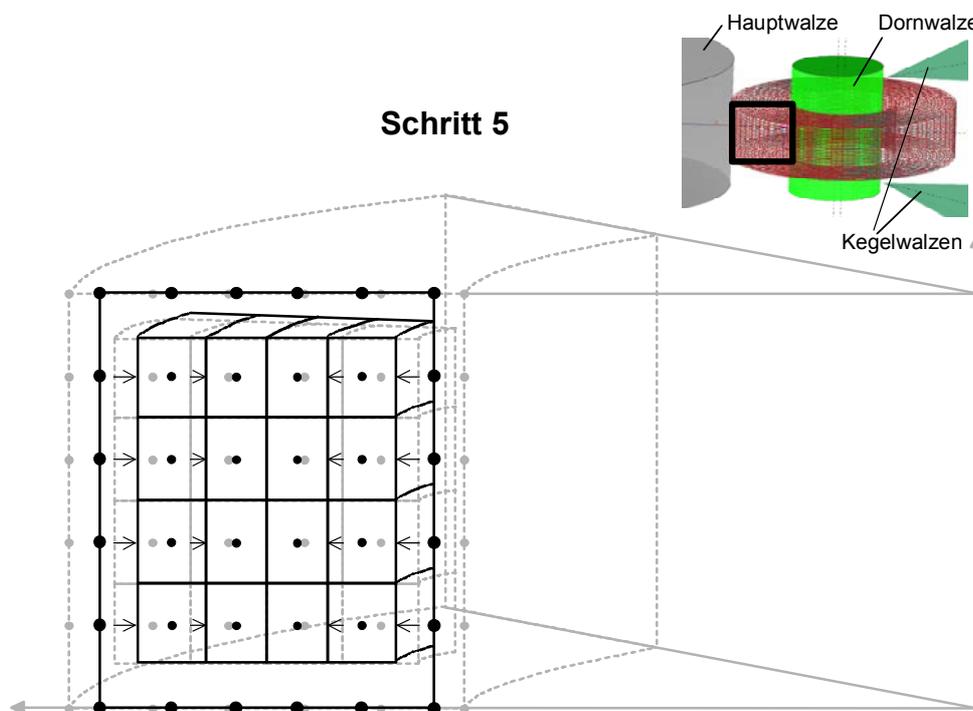


Bild 37: Simulationsprinzip Radialwalzspalt: Verformung der Volumenelemente in radialer Richtung

In Umfangsrichtung ergibt sich in Schritt 6 die Längung der Elemente aus den in dieser Richtung angesetzten Materialgeschwindigkeiten durch zeitliche Integration (vgl. Kap. 4.2.1). Dieser Ansatz wurde in /74/ für das Ringwalzen entwickelt und basiert auf verschiedenen Untersuchungen auf dem Gebiet des Flachwalzens. Ein ideales Volumenelement ist auf seinem Weg durch den Walzspalt dem Einfluss

dieses Geschwindigkeitsansatzes nach Gleichung (26) ausgesetzt. Nach dem Durchqueren der Fließscheide erhöht sich die Materialgeschwindigkeit gegenüber der Walzenbewegung. Dadurch wird das Volumenelement in Umfangsrichtung gestreckt. Diese Längenänderung ist abhängig von der Zeit, in der sich das Element im Walzspalt befindet. Abhängig von den Stichabnahmen an Haupt- und Dornwalze kann der Eintrittswinkel des Ringes in den Walzspalt nach den Gleichungen (11) und (13) ermittelt werden. Damit ergibt sich die Länge des Walzspaltes und über die Drehzahl des Ringes auch die Zeit, die das Volumenelement zur Durchquerung des Walzspaltes benötigt. Die Integration der Geschwindigkeit über die Zeit liefert dann die Verformung eines Elements in Umfangsrichtung. Dabei werden weiter außen liegende Elemente aufgrund der kreisförmigen Geometrie des Ringes stärker gelängt als an der Ringinnenseite befindliche Elemente (Bild 38).

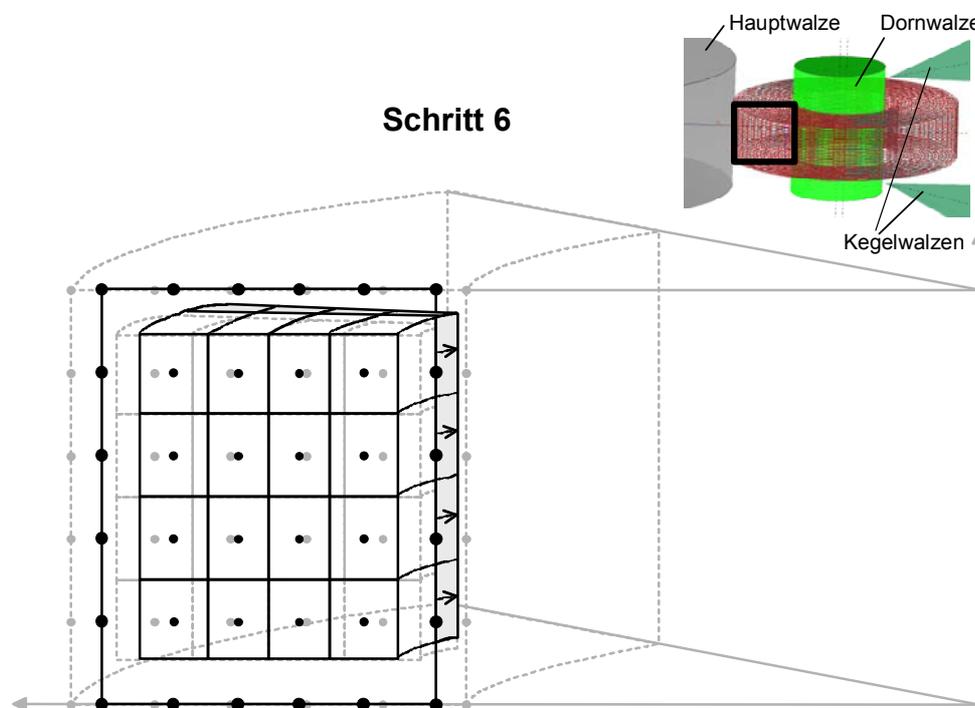
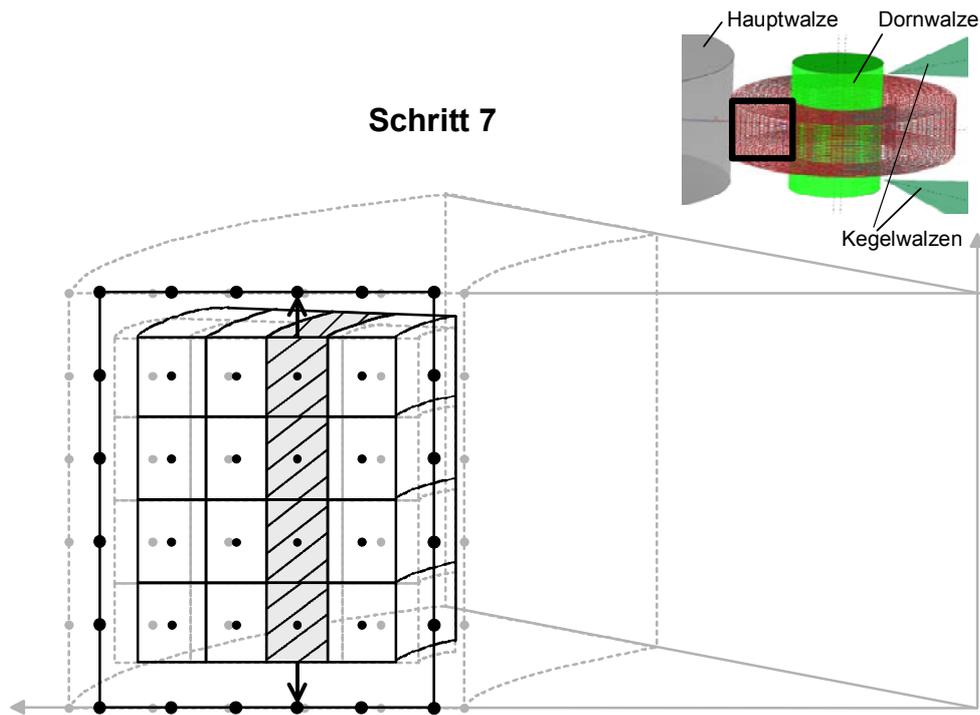
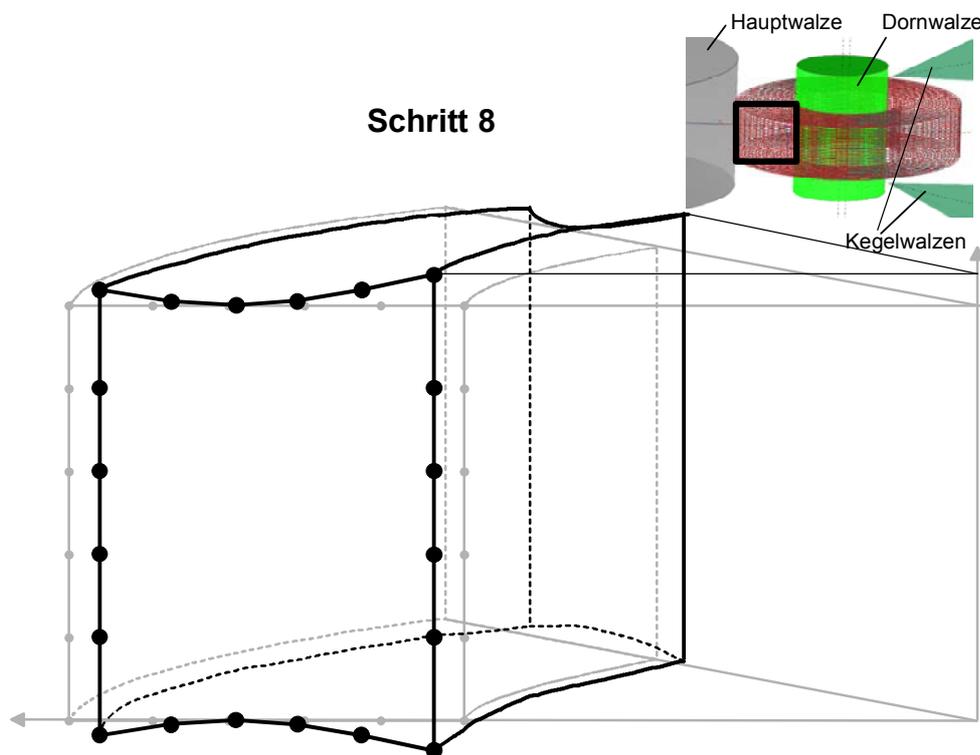


Bild 38: Simulationsprinzip Radialwalzspalt: Verformung der Volumenelemente in Umfangsrichtung

Sind die Verformungen der Elemente in 2 Richtungen bestimmt, so können über die Bedingung der Volumenkonstanz die Änderungen in axialer Richtung elementweise nach Gleichung (47) berechnet werden. Bilanziert man dann über die Verformungen aller in einer vertikalen Ebene liegenden Elemente und extrapoliert man die Ergebnisse auf die Punkte der Ringkontur, so erhält man das neue Ringquerschnittsprofil am Walzspaltausgang (Bild 39).



**Bild 39:** Simulationsprinzip Radialwalzspalt: Bilanzierung der Verformungen in axialer Richtung



**Bild 40:** Simulationsprinzip Radialwalzspalt: Bestimmung der neuen Konturpunktpositionen

Die entstandene Kontur nach Bild 40 wird in der Simulation bis zum Einlauf in den Axialwalzspalt konstant gehalten. Wird nach einer konventionellen Walzstrategie gewalzt, so sind die Axialwalzen im Eingriff und die im Radialwalzspalt entstandene axiale Breitung wird durch den Kegelwalzenvorschub wieder verwalzt. In diesem Fall läuft eine halbe Ringumdrehung später wieder ein Ringquerschnitt mit rechteckigem Profil in den Radialwalzspalt ein.

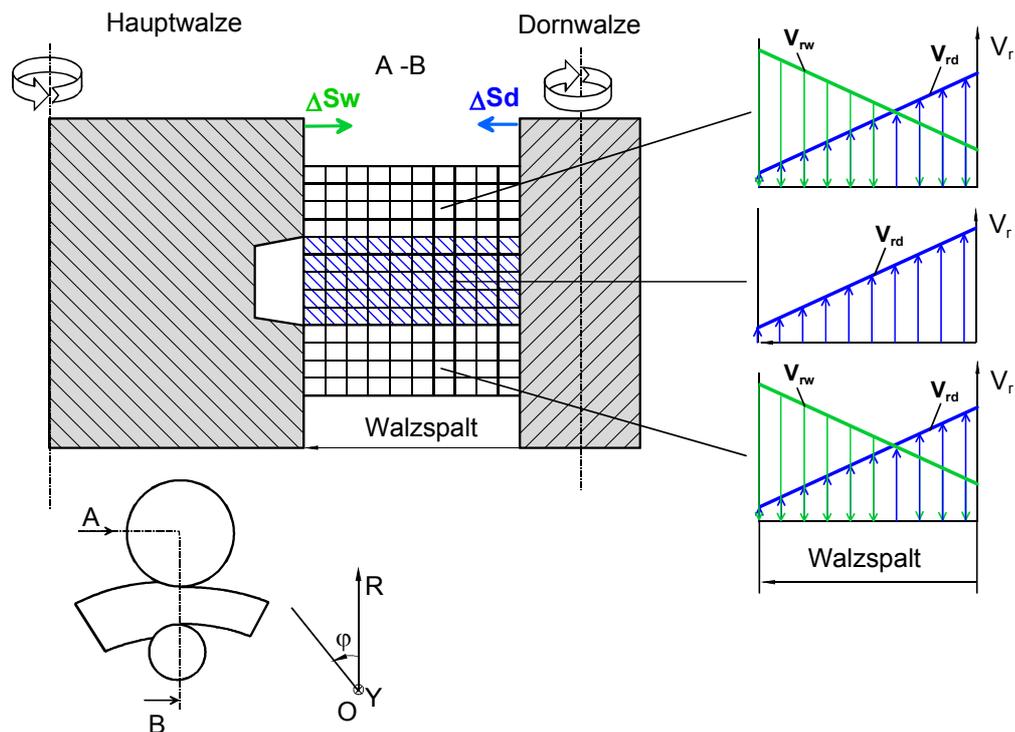
In jedem weiteren Simulationsschritt wird die aktuell in den Radialwalzspalteingang einlaufende Ringkontur vernetzt und mit Hilfe der Verformung von ideell eingebrachten Volumenelementen neu berechnet. Diese neu ermittelte Ringkontur wird bis zum Eingang des Axialwalzspaltes konstant gehalten und dort durch die Bewegung der Axialwalzen umgeformt.

Die zeitliche Diskretisierung des Prozesses kann variabel vorgegeben werden. Sinnvolle Auflösungen liegen in der Größenordnung von 100-250 ms, da sich hierbei, abhängig von der gewählten Walzstrategie, Stichabnahmen im Bereich von 1/10 mm je Zeitschritt ergeben.

Die Überprüfung dieses Berechnungsansatzes auf Eignung wurde im Rahmen von Walzversuchen durchgeführt. Walzt man einen Ring mit rechteckigem Querschnitt ohne Verwendung der Axialwalzen, so wird dem Material die Möglichkeit gegeben, sowohl in Umfangsrichtung zu fließen, als auch zu einem Wachstum des Ringes in der Höhe beizutragen. Vergleicht man das Ringprofil und den Ringdurchmesser zu definierten Zeitpunkten mit den Simulationsergebnissen, so lässt sich beurteilen, ob das durch den Dornwalzenvorschub in radialer Richtung verdrängte Volumen mit den verwendeten Ansätzen richtig in die Anteile in Umfangs- und axialer Richtung aufgeteilt wurde. Falls erforderlich, kann der Anteil in Umfangsrichtung durch Variation der Parameter im Berechnungsansatz modifiziert werden. Zwangsläufig ergibt sich über die Bedingung der Volumenkonstanz dann auch eine veränderte Materialbewegung in axialer Richtung.

Diese Vorgehensweise wurde in dieser Arbeit gewählt, um das System mit der Praxis abzugleichen (vgl. Kap. 6.2). Mit diesen „geeichten“ Ansätzen erfolgt im nächsten Schritt die Berechnung von profilierten Ringen. Hier liefert ein Vergleich mit realen Walzversuchen dann Aussagen über die Qualität der Simulationsrechnung.

Bei der Berechnung von Ringen mit profiliertem Querschnitt werden in der Simulation die Schritte 1-8 analog zu den Ringen mit rechteckigem Querschnitt durchlaufen. Allerdings ergeben sich hierbei insbesondere im Bereich des Profils aufgrund des fehlenden Kontakts zur Hauptwalze andere Materialgeschwindigkeiten.



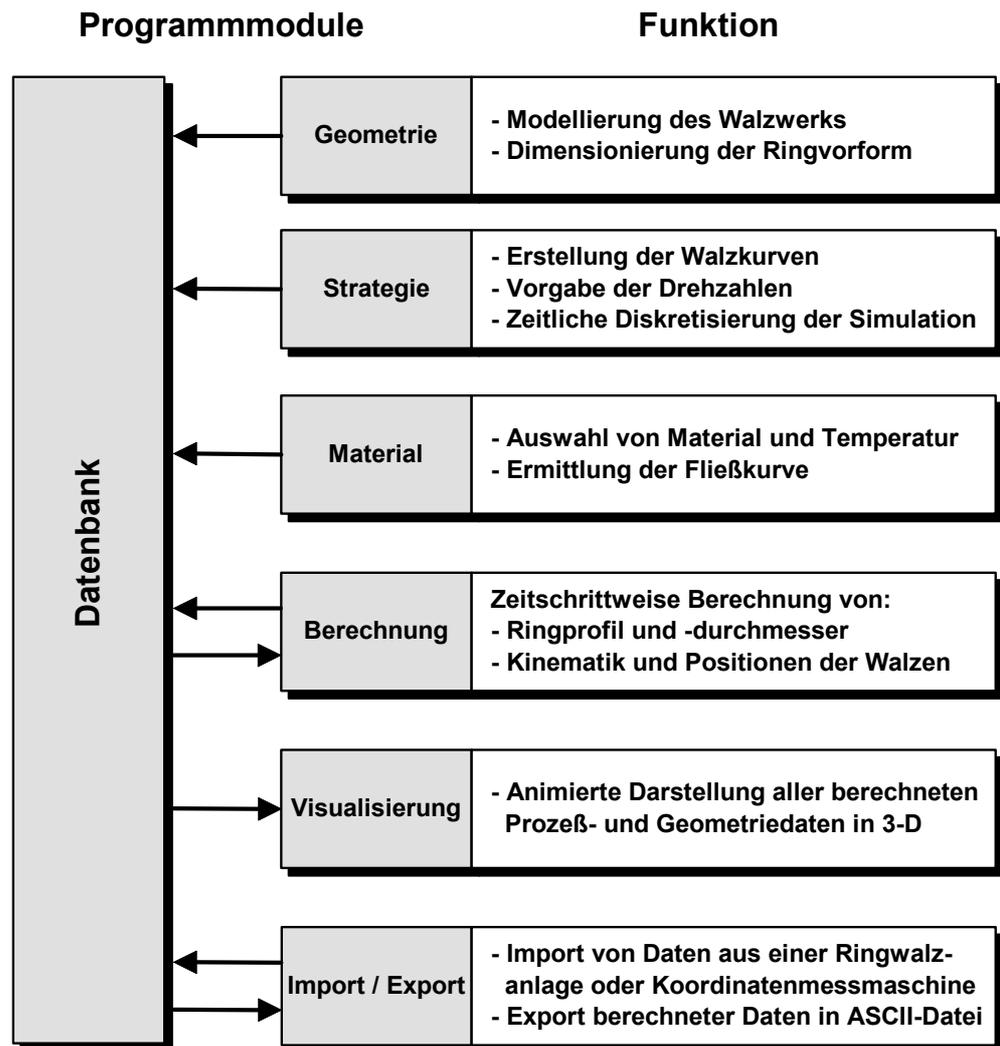
**Bild 41:** Materialgeschwindigkeiten in verschiedenen Zonen eines profiliert gewalzten Ringes

Bild 41 zeigt einen Schnitt durch den Radialwalzspalt während eines Walzprozesses mit profilierter Hauptwalze. In der oberen und unteren Zone des Ringes, die in Kontakt mit beiden Walzen stehen, ergeben sich die Materialgeschwindigkeiten durch Überlagerung der Einflüsse von Haupt- und Dornwalze analog zum Walzen rechteckiger Ringe. Im mittleren Bereich hat der Ring keinen Kontakt mit der Hauptwalze und daher wirkt hier in radialer Richtung nur die durch die Stichabnahme der Dornwalze verursachte Materialbewegung.

Die Füllung des Profils ist abhängig von dem über dem Walzspalt abnehmenden Einfluss der Dornwalze. Eine nicht vollständige Durchformung des Ringes führt nach dem verwendeten Simulationsansatz zu einer schlechteren Profillfüllung.

## 5 Realisierung des Simulationssystems

Das Simulationssoftwarepaket RingRoSi (**R**ing **R**olling **S**imulation) wurde mit dem Microsoft Developer Studio unter Verwendung von Visual Basic und Visual C entwickelt. Es gliedert sich in die Module Geometrie, Strategie, Material, Berechnung, Visualisierung und Datenbankanbindung mit Im- und Exportfunktionalität.



**Bild 42:** Programmstruktur und Funktion der Module des entwickelten Simulationssystems RingRoSi

Das Simulationsprogramm wurde so konzipiert, dass es auf einem handelsüblichen PC ohne spezielle Hardwareanforderungen läuft. Bild 42 zeigt die Programmstruktur mit Funktionsbeschreibung der einzelnen Module. Die Schnittstellen zum Anwender befinden sich vollständig innerhalb einer Visual Basic Applikation, während

die Funktionalität der 3D-Visualisierung in OpenGL programmiert wurde. Die Datenthaltung aller vom Benutzer eingegebenen, aus einer Messmaschine oder einer Ringwalzanlage importierten und aller berechneten Daten erfolgt in einer Access Datenbank.

### 5.1.1 Geometrieeditor

Im Geometrieeditor hat der Anwender die Möglichkeit, die geometrischen Verhältnisse eines Walzwerks mit einem eigens entwickeltem CAD-System zu modellieren. Die Konturen der einzelnen Komponenten wie Haupt-, Dorn- und Kegelwalzen können unter Verwendung verschiedener Zeichenfunktionen erzeugt und in der Datenbank abgespeichert werden. Auch die Vorformen verschiedener Ringe lassen sich so auf einfache Weise generieren. Bild 43 zeigt den Geometrieeditor am Beispiel einer Hauptwalzenkontur.

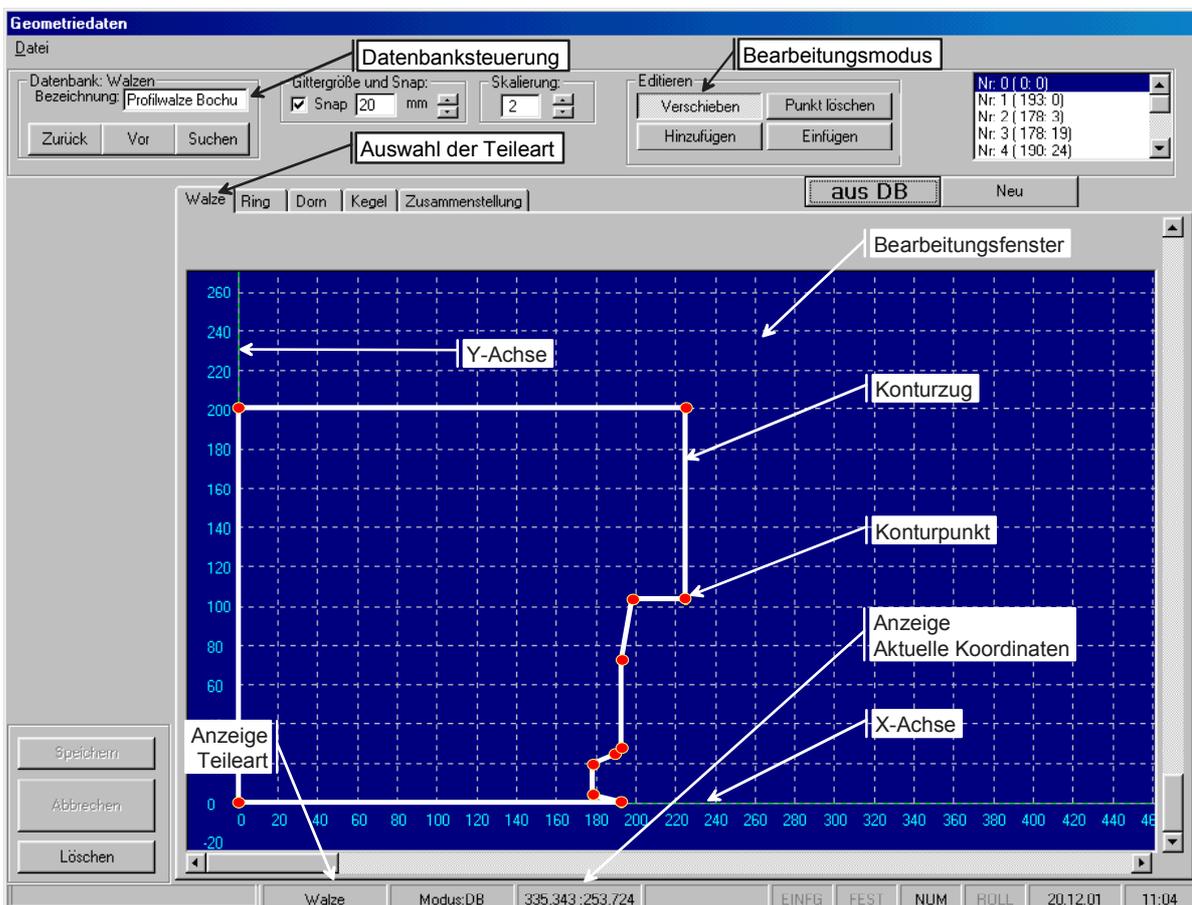
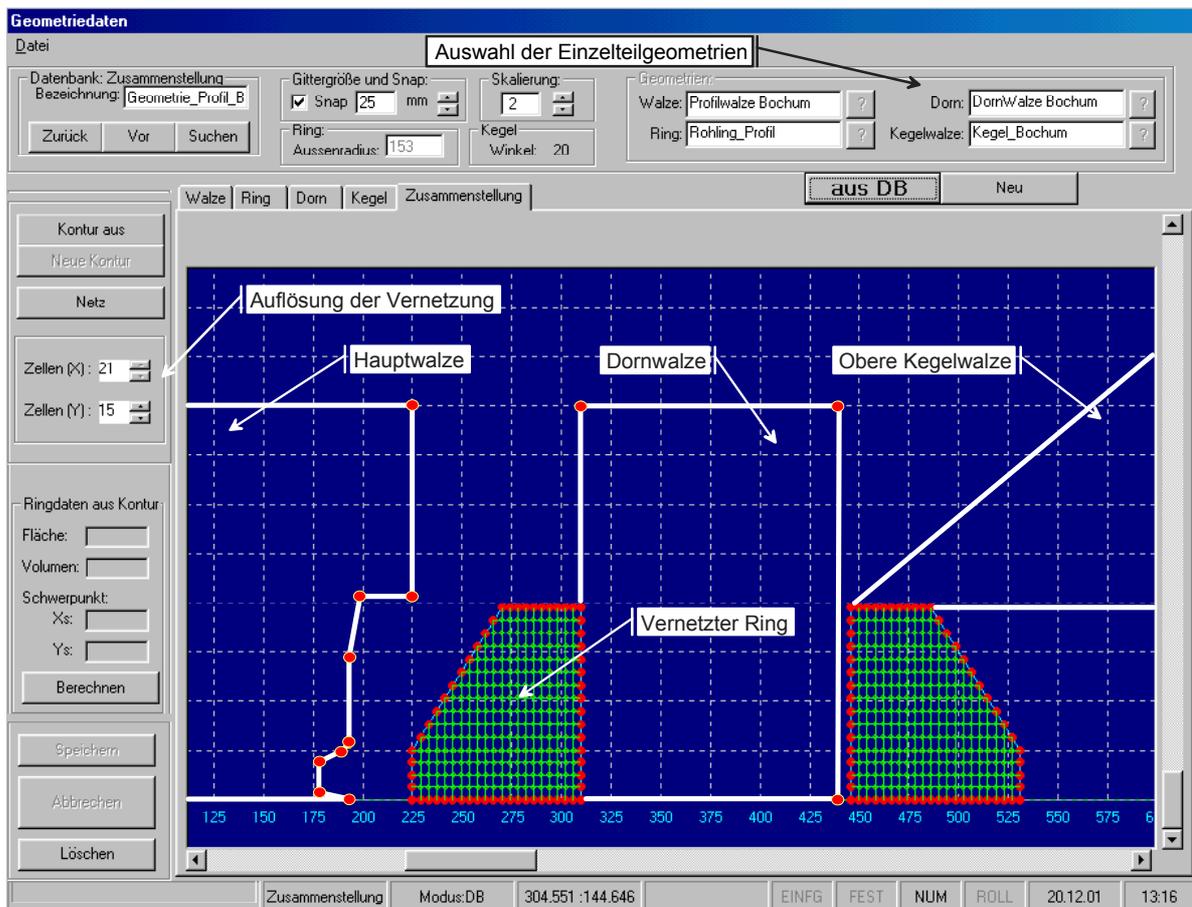


Bild 43: Geometrieeditor zur Erstellung der Komponenten des Walzwerks

Das Eingabefenster stellt alle zur Neueingabe und Modifikation notwendigen Funktionen zur Verfügung. Die Skalierung der Darstellung kann an die jeweiligen Be-

dürfnisse angepasst werden. Der Zeichenbereich ist mit einem Hilfsgitter ausgestattet, dessen Maschenweite verändert werden kann. Der Nullpunkt des hier dargestellten Koordinatensystems stellt zugleich den Bezugspunkt der Teile dar. Auf diesen Punkt beziehen sich alle folgenden Simulations- und Visualisierungsoperationen.

Im Zusammenstellungsfenster können dann die in der Datenbank vorhandenen Einzelteilgeometrien beliebig zu einem Geometriedatensatz kombiniert werden (Bild 44). Hier erfolgt auch die Vernetzung des Ringes mit der gewählten Auflösung als Basis für die im Simulationsverfahren erforderlichen Volumenelemente.



**Bild 44:** Zusammenstellungsfenster mit vernetztem Ring und Geometrie der Walzen

### 5.1.2 Strategieeditor

Um eine Simulation eines Ringwalzprozesses durchführen zu können, benötigt man Informationen über die Kinematik des Prozesses, d.h. Weg-Zeitverläufe der Vorschübe von Dorn- und Kegelwalzen sowie die Drehzahl der Hauptwalze, aus der sich die Drehzahlen der Kegelwalzen über die aktuellen geometrischen Verhältnis-

se ermitteln lassen. Bild 45 zeigt einen typischen Verlauf des Dornvorschubs innerhalb eines Walzprozesses.

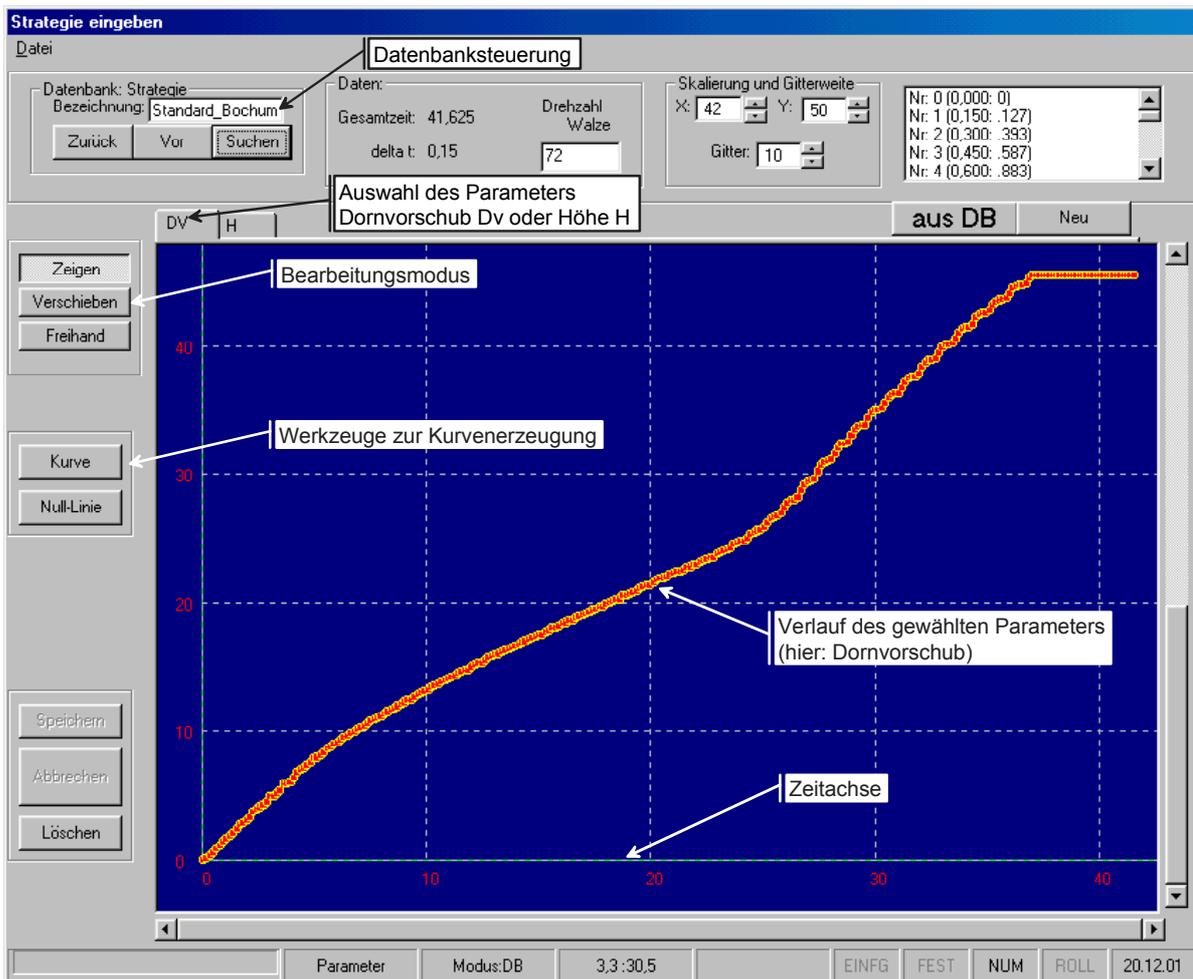


Bild 45: Strategieeditor zur Definition der Walzstrategie und –kinematik (Eingangsgrößen für das Simulationsprogramm)

Das System bietet Werkzeuge zur Erzeugung und Bearbeitung von verschiedenen Kurvenverläufen. Durch Umschalten auf das Register H in Bild 45 kann der Verlauf des Kegelwalzenabstands angezeigt werden. Die Nullpunkte beider Kurven befinden sich an der Stelle, an der Dornwalze bzw. die Kegelwalzen am Ring anliegen. Damit entspricht der Verlauf des Kegelwalzenabstands dem Verlauf der Ringhöhe eines Radial-Axial-Ringwalzprozesses. Beide Kurven werden zusammen mit der Drehzahl der Hauptwalze in der Datenbank abgelegt und bilden eine Walzstrategie.

Damit auch reale Walzprozesse simulationstechnisch nachgefahren werden können, bietet das Datenbankmodul die Möglichkeit, Dornvorschub und Höhenverlauf aus den protokollierten Daten der Steuerung eines Walzwerks zu extrahieren und zu importieren. Diese Verläufe können im Strategieeditor dargestellt und bei Bedarf

modifiziert werden, um beispielsweise Berechnungen mit gleicher Geometrie aber veränderter Walzstrategie durchführen zu können.

### 5.1.3 Materialauswahl

Die Auswahl der Materialdaten des Rings ist in einem eigenen Dialogfenster realisiert worden (Bild 46).

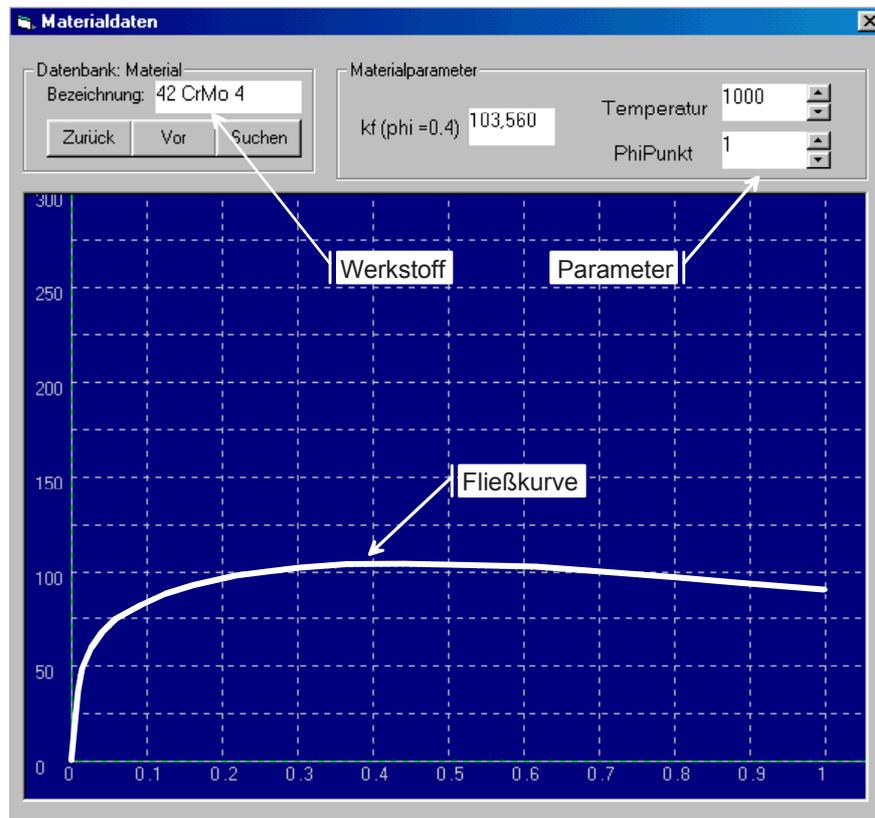


Bild 46: Dialogfenster Materialdaten

Für verschiedene Werkstoffe sind entsprechende Fließkurvenscharen in Form von funktionalen Zusammenhängen hinterlegt. Abhängig von der Temperatur  $T$  und der Umformgeschwindigkeit  $\dot{\varphi}$  wird der Verlauf der Fließspannung  $k_f$  über dem Umformgrad  $\varphi$  nach Gl. (49) berechnet.

$$k_f = K \cdot e^{(m_1 \cdot T)} \cdot \dot{\varphi}^{m_2} \cdot \varphi^{m_3} \cdot e^{m_4 \cdot \varphi} \quad (\text{nach Spittel /93/}) \quad (49)$$

Für den Werkstoff 42CrMo4 (1.7225) beispielsweise betragen die Parameter in Gl. (49):

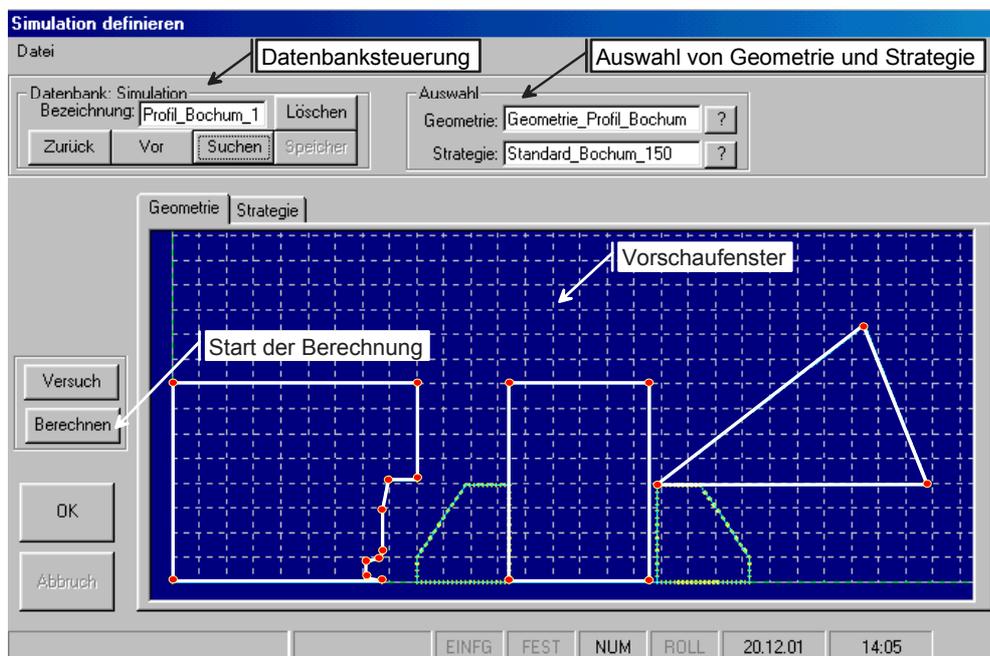
$$K = 6514,5, \quad m_1 = -0,0036, \quad m_2 = 0,1257, \quad m_3 = 0,2961, \quad m_4 = -0,6758.$$

Im Rahmen der Simulationsrechnung wird die Fließspannung  $k_f$  bei einem Umformgrad von  $\varphi = 0,4$  verwendet, da sich an dieser Stelle die maximale Fließspannung für diesen Werkstoff ergibt. In erster Näherung kann die Fließspannung in bestimmten Grenzen als konstant über dem Umformgrad betrachtet werden. Die Fließspannung geht über die Gleichung (48) in die Berechnung der Werkstoffbewegung ein.

Eine Auswertung der Fließkurvenverläufe im Hinblick auf Variation von Temperatur und Umformgeschwindigkeit zeigt, dass für einen Ringwalzprozess mit vergleichsweise niedrigen und gleichmäßigen Umformgeschwindigkeiten der Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf die Fließspannung gegenüber dem Temperatureinfluss vernachlässigt werden kann. So bewirkt beispielsweise ein Abfall der Temperatur von 1100 °C auf 1000° C eine Erhöhung der Fließspannung in gleicher Größenordnung wie eine Verzehnfachung der Umformgeschwindigkeit bei gleichbleibender Temperatur.

#### 5.1.4 Berechnungsmodul

Die Definition einer Simulation erfolgt durch Auswahl von Geometrie und Strategie aus der Datenbank.



**Bild 47:** Definition einer Simulation bestehend aus Geometrie und Walzstrategie

Im Vorschauenfenster in Bild 47 können Zusammenstellung der Geometrie und der Strategie noch einmal überprüft werden. Geometrie und Strategie bilden zusammen einen Simulationsbasisdatensatz. Mit diesem kann dann eine Simulationsrechnung gestartet werden. Das nach Abschnitt 4.3 programmierte Simulationsprinzip wird durchlaufen und die je Simulationsschritt berechneten Ringkonturen werden zusammen mit allen für die spätere Animation erforderlichen Parametern in der Datenbank abgespeichert. Bei einer zeitlichen Auflösung von 150 ms beispielsweise ergeben sich dabei abhängig von der gewählten Vernetzung des Ringes, mehrere zehntausend Datensätze, die in wenigen Minuten berechnet werden.

### 5.1.5 Visualisierungsmodul

Bild 48 zeigt das Simulationsfenster als Kernstück des Visualisierungsmoduls. Der Ringwalzprozess wird dreidimensional dargestellt und kann basierend auf den zuvor berechneten Daten animiert werden. Dabei werden für jeden Zeitschritt sowohl die Ringkontur als auch die Positionen der einzelnen Elemente aus der Datenbank ausgelesen, in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert und an die eigen entwickelte OpenGL-Routine übergeben, die die 3D-Darstellung übernimmt.

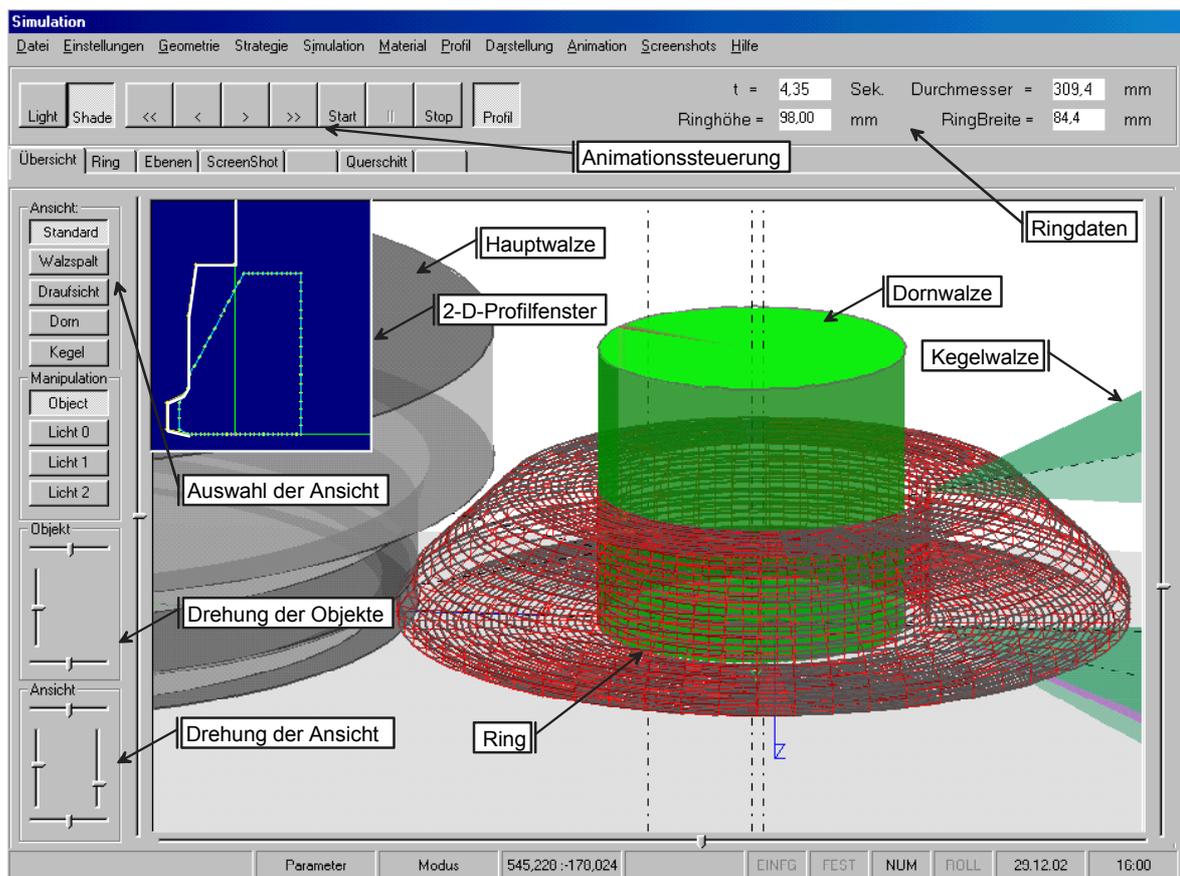
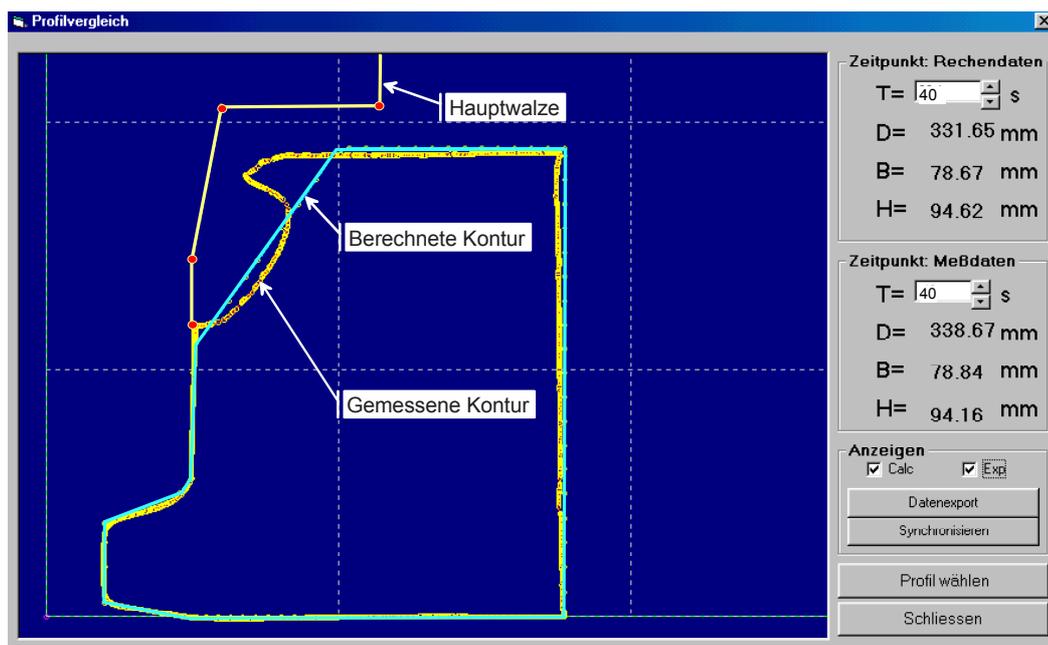


Bild 48: Simulationsfenster zur Visualisierung des Walzprozesses

Die Animation des Prozesses kann sowohl kontinuierlich als auch schrittweise erfolgen, so dass bei Bedarf neuralgische Punkte einer Simulation wiederholt durchlaufen werden können. Während einer laufenden Animation können Perspektive, Zoom und Objektpositionen verändert werden, um gezielt bestimmte Bereiche wie z. B. den Radialwalzspalt detailliert beobachten zu können. Zusätzlich kann ein 2D-Profilfenster zur ständigen Überwachung des Profillfüllungsverhaltens eingeblendet werden. Wesentliche Ringdaten wie Außendurchmesser, Breite und Höhe werden kontinuierlich angezeigt.

Um eine effektive Arbeitsweise für den Anwender zu erzielen, wurden mehrere Module zur Einstellung verschiedener Parameter entwickelt und integriert. So können beispielsweise Auflösung, Farben und Transparenz der einzelnen Elemente getrennt voneinander eingestellt werden. Über einfach zu bedienende Funktionen können automatisch Screenshots während einer Animation erzeugt oder Lichtquellen bewegt werden.



**Bild 49:** Profilvergleichsfenster zum Vergleich von berechneten und gemessenen Konturdaten

Weiterhin wurde ein Werkzeug entwickelt, mit dem berechnete und gemessene Konturen verglichen werden können. Im Profilvergleichsfenster (**Bild 49**) kann die in der Simulation berechnete Ringkontur in den dabei verwendeten Zeitinkrementen dargestellt werden. Dazu kann die aus realen Walzversuchen stammende und mit einer Koordinatenmessmaschine ermittelte Ringkontur zu definierten Zeitpunkten

aus einer Datenbank geladen werden. Durch Vergleich beider Kurven können Abweichungen der Simulation von der Realität detektiert werden. Die Entstehung des in Bild 49 erkennbaren Breitungseffekts in der gemessenen Kontur wird in Kapitel 6.3 näher erläutert.

### **5.1.6 Datenbankanbindung**

Die Datenhaltung aller vom Benutzer eingegebenen, aus einer Messmaschine oder einer Ringwalzanlage importierten und aller berechneten Daten erfolgt in einer Access Datenbank.

Die Konturpunkte aller Geometrieelemente, die Punkte der Walzstrategien sowie die berechneten Ringkonturpunkte und Kinematikdaten der verschiedenen Simulationen sind in einzelnen, miteinander verknüpften Tabellen abgelegt. Damit die Datenbank nicht zu umfangreich und der Datenzugriff dadurch zu langsam wird, ist ein Exportmodul geschaffen worden, das es ermöglicht, sowohl einzelne Geometrieelemente oder Walzstrategien als auch komplette Simulationsdatensätze auszulagern. Die Erfahrung hat gezeigt, dass ab einer Datenbankgröße von mehr als 100.000-200.000 Datensätzen die Zugriffsgeschwindigkeit merklich abnimmt und somit auch die Geschwindigkeit des Simulationsprogramms beeinträchtigt wird.

Weiterhin verfügt das Programm über mehrere Importfilter, um beispielsweise Profilkoordinaten aus einer Koordinatenmessmaschine oder Walzstrategien aus den Loggerdateien von Ringwalzmaschinen in die Datenbank zu importieren.

## 6 Werkstoffflusssimulation mit dem Simulationssystem RingRoSi

Um zuverlässige Berechnungen mit dem entwickelten Softwareprogramm durchführen zu können, ist es zunächst erforderlich, das System anhand von definierten, realen Walzprozessen abzugleichen und zu überprüfen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Walzversuche durchgeführt.

Ziel dieser Versuche war es, durch Vergleiche von berechneter und gemessener Ringgeometrie zu unterschiedlichen Zeitpunkten eines Walzprozesses die Güte der verwendeten Geschwindigkeitsansätze im Berechnungsansatz zu bestimmen. Bild 50 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise. Im Rahmen der Versuche wurden Walzprozesse mit identischen Prozessparametern gezielt in verschiedenen Phasen unterbrochen. Aus den abgekühlten Ringen wurden Segmente herausgetrennt und vermessen. Der Vergleich der Konturdaten mit den Ergebnissen der Simulation, die mit den von der Walzwerkssteuerung protokollierten Prozessdaten durchgeführt wird, liefert Aufschluss über die Qualität des Berechnungsansatzes.

Durchführung von Walzversuchen

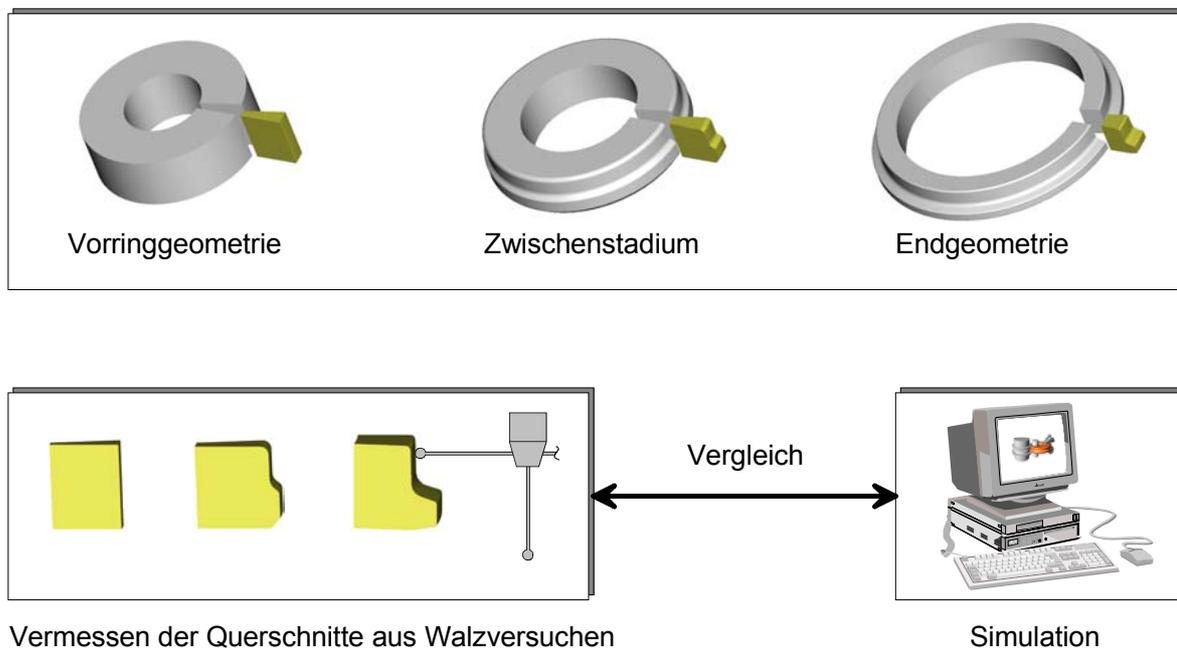


Bild 50: Vergleich von Simulation und realem Walzprozess

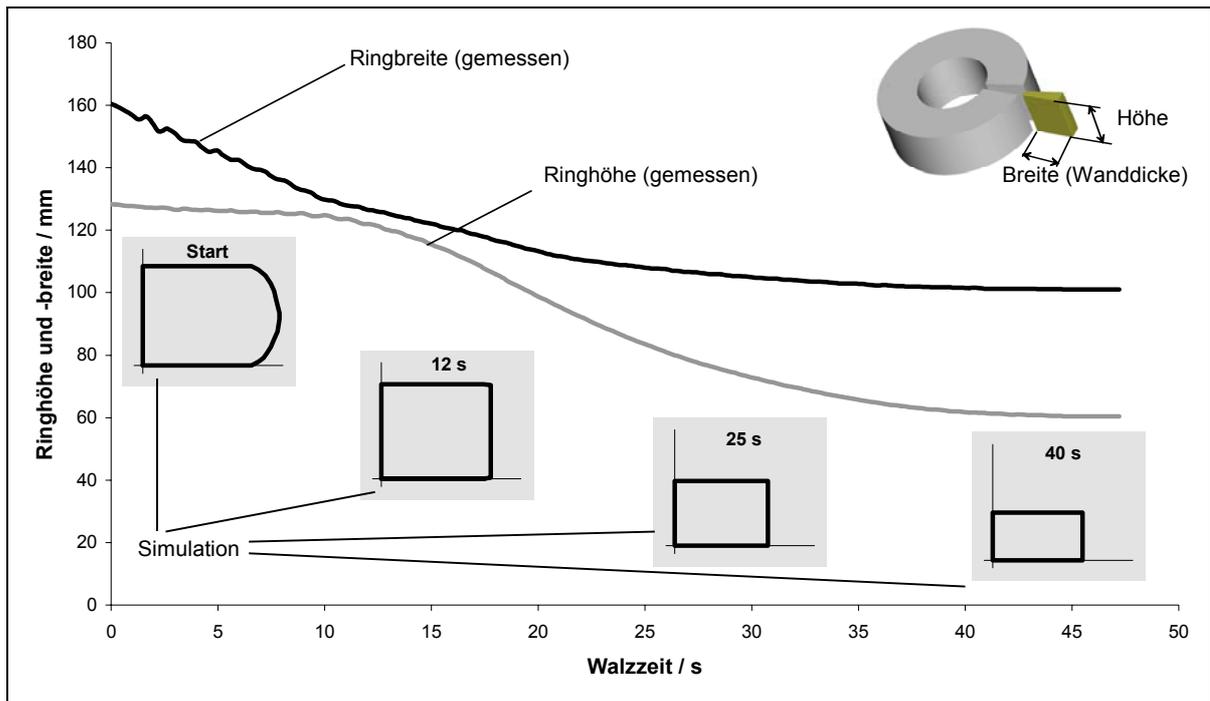
Da diese Versuchsmethodik vergleichsweise aufwendig und damit kostenintensiv ist, wurde das Versuchsprogramm auf die zur Überprüfung minimal erforderlichen

Geometrievarianten beschränkt. Als Werkstoff wurde die in der Ringwalzindustrie häufig verwendete Stahllegierung 42CrMo4 (1.7225) ausgewählt.

## 6.1 Ringe mit rechteckigem Querschnitt

Im ersten Schritt wurden Ringe mit rechteckigem Querschnitt gewalzt. Ziel hierbei war die Überprüfung der im Simulationsprogramm verwendeten Berechnungsmethodik. Beim konventionellen Walzen eines Ringes mit rechteckigem Querschnitt ist das System geometrisch vollständig bestimmt, solange Radial- und Axialwalzen kontinuierlich im Eingriff sind. Voraussetzung für diese Betrachtungsweise ist, dass keine Geometrieänderungen des Ringes in den Bereichen zwischen den beiden Walzspalten entstehen, d.h. dass die Ringquerschnittsgeometrie, die den Radialwalzspalt verlässt auch unverändert in den Axialwalzspalt einläuft. Aus den aktuellen Positionen der Walzen kann dann über die Bedingung der Volumenkonstanz jederzeit die aktuelle Ringgeometrie berechnet werden. Somit kann eine Simulationsrechnung durch Vergleich mit den gemessenen und in der Anlagensteuerung protokollierten Daten überprüft werden.

Die Versuche wurden bei der Firma Hoesch Rothe Erde in Dortmund auf einem industriellen Walzwerk neuerer Bauart durchgeführt. Als Walzvorformen wurden bombierte Ringe mit einem Lochdurchmesser von 160 mm, einem Außendurchmesser von ca. 480 mm und einem Stückgewicht von ca. 133 kg eingesetzt. Als Werkstoff wurde 42CrMo4 bei 1200°C verwandt. Der zu erzielende Fertigungsdurchmesser nach dem Abkühlen betrug ca. 1000 mm.



**Bild 51:** Gemessener Verlauf von Ringhöhe und –breite und Simulation des Ringquerschnittsprofils während eines Walzprozesses

**Bild 51** zeigt den Verlauf von Ringhöhe und –breite während des Walzens von Ringen mit rechteckigem Querschnitt. Bei den verwendeten Vorringen handelt es sich um bombierte Vorformen, die auf einer Lochpresse hergestellt und anschließend direkt aufgewalzt worden sind. Der in **Bild 51** dargestellte Verlauf von Ringhöhe und -breite gibt die von der Walzwerksteuerung während der Walzung gemessenen Verläufe wieder. Die dazugehörigen Positionen von Dorn- und Kegelwalzen wurden als Eingangsgrößen für eine Simulationsrechnung verwendet. Mit Hilfe der Simulation wurden das Querschnittsprofil und der Außendurchmesser in zeitlichen Abständen von 200 ms berechnet.

Das berechnete Querschnittsprofil ist an einigen ausgewählten Zeitpunkten in **Bild 51** mit dargestellt. Die bombierte Vorform des Ringes als geometrische Eingangsgröße wurde unter Verwendung des Geometrieditors des Simulationsprogramms modelliert. Um die tatsächlichen Verhältnisse möglichst exakt abzubilden, wurde eine Ringvorform der Lochpresse entnommen und in kaltem Zustand mit einer 3D Koordinatenmessmaschine vermessen. Unter Berücksichtigung eines für diesen Werkstoff geeigneten Ausdehnungsfaktors konnten die geometrischen Abmessungen für eine Temperatur von 1200 °C näherungsweise ermittelt werden.

In **Bild 51** ist zu erkennen, dass entsprechend der verwendeten Walzstrategie zunächst vorwiegend die Wanddicke des Ringes reduziert wurde, um die bombierte

Vorform in einen Ring mit rechteckigem Querschnitt zu überführen. Nach ca. 12 s Walzzeit ist dieses erreicht und im weiteren Verlauf erfolgt verstärkt die Verringerung der Ringhöhe bis der Walzprozess seine Endphase erreicht, in der in beiden Walzspalten keine Stichabnahmen mehr erfolgen. Die Ringumdrehungen am Ende des Walzprozesses werden auch als Rundierungsphase bezeichnet, in der lediglich Unrundheitseffekte beseitigt werden sollen.

Bild 52 zeigt den zugehörigen Verlauf des Ringaußendurchmessers in einer Gegenüberstellung von Simulation und Messung. Der simulierte und der gemessene Verlauf zeigen in weiten Bereichen gute Übereinstimmungen und führen zu einem Enddurchmesser von 1017 mm (simuliert) bzw. 1014 mm (gemessen).

Die messtechnische Erfassung des Ringdurchmessers auf der Ringwalzanlage erfolgte dabei mittels eines Lasermesssystems.

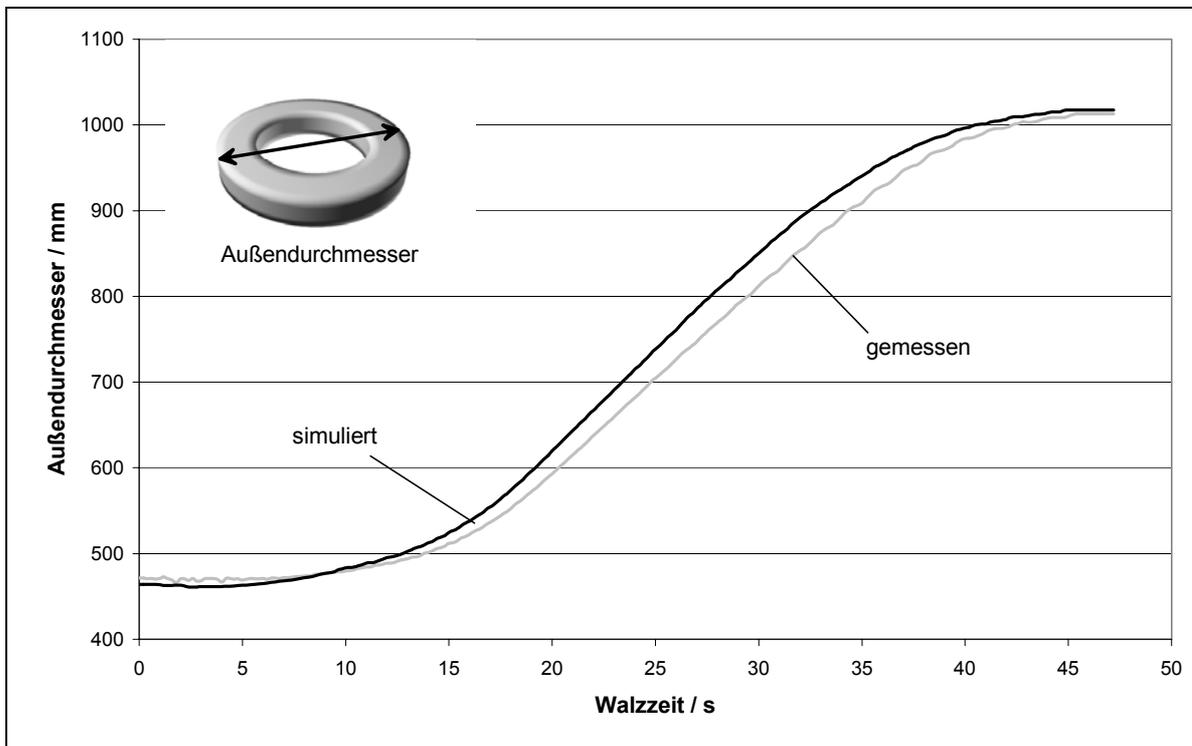


Bild 52: Verlauf des Ringaußendurchmessers, simuliert und gemessen

Der erkaltete fertige Ring besaß einen Außendurchmesser von 998 mm. Daraus ergibt sich ein Schrumpfmaß von 16 mm gegenüber dem im Walzprozess gemessenen Wert. Diese Schrumpfungseffekte müssen bei der Prozessplanung in Form von Aufmaßen berücksichtigt werden. Ein üblicher Weg dabei ist die Verwendung von sogenannten „Ausgleichsfaktoren“. Diese Ausdehnungsfaktoren ergeben sich

aus der Multiplikation des mittleren linearen Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha$  und der Temperaturdifferenz  $\Delta T$ . Die Wärmeausdehnungskoeffizienten sind für die gängigsten Werkstoffe in tabellierter Form verfügbar /94/. Bei dieser Vorgehensweise bleibt allerdings unberücksichtigt, dass der Wärmeausdehnungskoeffizient selbst eine meist nichtlineare Funktion der Temperatur ist, insbesondere bei unlegierten und niedriglegierten Stählen /95/.

Neben der Ermittlung der Schrumpfmaße werden die Ausdehnungsfaktoren auch für die Berechnung von Schrumpftoleranzen verwendet. Die Schrumpfmaßunsicherheit resultiert aus der ungenauen Kenntnis der mittleren Temperatur des Ringes bei Walzende. In der industriellen Praxis wird meist eine Abweichung von  $-100^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$  von der vor dem Prozess bestimmten Walzendtemperatur unter der Annahme eines linearen Wärmeausdehnungsverhalten zugrunde gelegt. *Schmickler* ermittelt so in /17/ für einen hülsenförmigen Ring aus dem Werkstoff 42CrMo4 mit einem Außendurchmesser von 2000 mm, einem Innendurchmesser von 1800 mm und einer Höhe von 400 mm exemplarisch das für die Schrumpfmaßunsicherheit zu berücksichtigende Aufmaß. Er geht dabei von einer vorausbestimmten Endtemperatur von  $950^{\circ}\text{C}$  aus, bestimmt die Ausdehnungsfaktoren für  $850^{\circ}\text{C}$  zu 0,011 und für  $980^{\circ}\text{C}$  zu 0,01402 und kommt so zu einem erforderlichen Aufmaß von 6,04 mm für den Außendurchmesser. Zusätzlich muss noch ein Aufmaß für die Fehler im Walzprozess berücksichtigt werden. Der Ringwalzmaschinenhersteller empfiehlt für diesen Ringtyp eine Walztoleranz von 4 mm, so dass sich insgesamt ein Aufmaß von mindestens 10 mm zur Berücksichtigung der Unsicherheiten von Walz- und Abkühlvorgang ergibt.

Überträgt man die Vorgehensweise zur Berechnung der Schrumpfmaße auf die Simulation, bei der mit einer konstanten Ringtemperatur während des Walzprozesses gerechnet wird, so ergibt sich folgendes Szenario. Geht man von einer gleichmäßigen Ringtemperatur von  $1200^{\circ}\text{C}$  bei Verlassen des Ofens, einer Walzanfangstemperatur von  $1150^{\circ}\text{C}$  und einer Walzendtemperatur von  $950^{\circ}\text{C}$  aus, so lässt sich für einen Ring mit 1000 mm Außendurchmesser unter den o.a. Bedingungen ein Schrumpfmaß von 4,6 mm für den Außendurchmesser zwischen Walzanfang und –ende errechnen.

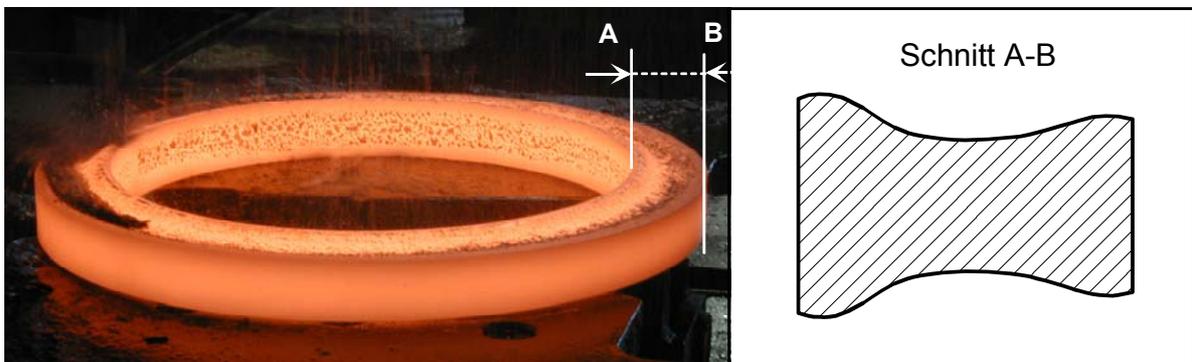
Aufgrund des Abkühlens des Ringes während des Walzens ergibt sich daher ein um 4,6 mm geringerer Durchmesser gegenüber einem Ring gleicher Geometrie mit einer Temperatur von  $1150^{\circ}\text{C}$ . Eine isotherme Simulationsrechnung müsste folglich einen um diesen Betrag größeren Durchmesser gegenüber dem im realen Prozess gemessenen Außendurchmesser liefern. Der Vergleich zwischen berechnetem

Enddurchmesser von 1017 mm und gemessenem von 1014 mm bestätigt diesen Sachverhalt tendenziell.

Gleichwohl müssten bei einer detaillierten Genauigkeitsbetrachtung auch noch weitere Einflussgrößen wie beispielsweise die korrekte Modellierung der Ringvorform, die Genauigkeit der Walzenpositionen und die Volumenänderungen durch Zunderverluste während des Walzprozesses berücksichtigt werden.

## 6.2 Ringe mit axialen Breitungseffekten

Gegenüber dem Walzen von Ringen mit rechteckigem Querschnitt ist das korrekte Abbilden von Breitungseffekten simulationstechnisch weitaus schwieriger zu lösen. Wird beispielsweise nur im Radialwalzspalt, also ohne Axialwalzvorgang, umgeformt, so kann das Material dort sowohl in Ringumfangsrichtung fließen und zu dem gewünschten Durchmesserwachstum beitragen, als auch durch Bewegung in axialer Richtung zu unerwünschten Breitungseffekten führen, der sog. Fischmaulbildung.



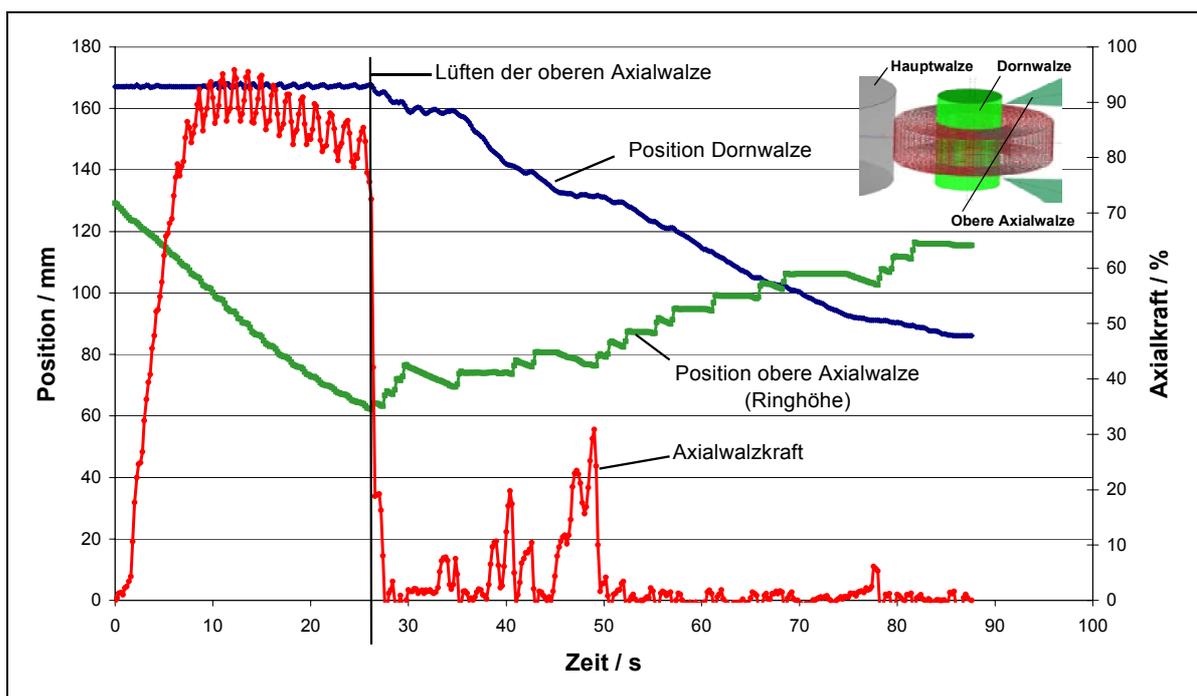
**Bild 53:** Ring mit Fischmauleffekt

Um diese Vorgänge berechnen zu können, muss das verwendete Simulationsmodell Zusammenhänge und Abhängigkeiten der Werkstoffbewegungen im Inneren des Rings dreidimensional abbilden können. Dieser Forderung wird durch die Kombination von Geschwindigkeitsfeldern mit der Verformung von kleinen Volumenelementen in dem hier vorgestellten Verfahren Rechnung getragen.

Um einen Vergleich des Werkstoffflusses in axialer Richtung zwischen Realität und Simulation durchzuführen, wurden Versuche mit Ringen mit rechteckigem Querschnitt durchgeführt, wobei dem Werkstoff bewusst die Möglichkeit gegeben wer-

den sollte, in axialer Richtung zu fließen. Im Idealfall dürfte dann nur im Radialwalzspalt umgeformt werden, während die Kegelwalzen vollständig auseinander gefahren sind. Technisch lässt sich diese Walzsituation allerdings nur bedingt realisieren, da die Kegelwalzen erforderlich sind, um den Ring bei aufkommenden vertikalen Taumelbewegungen zu stabilisieren. Daher wurde versucht, mit den Kegelwalzen axial nur beizuhalten und sie entsprechend des Höhenwachstums des Ringes manuell auseinander zu fahren.

Die Walzstrategie wurde so definiert, dass die Vorform zunächst nur im Axialwalzspalt umgeformt wurde, um die Ringhöhe zu reduzieren und einen scheibenförmigen Ring zu erzeugen. Scheibenförmige Ringe neigen eher zu der in der industriellen Praxis unerwünschten Form der axialen Breitung (Bild 53). Genau dieser axiale Werkstofffluss sollte für den Vergleich mit der Simulationsrechnung erzielt werden. Der scheibenförmige Ring wurde im weiteren Walzprozess im Radialwalzspalt zwischen Haupt- und Dornwalze umgeformt, während die Kegelwalzen nur noch zur Stabilisierung der Ringlage verwendet wurden.



**Bild 54:** Gemessener Verlauf der Positionen von Dornwalze und oberer Axialwalze sowie der Axialwalzkraft während des Walzprozesses

Bild 54 zeigt den Verlauf von Dorn- und Axialwalzenpositionen während des Prozesses. Es ist zu erkennen, dass nach ca. 27s Walzzeit das Reduzieren der Ringhöhe von 130 auf 62 mm beendet ist und dann aufgrund des nun einsetzenden

Dornvorschubs die Wandstärke des Ringes abnimmt. Zum Zeitpunkt des Anhebens (Lüftens) der oberen Kegelwalze fällt die Axialwalzkraft von zuvor ca. 90% der Maximalkraft schlagartig ab. Im weiteren Verlauf der Axialwalzkraft sind einzelne Spitzen zu erkennen. Zu diesen Zeitpunkten touchiert der Ring die Kegelwalzen leicht und die Position der oberen Walze wird anschließend durch manuellen Eingriff korrigiert.

Mit den in Bild 54 dargestellten Vorschubverläufen von Dorn- und oberer Axialwalze wurden nacheinander mehrere Ringe gewalzt und der Prozess zu unterschiedlichen Zeitpunkten bzw. bei Erreichen verschiedener Enddurchmesser abgebrochen. Die entstandenen Ringgeometrien sollen als Momentaufnahmen eines einzigen vollständig durchgeführten Walzprozesses interpretiert werden. Wichtig dafür ist es, jeweils eine identische Anwalzphase zu erzielen, in der der Ring scheibenförmig ausgewalzt wird.

Der Zeitpunkt des Lüftens der oberen Axialwalze sowie deren axiale Positionierung während des weiteren Prozessverlaufs mussten manuell durchgeführt werden, da der Automatikmodus der Maschinensteuerung für solche Walzbedingungen nicht ausgelegt ist. Hier müssen zwangsläufig Einschränkungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der einzelnen Prozessverläufe akzeptiert werden. Allerdings zeigt der Vergleich der in verschiedenen Walzprozessen mit identischer Walzstrategie hergestellten Ringprofile mit den Simulationsergebnissen gute Übereinstimmungen in den wesentlichen Geometriemerkmalen. Die Vermessung der Ringe liefert Aufschluss über den Werkstofffluss während des Prozesses und ermöglicht eine Beurteilung des verwendeten Simulationsverfahrens.

In Bild 55 und Bild 56 sind exemplarisch die gemessenen und berechneten Querschnittsprofile zu zwei unterschiedlichen Walzzeitpunkten dargestellt. Sowohl Realität und Simulation zeigen übereinstimmend eine höhere axiale Breitung an der Ringinnenseite. Die Abflachungen des Breitungssprofils an den Kanten des vermessenen Rings in beiden Bildern werden von den nicht vollständig vermeidbaren Berührungen des Ringes mit den Axialwalzen verursacht.

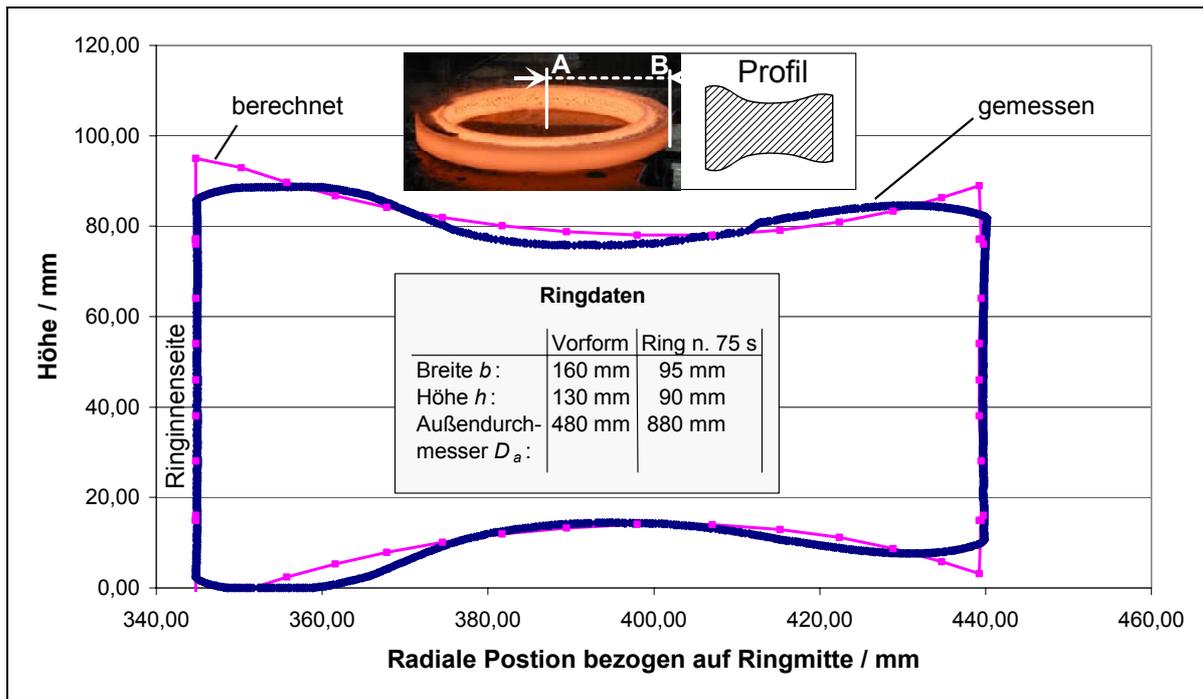


Bild 55: Ringquerschnittsprofil bei einem Ringaußenradius von 440 mm

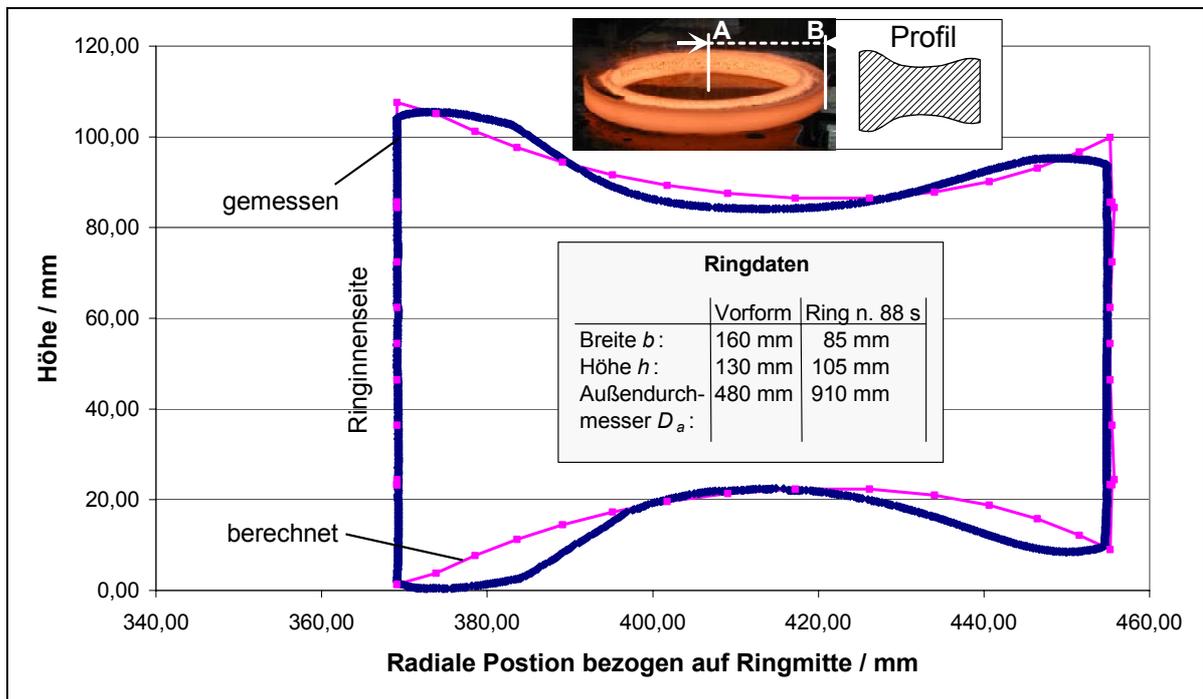
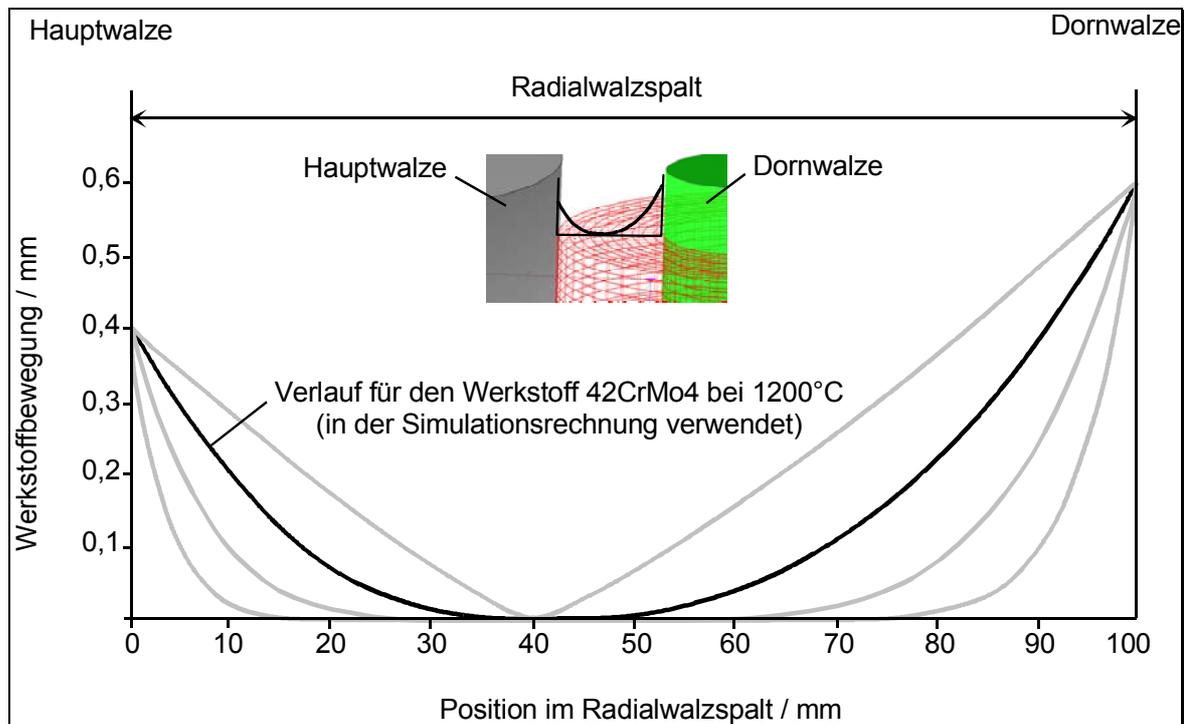


Bild 56: Ringquerschnittsprofil bei einem Ringaußenradius von 455 mm

Zu einem späteren Walzzeitpunkt in [Bild 56](#) ist die Breitung, der sog. Fischmauleffekt, schon deutlich stärker ausgeprägt. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Kontur

des vermessenen Ringes leicht von der ideal symmetrischen Form (bezogen auf eine Achse durch die halbe Ringhöhe) der Simulation abweicht. Diese Unsymmetrie kann damit zusammenhängen, dass der Ring während der Walzung auf dem Walztisch aufliegt und dadurch der Werkstofffluss in axialer Richtung an der Ringunterseite gebremst wird.



**Bild 57:** Radiale Werkstoffbewegung im Radialwalzspalt in Form von Exponentialfunktionen für einen Simulationsschritt

Die Simulationsrechnung wurde mit einem Exponentialfunktionsansatz für den radialen Einfluss der Stichabnahmen durchgeführt. [Bild 57](#) zeigt exemplarisch eine durch diesen Ansatz entstehende radiale Werkstoffbewegung im Radialwalzspalt. Die dargestellten Kurven ergeben sich bei einer Walzspaltbreite von 100 mm und einer Gesamtstichabnahme von 1 mm im betrachteten Simulationsschritt, die sich nach Kap. 4.1.2 in eine Stichabnahme von 0,6 mm an der Dornwalze und 0,4 mm an der Hauptwalze unter Berücksichtigung der aktuellen geometrischen Verhältnisse aufteilen lässt. In dem hier gezeigten Beispiel wird davon ausgegangen, dass der Ring in Kontakt mit beiden Walzen steht, so dass der Verlauf der Werkstoffbewegung durch die überlagerten Einflüsse von Haupt- und Dornwalze entsteht.

[Bild 57](#) stellt eine Momentaufnahme des Walzprozesses dar, da sich sowohl die geometrischen Randbedingungen als auch die Größe und die Aufteilung der Stich-

abnahmen zeitlich ändern. Der Funktionsverlauf wird daher für jeden Simulationsschritt neu berechnet.

Es ist zu erkennen, dass in der Simulation die Größe der radialen Materialbewegung in Richtung Ringmitte abnimmt und es im Bereich von 35 –50 mm (von der Hauptwalze aus gemessen) zu einer Zone ohne radialen Werkstofffluss kommt. Die Lage und die Breite dieser Zone hängt von den geometrischen Randbedingungen ab und verändert sich innerhalb des Walzprozesses.

Die radiale Werkstoffbewegung hat wesentlichen Einfluss auf die Verformung der in der Simulation verwendeten ideellen Volumenelemente und damit auch über die Bedingung der Volumenkonstanz auf die Art der axialen Breitung. Mit dem Exponentialansatz konnte eine gute Übereinstimmung mit den Versuchswalzungen erzielt werden. Daher wurden die im Folgenden dargestellten Berechnungen profilierter Ringe auch mit diesem Ansatz durchgeführt.

### 6.3 Ringe mit profiliertem Querschnitt

Das fehlerfreie Walzen von Ringen mit profiliertem Querschnitt stellt in der Praxis höchste Anforderungen an die geometrische Abstimmung zwischen Vorform und Fertigung in Verbindung mit der Auswahl einer geeigneten Walzstrategie. Auch walzwerkspezifische Kenngrößen wie z.B. die maximal verfügbaren Walzkräfte und die Möglichkeit einer Ringverlagerung während des Walzprozesses aus der Mittelachse spielen hierbei eine Rolle.

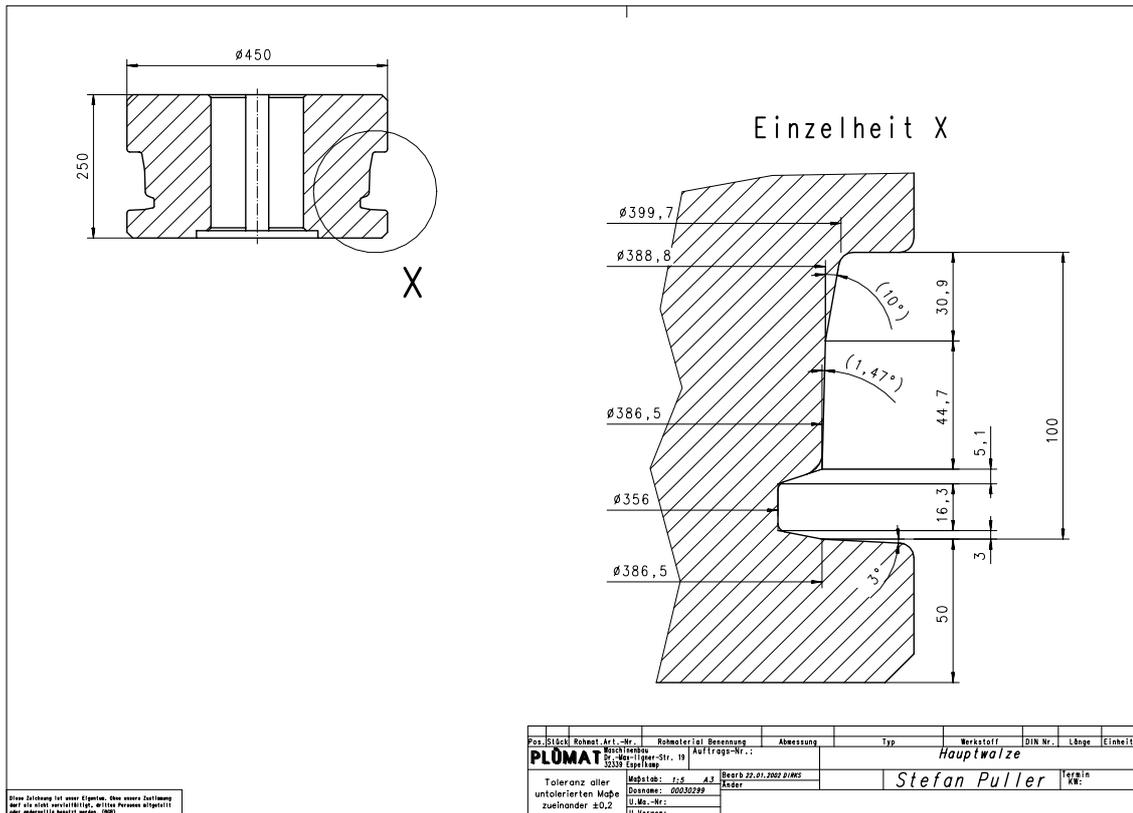
Aus simulationstechnischer Sicht ergibt sich bei profilierten Ringen im Radialwalzspalt ein komplexes System mit 3 Freiheitsgraden für die Richtungen des Werkstoffflusses.

Der Materialfluss kann

- in Umfangsrichtung zur Vergrößerung des Ringdurchmessers,
- in radialer Richtung zur Profilfüllung und
- in axialer Richtung zu Breitungseffekten führen.

Aufgabe eines Simulationsverfahrens ist es, diese 3 Anteile des Werkstoffflusses für jeden Simulationsschritt in Abhängigkeit der aktuellen kinematischen und geometrischen Verhältnisse richtig zu bestimmen. Mit dem hier vorgestellten Verfahren gelingt dies, wenn zuvor die Parameter der Geschwindigkeitsansätze richtig bestimmt und durch praktische Walzversuche mit definierten Randbedingungen verifiziert worden sind. Der Abgleich der verwendeten Berechnungsansätze ist erforderlich, um das System auf den verwendeten Werkstoff und die Umformtemperatur abzustimmen. Er wurde für den Werkstoff 42CrMo4 bei 1200°C anhand der in Kapitel 6.1 und 6.2 beschriebenen Versuche bereits durchgeführt.

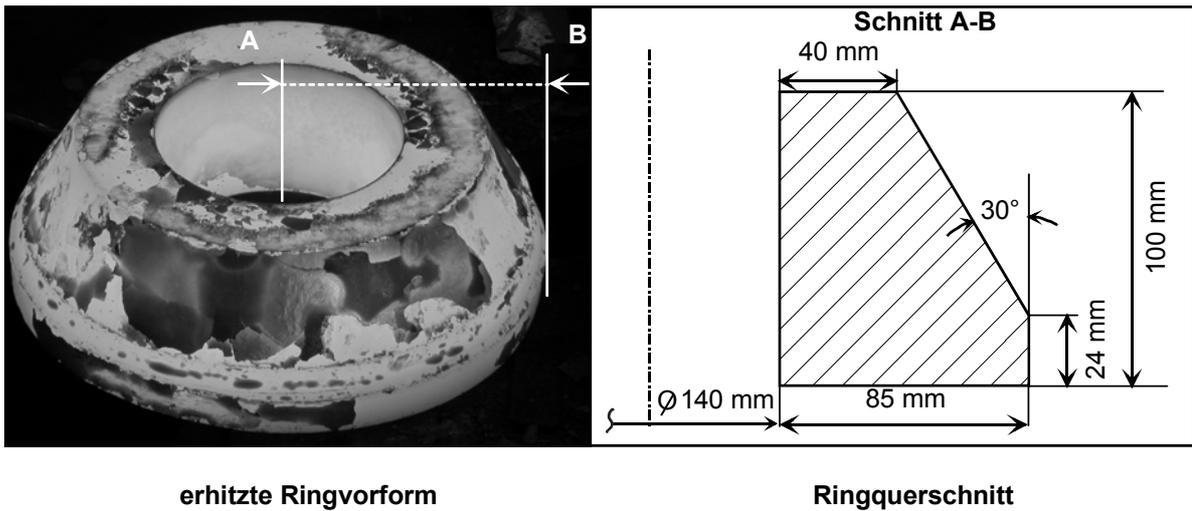
Im nächsten Schritt sind zur Überprüfung des so entstandenen Simulationssystems Walzversuche mit außenprofilierten Ringen durchgeführt worden. [Bild 58](#) zeigt die Geometrie der dabei eingesetzten profilierten Hauptwalze. Es handelt sich bei der zu walzenden Geometrie um ein Radprofil eines Schienenfahrzeuges. Das Profil wurde in Absprache mit Unternehmen aus der Ringwalztechnologie entworfen, um praxisnahe Versuchsbedingungen zu erhalten.



**Bild 58:** Geometrie der Hauptwalze

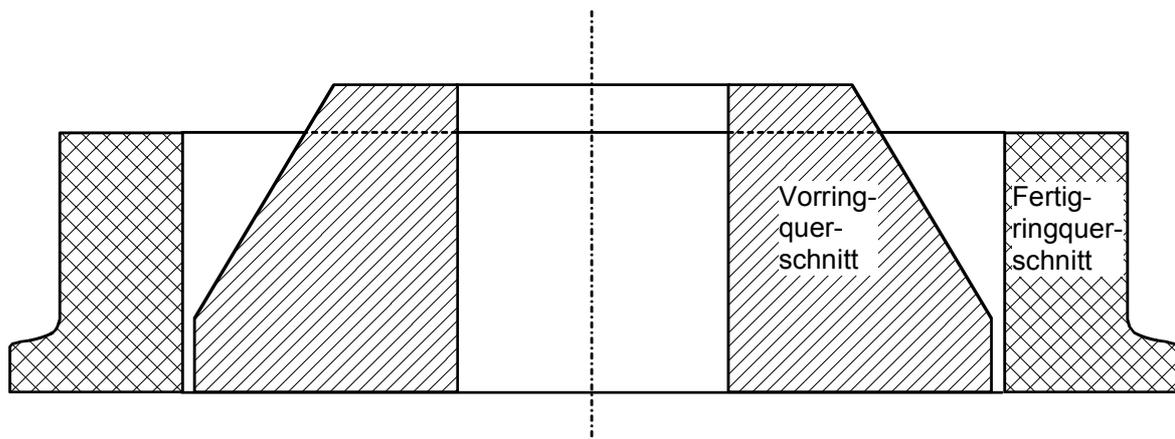
Die Walzversuche mit profilierten Ringen wurden auf einem Radial-Axial-Ringwalzwerk am Lehrstuhl für Produktionssysteme der Ruhr-Universität Bochum durchgeführt. Mit diesem für industrielle Verhältnisse vergleichsweise kleinen Walzwerk der Fa. Wagner Banning können Walzkräfte von bis zu 20t radial und 16t axial aufgebracht werden. Vor dem Hintergrund der begrenzt zur Verfügung stehenden radialen Walzkraft ist für die zu walzende Geometrie aus der Legierung 42CrMo4 eine optimierte Vorform erforderlich, um eine vollständige Profillfüllung zu erzielen.

**Bild 59** zeigt die gewählte Vorformgeometrie, die durch zerspanende Nachbearbeitung aus einer bombierten Vorform hergestellt wurde. Die Vorformen einer Serie wurden zusammen direkt vor dem Walzprozess in einem Ofen auf 1200 °C erhitzt.



**Bild 59:** Geometrie der Vorform

Es wurde mit einer über den Walzprozess gleichmäßigen Wandstärken- und Höhenreduktion gewalzt. **Bild 60** zeigt Vorring und Fertigung in einer Schnittdarstellung.



**Bild 60:** Vergleich von Vor- und Fertigung bei der Versuchsdurchführung

Um einen Vergleich zwischen Simulation und Walzprozess durchführen zu können, wurden mehrere Ringe direkt hintereinander mit identischen Walzparametern gewalzt, wobei der Walzprozess an unterschiedlichen Zeitpunkten gestoppt wurde. **Bild 61** zeigt die dabei entstandenen Ringgeometrien.

Aus den gewalzten Ringen wurde je ein Segment herausgetrennt und die Kontur auf einer 3D-Koordinatenmessmaschine gemessen. Dabei wurden jeweils 3 geschlossene Kurvenzüge (**Bild 62**) mit dem kugelförmigen Tastkopf abgefahren und anschließend gemittelt. So wurden je Ringkontur ca. 1200 Messpunkte erzeugt.

Diese gemessenen Konturen können mit den in der Simulation berechneten zu den jeweiligen Zeitpunkten verglichen werden.



Bild 61: Ringgeometrie zu verschiedenen Zeitpunkten des Walzprozesses

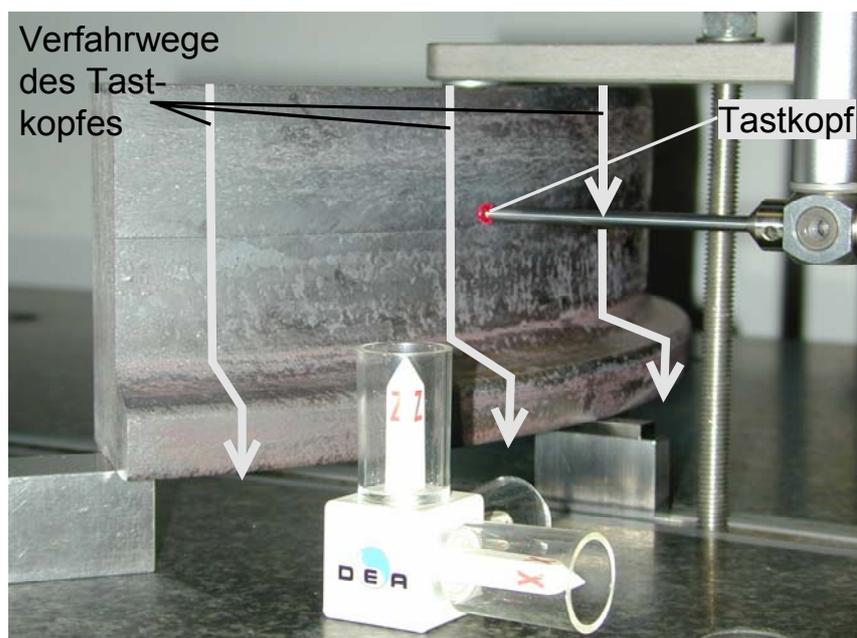


Bild 62: Abtasten der Ringkontur auf der 3D-Koordinatenmessmaschine

Damit eine Simulationsrechnung zum Vergleich mit der praktischen Versuchswalzung durchgeführt werden kann, müssen zunächst aus den während einer Walzung in der Walzwerkssteuerung protokollierten Daten die Zeit-Weg-Verläufe für Dorn- und Axialwalzen extrahiert und in das Softwarepaket als Walzstrategie importiert werden. Weiterhin sind die geometrischen Verhältnisse von Walzwerk und Vorringgeometrie zu modellieren.

Nach erfolgter Berechnung und Speicherung der Simulationsdaten in der Datenbank können die Daten der Koordinatenmessmaschine als Ringquerschnittsprofile zu diskreten Zeitpunkten in das Programm eingelesen und im Profilvergleichsfenster nach Bild 49 direkt mit den Simulationsdaten verglichen werden. Die zeitliche Auflösung der berechneten Daten wird dabei durch die Taktfrequenz der Walzdtenaufzeichnung in der Maschine bestimmt. Üblich sind hierbei Schrittweiten zwischen 50 und 500 ms.

	30s	40s	50s	fertig
<b><u>Vorringdaten</u></b>				
Werkstoff	42CrMo4	42CrMo4	42CrMo4	42CrMo4
Temperatur / °C	1200	1200	1200	1200
Gewicht / kg	35,15	35,9	34,15	37,75
Soll-Breite / mm	85	85	85	85
Außen-Ø / mm	309/310	308/310	305/309	304/308
Innen-Ø / mm	140	140	140	140
Höhe / mm	98/99	102	93/94	96
<b><u>Walzparameter</u></b>				
Walzkurve	Linear	Linear	Linear	Linear
Drehzahl Hauptwalze / m/s	60%=1,5	60%=1,5	60%=1,5	60%=1,5
<b><u>Fertigringdaten</u></b>				
Außen-Ø / mm	327	338	395	428
Höhe / mm	98	94	88	87
Breite m. Profil/mm	86	79	64	57

Tabelle 1: Daten der Versuchswalzungen

Die Bilder 63-66 zeigen den Vergleich der gemessenen und simulierten Ringkonturen zu verschiedenen Zeitpunkten. Grundsätzlich ist bei allen Vergleichen zu berücksichtigen, dass es aufgrund der in Tabelle 1 erkennbaren Schwankungen in den Abmessungen und im Gewicht der Vorringe auch zu geringfügigen Abwei-

chungen im Verlauf der Walzprozessparameter während der einzelnen Walzungen kommen kann.

Bild 63 zeigt den Vergleich der gut übereinstimmenden Konturen nach 30s Walzzeit. An der oberen hauptwalzenseitigen Ecke der realen Ringkontur zeichnet sich ein Breitungseffekt ab, der im weiteren Walzverlauf noch ausgeprägter zu beobachten war. Ursache hierfür ist die ständige Materialabwalzung im Axialwalzspalt und die Tatsache, dass der Ring im Bereich seiner Außenschräge noch nicht an der Hauptwalze anliegt. In der Simulation kann aufgrund der vereinfachten Betrachtungsweise des Axialwalzspaltes ein solcher Breitungseffekt nicht abgebildet werden, da im Axialwalzspalt das abgewalzte Volumen vollständig dem Durchmesserwachstum zugeschrieben wird.

Nach 40s Walzzeit ist das Profil sowohl in der Simulation als auch in der Realität bereits vollständig gefüllt (Bild 64). Der im Axialwalzspalt verursachte Breitungseffekt ist hier schon deutlich ausgeprägter zu erkennen. Die Abweichung im Bereich der Profilschräge ist auf die unterschiedliche Geometrie der verwendeten Vorringe zurückzuführen. Hier gab es Differenzen in der Ringhöhe von bis zu 6 mm und Gewichtsschwankungen von  $\pm 2-3\%$ .

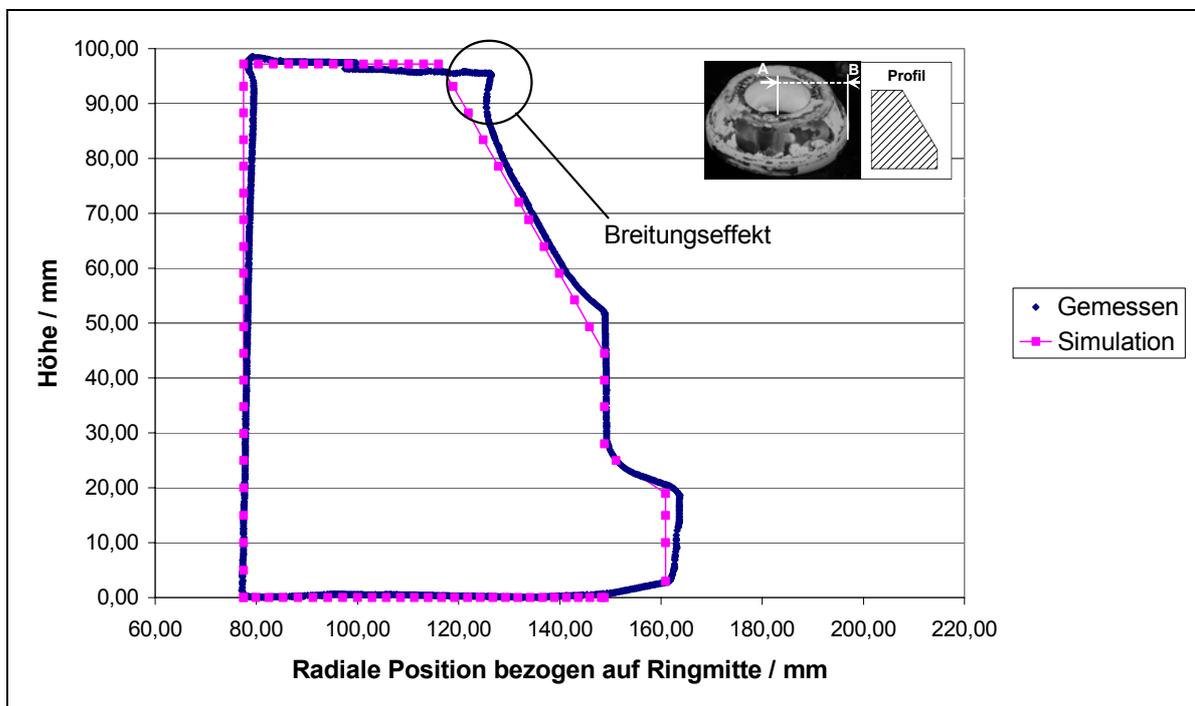


Bild 63: Ringquerschnitt nach 30s Walzzeit

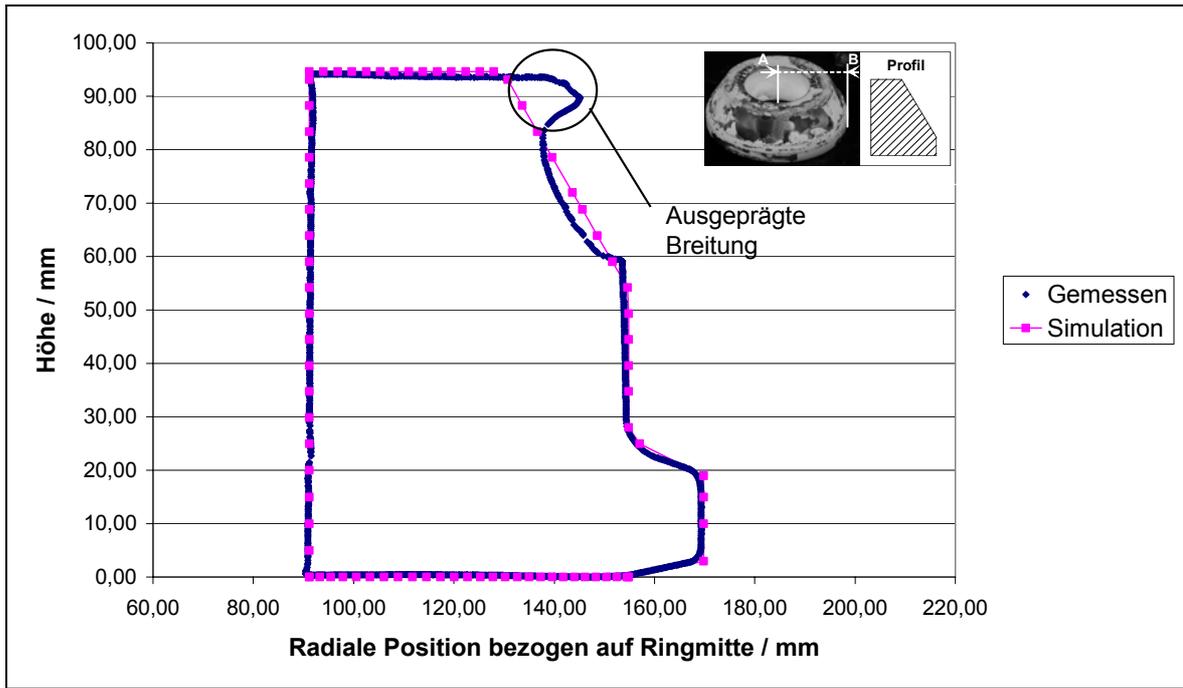


Bild 64: Ringquerschnitt nach 40s Walzzeit

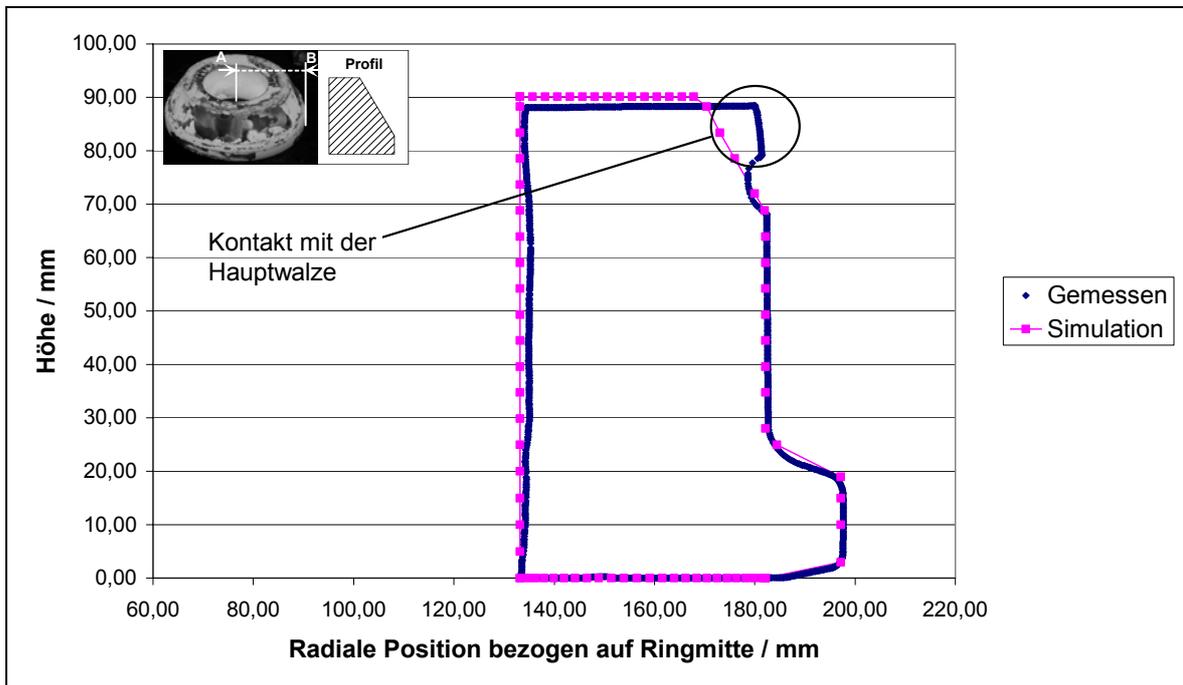
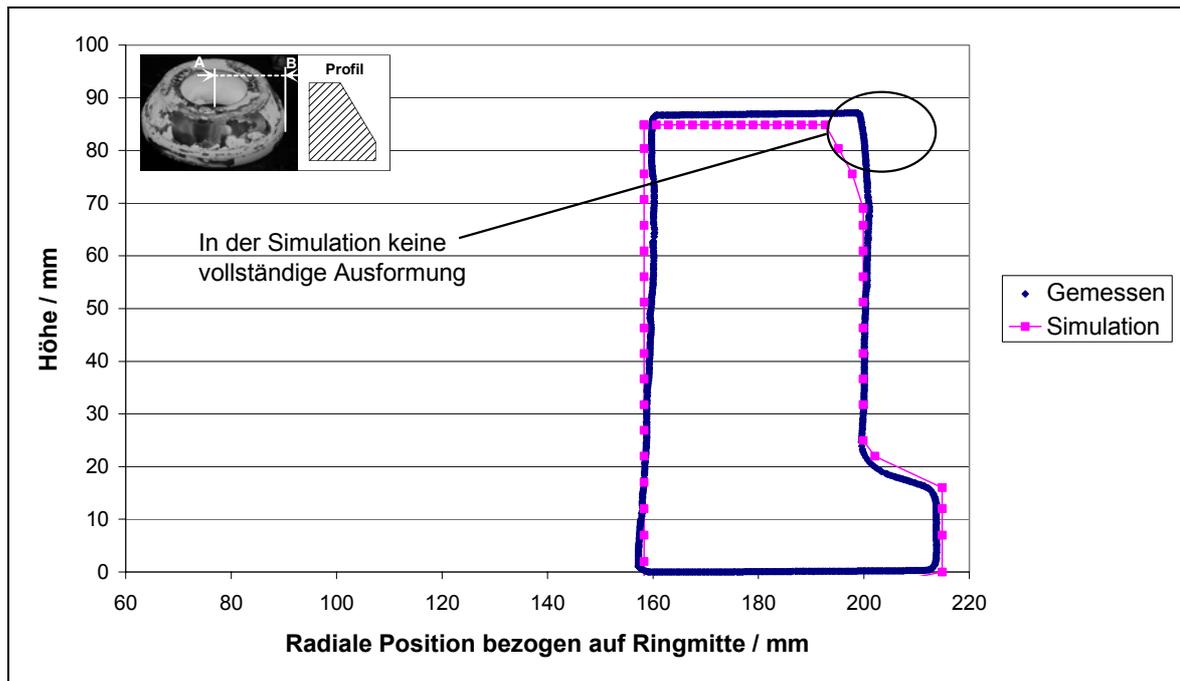


Bild 65: Ringquerschnitt nach 50s Walzzeit



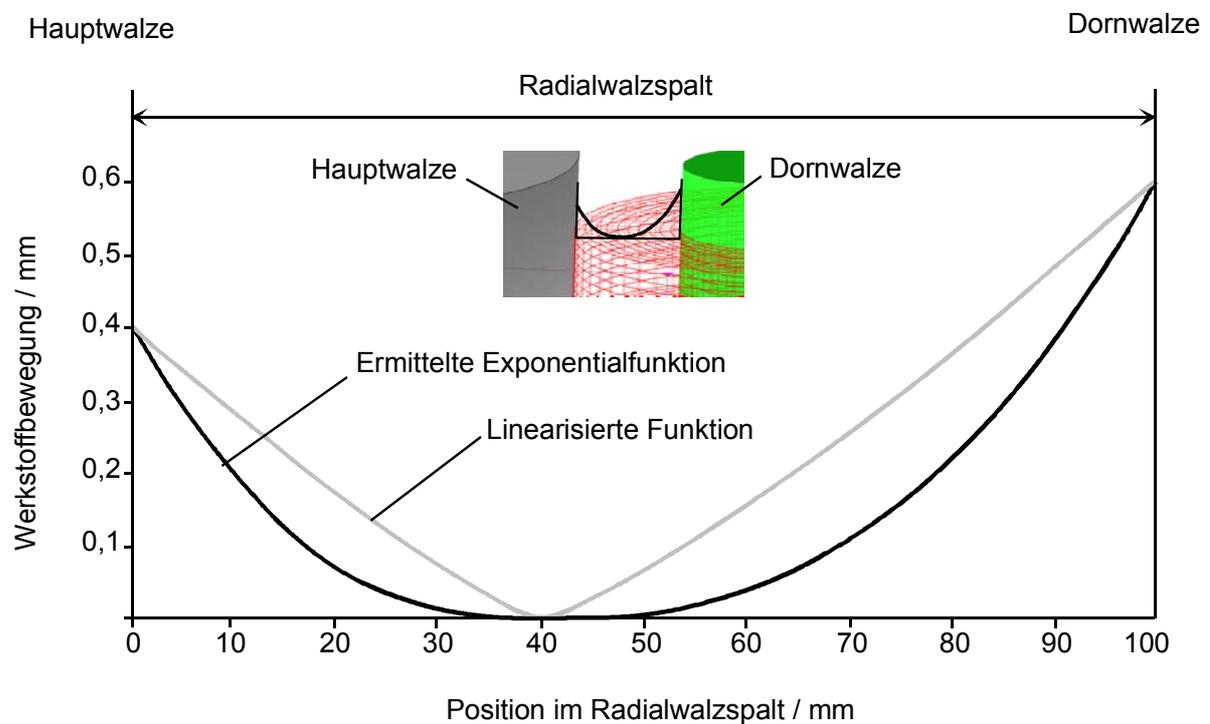
**Bild 66:** Ringquerschnitt nach 65s Walzzeit (Walzende)

In [Bild 65](#) sind die Ringkonturen nach 50s Walzzeit dargestellt. Hier hat das Material der ungewollten Breitung bereits Kontakt mit der Hauptwalze und wird dadurch wieder verwalzt. In der Simulation bleibt nach wie vor noch die Anfangsschräge erhalten. Nach ca. 65s ist der Ring fertiggewalzt. In [Bild 66](#) ist zu erkennen, dass der reale Ring an seiner Außenseite vollständig an der Hauptwalze anliegt (die Hauptwalze besitzt nach [Bild 58](#) im oberen Profilbereich eine Schräge von  $10^\circ$ ), während der berechnete Ring aufgrund der vereinfachten Axialwalzspaltmodellierung nicht vollständig ausgeformt worden ist.

An diesem Beispiel lässt sich sehr gut die Wirkungsweise des verwendeten Ansatzes in radialer Richtung nach [Bild 57](#) ablesen. Im oberen Bereich der Außenschräge des Ringes bewirkt nur die dornseitige Stichabnahme eine Materialverdrängung in radialer Richtung, da der Ring hier nicht an der Hauptwalze anliegt. Würde man nun simulationstechnisch die Außenseite des Ringes um den während des Walzprozesses durchgeführten gesamten Dornvorschub von ca. 45 mm in Richtung der Hauptwalze bewegen, so müsste am Ende des Walzprozesses der Ring allein aufgrund der geometrischen Verhältnisse vollständig an der Hauptwalze anliegen. In der Realität liegt der Ring aber nur vollständig an der Hauptwalze an, weil durch den Vorschub der Kegelwalzen im Axialwalzspalt Material im Bereich der Schräge aufgefüllt wird (Breitung in radialer Richtung), wie aus den [Bildern 63-66](#) ersichtlich ist. Würde man eine Walzung durchführen, bei der die Kegelwalzen nur axial bei-

gehalten werden und somit keine Höhenreduzierung des Ringes durchgeführt wird, so würde bei ansonsten gleich gehaltenen Parametern auch in der Realität der Ring am Ende des Walzprozesses an der Hauptwalze nicht vollständig anliegen.

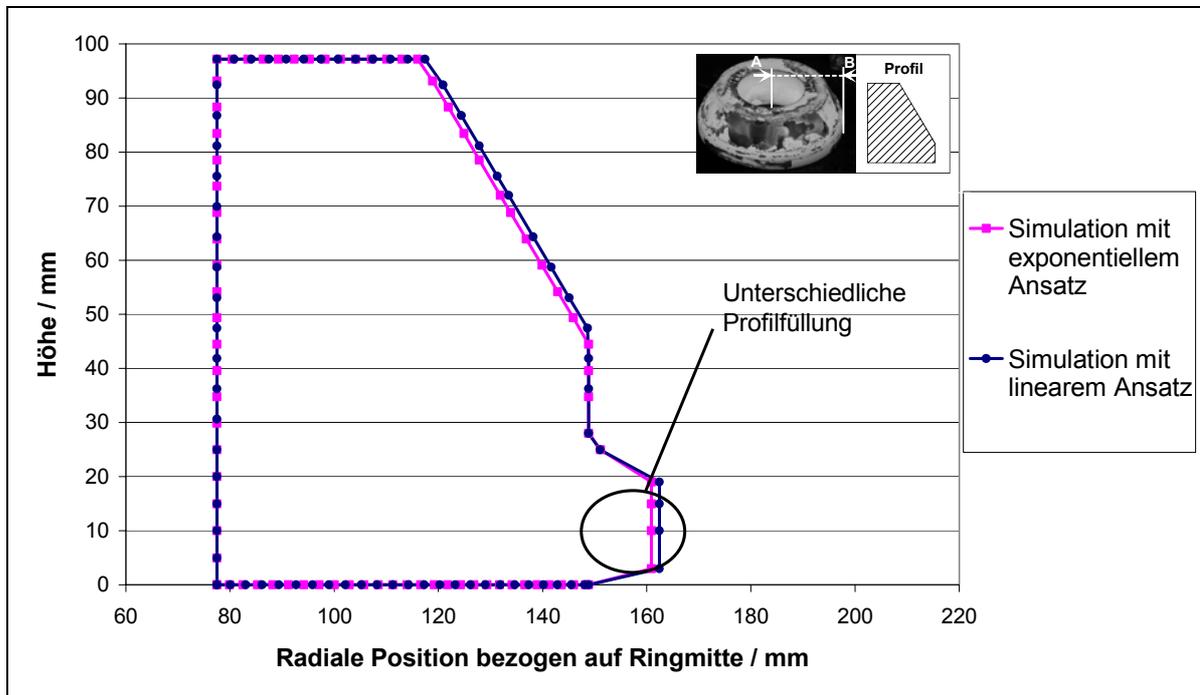
Für die Simulation bedeutet dies, dass mit dem in [Bild 57](#) dargestellten Exponentialansatz auch die Verhältnisse beim Walzen von profilierten Ringen gut abgebildet werden können. Führt man zum Vergleich eine Rechnung mit einem nahezu linear abfallendem Einfluss der Stichabnahmen nach [Bild 67](#) durch, so erhält man einen veränderten Werkstofffluss in radialer Richtung und dem zufolge auch ein anderes Profulfüllungsverhalten.



**Bild 67:** Vergleich des Werkstoffflusses in radialer Richtung bei nahezu linear und bei exponentiell abfallendem Einfluss der Stichabnahmen zu einem Zeitpunkt

Aufgrund des linearen Ansatzes reicht der Einfluss der Stichabnahme an der Dornwalze weiter in den Ring hinein und es findet eine größere Durchformung statt. Für Bereiche ohne Hauptwalzenkontakt, also die Bereiche des Profils und der Außenschräge, bedeutet dies, dass das Material je Zeiteinheit stärker in Richtung der Hauptwalze bewegt wird. In den [Bildern 68-71](#) sind die Konturen der Ringquerschnitte von jeweils zwei Simulationsrechnungen mit unterschiedlichen Ansätzen in

radialer Richtung einander gegenübergestellt. Ziel hierbei ist es, zu zeigen, dass der exponentielle Ansatz besser geeignet ist, die Praxis abzubilden.



**Bild 68:** Ringquerschnittsvergleich zweier Simulationen nach 30s Walzzeit

In **Bild 68** kann bereits nach 30s Walzzeit ein Unterschied in der Profilfüllung festgestellt werden. Das mit dem linearen Ansatz ermittelte Profil ist erkennbar ausgeprägter. Auch im Bereich der Außenschräge wurde das Material stärker in Richtung der Hauptwalze bewegt. Nach 40s kann dieser Effekt deutlicher beobachtet werden (**Bild 69**). Die entstandenen Differenzen im radialen Werkstofffluss werden durch den unterschiedlich starken Dornwalzeneinfluss in den Rechenmodellen verursacht.

Nach 50 s Walzzeit liegt bei der Simulation mit linearem Ansatz das Material im Bereich der Außenschräge bereits fast vollständig an der Hauptwalze an (**Bild 70**). Demgegenüber liefert der Exponentialansatz für die Außenschräge ein mit den Walzversuchen besser übereinstimmendes Bild, wenn man die vermessene Ringkontur um die im Axialwalzspalt entstehende Bereitung korrigiert.

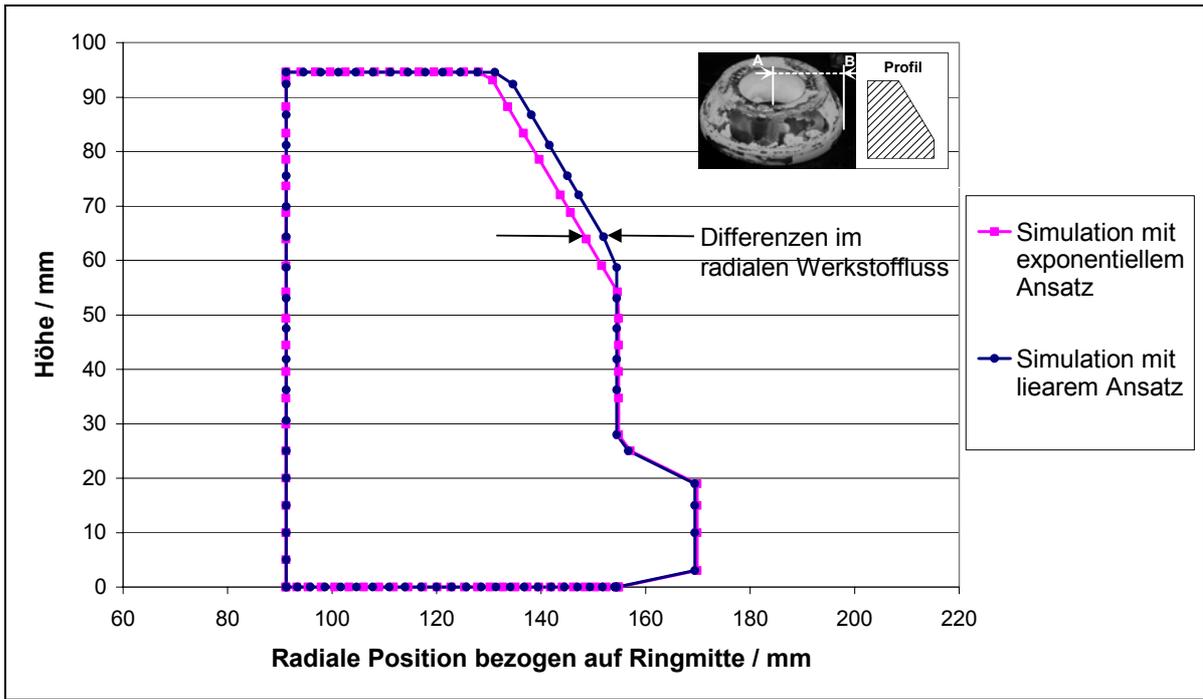


Bild 69: Ringquerschnittsvergleich zweier Simulationen nach 40s Walzeit

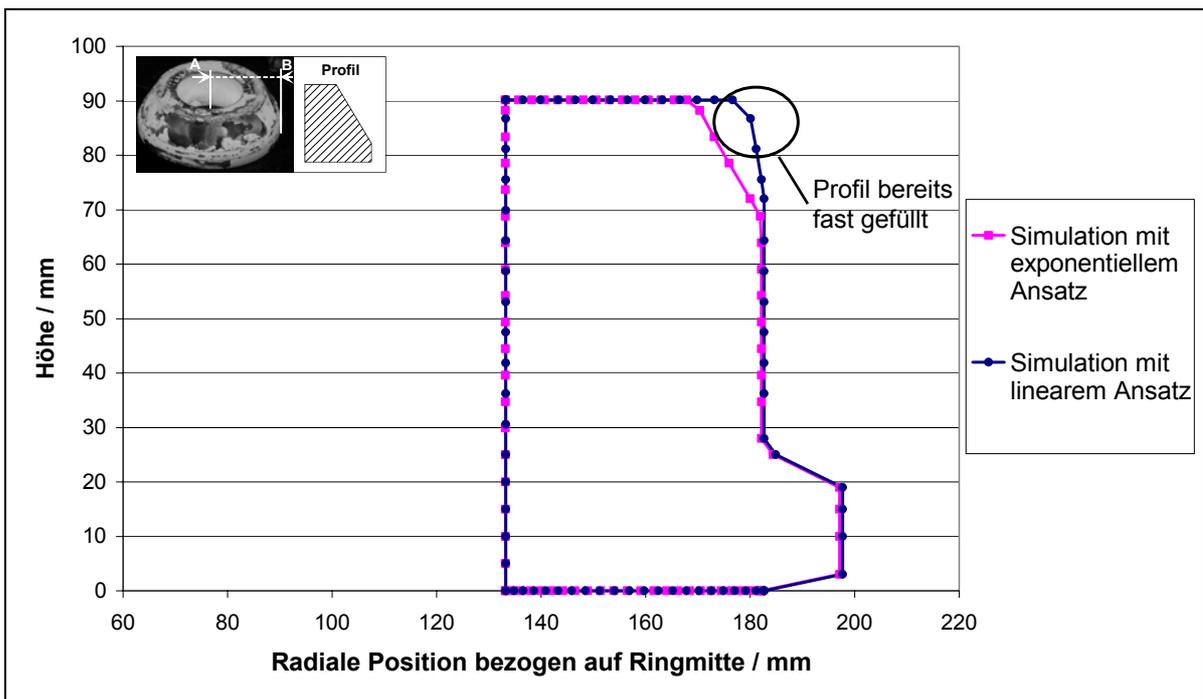
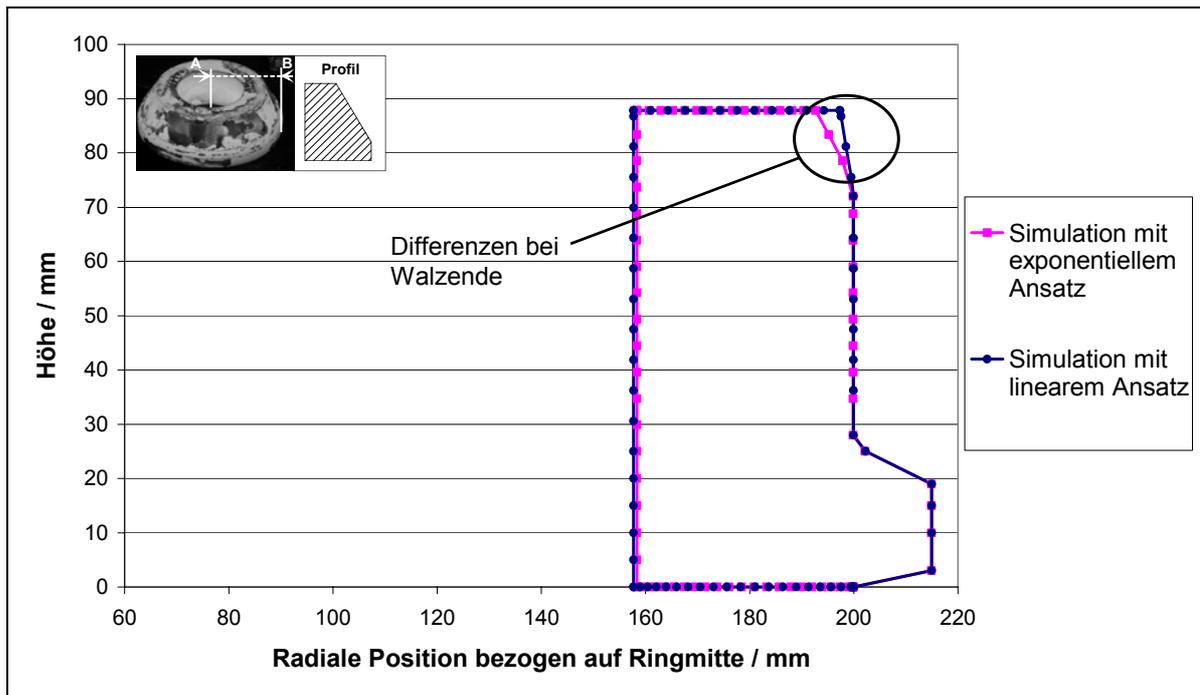


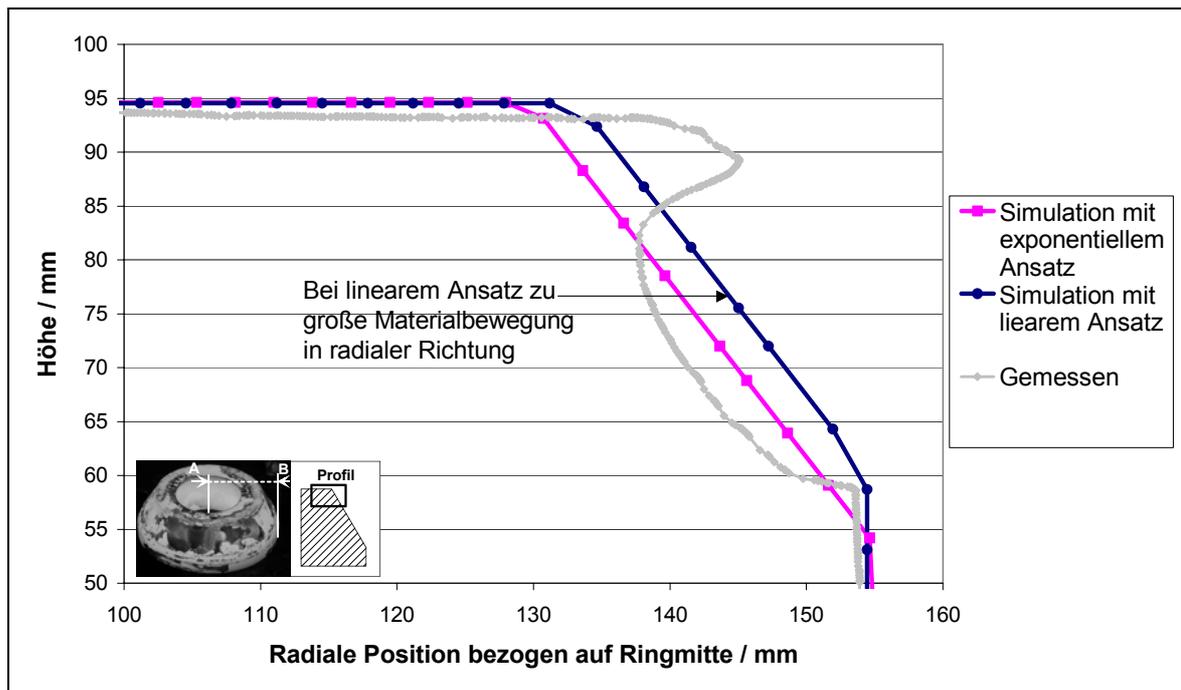
Bild 70: Ringquerschnittsvergleich zweier Simulationen nach 50s Walzeit



**Bild 71:** Ringquerschnittsvergleich zweier Simulationen nach 65s Walzzeit

In [Bild 71](#) wird der bleibende Unterschied in der Ringkontur bei Walzende gut sichtbar. Die Rechnung mit linearem Ansatz ergibt eine vollständig ausgeformte Ringkontur, da die Materialbewegung in radialer Richtung während des gesamten Walzprozesses stärker ausgeprägt ist als bei der Simulation mit Exponentialansatz.

Die Auswertung der Zwischenstufen von Walzversuch und Simulation zeigt jedoch, dass ein über den Walzspalt exponentielles Abklingen des Einflusses der dornwalzenseitigen Stichabnahme besser geeignet ist, die Realität abzubilden. Insbesondere der Vergleich der Lage der Außenschräge in [Bild 72](#) stützt diese Aussage. Hier ist zu erkennen, dass bei der Simulation mit exponentiellem Ansatz die Lage der Außenschräge gut mit der gemessenen Ringkontur des gewalzten Ringes übereinstimmt. Die Rechnung mit linearem Ansatz zeigt eine größere Abweichung, verursacht durch eine zu starke Materialbewegung in radialer Richtung.



**Bild 72:** Vergleich der Außenschrägen bei unterschiedlichen Geschwindigkeitsansätzen nach 40 s Walzzeit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass es mit dem entwickelten Berechnungsmodell gut gelungen ist, auch diesen aufgrund des dreidimensionalen Stoffflusses im Bereich des Profils und der Außenschräge walztechnisch komplexesten Fall in der Simulation abzubilden. Es konnte gezeigt werden, dass ein exponentieller Ansatz für den Einfluss der Stichabnahme über den Radialwalzspalt besser geeignet ist, die realen Verhältnisse abzubilden, als ein linearer Ansatz.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Simulationswerkzeug entwickelt, mit dem der Werkstofffluss beim Walzen von Ringen mit rechteckigem und auch profiliertem Querschnitt in kurzer Zeit berechnet werden kann. Zusammen mit der Vorform des Ringes werden die Vorschubverläufe von Dorn- und oberer Axialwalze sowie die Drehzahl der Hauptwalze als Eingangsgrößen für das Simulationsverfahren verwendet. Das Programm liefert als Ergebnis die Geometrie des Ringes zu jedem Zeitpunkt des Walzprozesses. Ein Abgleich mit praktischen Walzversuchen ist erforderlich, um das System auf den verwendeten Werkstoff und die Umformtemperatur abzustimmen. Anschließend können mit dem Simulationsprogramm Variantenrechnungen für verschiedene Kombinationen von Ringvorform und Walzstrategie durchgeführt werden. So kann bereits vor einer kostenintensiven Probewalzung überprüft werden, ob die gewählte Kombination zum gewünschten Walzergebnis führt.

Ausgehend von einer Analyse bestehender Ansätze wurde ein Simulationsprinzip erarbeitet und umgesetzt, das auf den elementaren Methoden der Plastizitätstheorie basiert. Insbesondere der Radialwalzspalt wurde detailliert modelliert, während die Materialbewegung im Axialwalzspalt noch zweidimensional betrachtet wurde. Zur Ermittlung des Werkstoffflusses im Radialwalzspalt wurden in radialer und in Umfangsrichtung geeignete Geschwindigkeitsansätze in Abhängigkeit von den geometrischen Verhältnissen bestimmt. Der Vergleich mit Walzversuchen hat gezeigt, dass insbesondere Exponentialansätze in radialer Richtung gute Übereinstimmungen mit der Realität liefern. Die Bedingung der Volumenkonstanz wurde verwendet, um mit Hilfe eines entwickelten Modells auf Basis kleiner Volumenelemente im Walzspalt die Werkstoffbewegung in axialer Richtung zu berechnen.

Die Berechnungsmethodik wurde im ersten Schritt anhand von Walzversuchen mit Ringen mit rechteckigem Querschnitt verifiziert. In weiteren Schritten wurden komplexere Walzsituationen wie das Walzen profilierter Ringe und das Entstehen von axialen Breitungseffekten berechnet und mit praktischen Versuchsergebnissen verglichen. Es wurden Serien von 5 Ringen gleicher Vorform mit identischen Randbedingungen gewalzt. Der Prozess wurde zu verschiedenen Zeitpunkten abgebrochen, so dass die Geometrien dieser nicht vollständig ausgewalzten Ringe quasi als Momentaufnahmen eines einzigen Walzprozesses interpretiert werden können. Durch den Vergleich der vermessenen Ringkonturen mit den Simulationsergebnissen an definierten Zeitpunkten konnte gezeigt werden, dass mit dem entwickelten

Simulationssystem der Werkstofffluss im Verlauf eines Walzprozesses realitätsnah abgebildet werden kann.

Das Simulationsprogramm enthält neben den Berechnungsalgorithmen alle erforderlichen Komponenten für eine effektive Bedienbarkeit durch den Anwender. Mit diesem System gelingt es, die entstehende Ringgeometrie einschließlich der Profillfüllung für einen Walzprozess vorherzusagen. Das Zusammenspiel zwischen gewählter Walzstrategie, d.h. Vorschüben und Drehzahlen der Walzen, und Vorform des Ringes kann so bereits vor dem Produktionsstart gezielt überprüft und ggf. optimiert werden.

Aufgabe weiterer Untersuchungen sollte es sein, neben einer detaillierteren Modellierung des Axialwalzspaltes auch die Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf andere Stahlsorten durch praktische Versuche zu überprüfen, da im Rahmen dieser Arbeit nur der Werkstoff 42CrMo4 verwendet wurde.

Weiterhin könnte untersucht werden, inwieweit sich ein in der Praxis durch gezielte Ringverlagerung des Ringes aus der Maschinenlängsachse verbessertes Profillfüllungsverhalten auch mit dem entwickelten Simulationsansatz abbilden lässt. Eine mathematische Beschreibung der durch die Ringverlagerung veränderten geometrischen Verhältnisse im Radialwalzspalt liefert hierfür die Basis. Da die Kontaktsituation zwischen Ring und Walzen wesentlichen Einfluss auf die im Simulationsansatz enthaltenen Geschwindigkeitsansätze hat, ist zu erwarten, dass Simulationsrechnungen mit verlagertem Ring auch zu Veränderungen der Ringgeometrie führen.

Ein weiteres Arbeitsgebiet wäre die rechnerische Abbildung des Einflusses der sich während der Walzung ändernden Werkstofftemperatur. Das entwickelte Berechnungsmodell ermöglicht prinzipiell auch die Rechnung mit einer während des Walzprozesses variierenden Fließspannung und darüber die Integration des Temperatureinflusses. Die Simulation müsste an ein geeignetes Temperaturmodell, wie es z.B. in /17/ vorgestellt wird, gekoppelt werden.

## 8 Schrifttum

- /1/ Großmann, K.: „*Die Realität im Virtuellen*“, Schriftenreihe des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen, TU Dresden, 1997.
- /2/ Großmann, K.: „*Zukunftspotential-Simulation*“, Dresdner Tagung Simulation im Maschinenbau 24. u. 25. Februar 2000, Dresdner Freundeskreis der Werkzeugmaschinen- und Steuerungstechnik e.V., 2000.
- /3/ Dürr, O., Frank, A., Grimm, W., Kopp, R., Schmidt, R., Wieland, H.-J.: „*Recent Developments in the Open Die Forging Industry in Austria, Germany, Sweden and Switzerland*“, 14<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting, Wiesbaden, 2000.
- /4/ Weber, K.H.: „*Das Walzen von Ringen und der Aufbau der Ringwalzwerke*“, Stahl u. Eisen 79, Nr. 26, S. 1912-1923, 1959.
- /5/ Marczinski, H.-J.: „*Das automatische Walzen von Ringen mit kleinen und mittleren Durchmessern*“, Stahl u. Eisen 98, Nr. 15, 1978.
- /6/ Johnson, W., Hawkyard, J. B.: „*Recent developments in ring rolling applications and rotary forging*“, Metallurgia and metal forming, 1976.
- /7/ Baker, A.G.: „*The forged and rolled ring: a product with both a past and a future*“, Steel times annual review, 1974.
- /8/ Maßberg, W.: „*Steuern und Regeln beim Walzen ringförmiger Werkstücke*“, wt-Z. ind. Fertigung. 61, S. 346-351, 1971.
- /9/ Marczinski, H.-J.: „*Der Entwicklungsstand neuzeitlicher Ringwalzwerke*“, Stahl u. Eisen 94, Nr. 24, 1974.
- /10/ Yun, J.S., Cho, H.S.: „*Optimal control system design for ring rolling process*“, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 1322-1327, 1984.
- /11/ Roth, K.: „*Bedienerkommunikationssystem dargestellt am Prozess des Ringwalzens*“, tz für Metallbearbeitung, H. 2/86, S. 30-34, 1986.
- /12/ Watando, K., Tereao, M., Yaguchi, K., Arai, T., Murata, T., Katoh, T.: „*Development of the ring rolling mill controlling the ring outer diameter growth rate*“, NKK Technical Review, Vol. 59, pp. 68-76, 1990.
- /13/ N.N.: „*Multivariate Ermittlung von messtechnisch nicht direkt erfassbaren Prozessinstabilitäten am Beispiel des Kletterns beim Radial-Axial-*

- Ringwalzen*“, laufendes DFG-Forschungsvorhaben, LPS, Ruhr-Universität Bochum, 2001.
- /14/ N.N.: *„Untersuchungen zur Verbesserung der Prozessstabilität beim Ringwalzen durch konstruktive und regelungstechnische Maßnahmen“*, laufendes AiF-Vorhaben, IBF, RWTH Aachen 2001.
- /15/ Nicoll, R. *„Minimierung des Energieeinsatzes beim Ringwalzen“*, Dissertation, RWTH Aachen, 1993.
- /16/ Kopp, R., Wiegels, H., Pöll, H.-A.: *„Grundlagenuntersuchungen zum Walzen von Ringen mit profiliertem Querschnitt“*, Abschlußbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Ko 579/29-1,2,3, Mai 1992.
- /17/ Schmickler, O.: *„In-Prozess-Kompensation der Wärmeausdehnung von radial-axial gewalzten Ringen mit Rechteckquerschnitt“*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1998.
- /18/ N.N.: *„Endkonturnahe Herstellung außenprofiliertes Querschnitte beim Radial-Axial-Ringwalzen durch geregelte Ringverlagerung“*, laufendes DFG-Forschungsvorhaben, LPS, Ruhr-Universität Bochum, 2001.
- /19/ N.N.: *„Analyse und Optimierung des Ringwalzprozesses mit Hilfe der Methode der finiten Elemente“*, laufendes DFG-Vorhaben, IBF, RWTH Aachen 2001.
- /20/ Maßberg, W., Wischniowsky, M., Schmickler, O.: *„Beschreibungssystematik für Fehler beim Ringwalzen“*, Lehrstuhl für Produktionssysteme und Prozessleittechnik, Ruhr-Universität Bochum, 1998.
- /21/ Kluge, A.: *„Ringwalzen von Titanlegierungen“*, Dissertation, RWTH Aachen, 1997.
- /22/ Johnson, W., Mamalis, A.G.: *„Rolling of rings“*, International Metals Reviews, No. 4, pp. 137-148.
- /23/ Koppers, U.: *„Erweiterte Produktpalette beim Ringwalzen“*, Industrie-Anzeiger 34, S. 28-30, 1988.
- /24/ N.N.: *„Entwicklung eines neuen Ringwalz-Verfahrens zur Produktion profilierter Ringe“*, laufendes DFG-Vorhaben, IBF, RWTH Aachen 2001.
- /25/ Lemke, J.: *„Technologie und FEM-Simulation beim Universalwalzen von Profilen“*, Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 1998.

- /26/ Sax, H.: *„Das Warm-Walzen von Profilen in einem Stich“*, Dissertation, RWTH Aachen, 1968.
- /27/ Marczinski, H.-J.: *„Ringwalzen von Profilen“*, Symposium der Deutschen Gesellschaft für Metallkunde, Bad Nauheim, 22./23. 10.1981.
- /28/ Henkel, J., Wiegels, H., Kopp, R.: *„Analyse der Bearbeitungszugaben beim Walzen von Ringen mit Rechteckquerschnitt und Vorschläge zu ihrer Verringerung“*, Stahl u. Eisen 106, Nr. 22, S. 1207-1212, 1986.
- /29/ N.N.: *„Grundlagen des Walzens von profilierten Ringen“*, aus Technologie-Tipps und Tricks, Ausgabe Nr. 2, SMS Eumuco GmbH, Produktbereich Wagner Banning Ringwalzen, 2001.
- /30/ Dreinhoff, P.: *„Adaptive Prozessführung beim Ringwalzen“*, Dissertation, RWTH Aachen, 1987.
- /31/ Porten, R.: *„Ein Beitrag zur Einführung neuer Steuerungskonzepte und Entwicklungsmethoden in die Umformtechnik am Beispiel des Radial-Axial-Ringwalzens“*, Dissertation, Ruhr-Universität Bochum, 1989.
- /32/ Lieb, A.: *„Minimierung von Formfehlern beim Ringwalzen“*, Dissertation, RWTH Aachen, 1991.
- /33/ Lieb, A., Wiegels, H., Kopp, R.: *„Rundheitsmessungen an warmgewalzten Ringen“*, Stahl und Eisen, H. 110, 9/1990.
- /34/ Koppers, U.: *„Geometrie, Kinematik und Statik beim Walzen von Ringen mit Rechteckquerschnitt“*, Dissertation, RWTH Aachen, 1986.
- /35/ Koppers, U.: *„Flexibles Walzen von Ringen mit Profilquerschnitt-Grundlagen“*, Umformtechnik, H. 26, 5/1992, S.333-336, 1992.
- /36/ Mamalis, A.G., Hawkyard, J.B., Johnson, W.: *„Cavity formation in Ring Rolling“*, Int. J. Mech. Sci., Vol. 17, pp 669-672, 1975.
- /37/ Shivpuri, R., Eruc, E.: *„Planning and simulation of the Ring Rolling process for improved productivity“*, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 33, pp. 153-173, 1993.
- /38/ N.N.: *„Technologiehandbuch Radial-Axial-Ringwalzmaschine“*, Thyssen Maschinenbau GmbH, Wagner Dortmund, 1990.
- /39/ Puller, S., Mathieu, H.: *„Prozessauslegung beim Ringwalzen“*, Umformtechnik, H. 1/2002, S.42-43, 2002.

- /40/ Pawelski, H., Pawelski, O.: „*Technische Plastomechanik*“, Verlag Stahleisen GmbH, Düsseldorf, 2000.
- /41/ Kopp, R., Wiegels, H.: „*Einführung in die Umformtechnik*“, Verlag der Augustinus Buchhandlung, Aachen, 1998.
- /42/ Menz, R.: „*Entwicklung eines analytischen Simulationsmodells als Grundlage einer geregelten Richtmaschine*“, Dissertation, Universität Hannover, 2002.
- /43/ Yang, D.Y., Kim, K.H.: „*Rigid-plastic finite element analysis of plane strain Ring Rolling*“, Int. J. Mech. Sci., Vol. 30, pp 571-580, 1988.
- /44/ Shiau, Y.C., Eruc, E., Shivpuri, R.: „*Finite element modelling of ring rolling by 2-D and 3-D approximations – radial expansion and ring indentation*“, ASME Winter Annual Meeting Symposium on Computer-Aided Design and Manufacture of cutting and Forming/Forging, San Francisco, 1989.
- /45/ Shiau, Y.C.: „*Finite element analysis of spread in Ring Rolling*“, Transactions of NAMRI/SME, Oklahoma State University, 1990.
- /46/ Yang, D.Y., Kim, K.H.: „*Simulation of T-section profile ring rolling by the 3-D rigid-plastic finite element method*“, Int. J. Mech. Sci., Vol. 33, pp 541-550, 1991.
- /47/ Xu, S. G., Lian, J.C., Hawkyard, J.B.: „*Simulation of ring rolling using a rigid-plastic finite element model*“, Int. J. Mech. Sci., Vol. 33, pp 393-401, 1991.
- /48/ Hirai, T., Hawkyard, J.N., Maekawa, Y., Katayama, T.: „*Rheological interpretation in profile ring rolling*“, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 653-658, 1990.
- /49/ Tszeng, T.C., Altan, T.: „*Investigation of ring rolling by pseudo plane strain FEM analysis*“, Journal of Materials Processing Technology, Vol. 27, pp. 151-161, 1991.
- /50/ Kim, N., Machida, S., Kobayashi, S.: „*Ring Rolling process simulation by the three dimensional finite element method*“, Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 30, pp. 569-577, 1990.
- /51/ Pillinger, I., Hartley, P., Hu, Z.M., McKenzie, S., Spence, P.J.: „*Three-dimensional finite-element modelling of ring rolling*“, J. Mater. Process. Technol., Vol. 45, pp. 143-148, 1994.
- /52/ Pillinger, I., Hartley, P., Hu, Z.M., McKenzie, S., Spence, P.J.: „*Thermo-plastic finite element modelling of the ring rolling of hot titanium ring*“, in

- “Simulation of Materials Processing : Theory, Methods and Applications”, ed. By Dawson et al., pp. 941-946, Balkema, Rotterdam, 1995.
- /53/ Xu, S.G., Weinmann, K.J., Yang, D.Y., Lian, J.C.: “*Simulation of the hot ring rolling process by using a thermo-coupled three-dimensional rigid-viscoplastic finite element method*”, Int. J. Mech. Sci., Vol. 119, pp 542-549, 1997.
- /54/ Koch, M.: “*Betrachtungen zum Einsatz der expliziten FEM in der Massivumformung*“, Dissertation, RWTH Aachen, 1998.
- /55/ Lim, T, Pillinger, I. Hertley, P.: “*A finite-element simulation of profile ring rolling using a hybrid mesh model*”, J. Mater. Process. Technol., pp. 199-205, 1998.
- /56/ Hellmann, M., Hülshorst, T., Kopp, R.: “*Simulation of Ring Rolling*“, 14<sup>th</sup> International Forgemasters Meeting, S. 454-460, 2000.
- /57/ Davey, K., Ward, M.J.: “*An efficient solution method for finite element ring-rolling simulation*”, International Journal For Numerical Methods In Engineering, Vol. 47, pp. 1997-2018, 2000.
- /58/ Hellmann, M.: “*Numerische Simulation des Ringwalzprozesses mit Hilfe der Methode der finiten Elemente*“, Dissertation, RWTH Aachen, 2002.
- /59/ Siebel, E.: “*Kräfte und Materialfluss bei der bildsamen Formänderung*“, Stahl u. Eisen 45, S. 1563-1566, 1925.
- /60/ v. Kármán, T.: “*Beitrag zur Theorie des Walzvorganges*“, Z. angew. Math. Mech. 5, S. 139-141, 1925.
- /61/ Lippmann, H., Mahrenholtz, O.: “*Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe*“, Springer Verlag, Berlin, 1967,.
- /62/ Doege, E.: “*Bereitstellung umformtechnischer Daten zur Optimierung des Walzprozesses*“, Abschlußbericht DFG-Forschungsvorhaben Do 190/82-1, Februar 1992.
- /63/ Doege, E., Buchholz, B.: “*Simulation des Ringwalzens*“, wt Wissenschaft und Technik, Springer-Verlag, Juli/August 1993, S. 42-45.
- /64/ Aboutour, M. “*Entwicklung einer rechnergestützten Methode zur Ermittlung optimaler Ausgangsformen für das Ringwalzen*“, Abschlußbericht DFG-Forschungsvorhaben Do 190/15, Juli 1988.

- /65/ Aboutour, M: *„Rechnerunterstützte Erfassung des Ringwalzvorganges“*, Dissertation, Universität Hannover, 1989.
- /66/ Doege, E., Braun-Angott P.: *„Schrankenmethode“*, Umformtechnik, Plastomechanik und Werkstoffkunde, S. 215-220, Springer Verlag, 1993.
- /67/ Avitzur, B., Van Tyne, C.J.: *„Ring forming: An upper bound Approach“*, Journal of Engineering for Industry, Vol.104, pp. 231-252, 1982.
- /68/ Fox, R., Lee, D.: *„Closed die forging analysis of polycarbonate using an upper bound approach“*, Int. J. Mech. Sci., Vol. 31, No. 4, pp 265-283, 1991.
- /69/ Ryoo, J.S., Yang, D.Y, Johnson, W.: *„Lower Upper-Bound analysis of the Ring Rolling process by using force polygon diagram and dual velocity field“*, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 1292-1298, 1984.
- /70/ Hahn, Y.H., Yang, D.Y.: *„UBET analysis of closed-pass ring rolling of rings having arbitrarily shaped profiles“*, J. Mater. Process. Technol., Vol. 40, pp. 451-463, 1994.
- /71/ Steck, E.: *„Kraftberechnung bei Umformverfahren mit Hilfe der oberen Schranke“*, Werkstatttechnik, 1967, Heft 6, S. 273-279.
- /72/ Lee, J.S., Yang, D.Y., Hahn, Y.H., Kim, K.H., Cho, N.C.: *„A UBET Approach for the analysis of Profile Ring Rolling“*, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 1, pp 317-321, 1990.
- /73/ Hahn, Y.H., Yang, D.Y.: *„UBET analysis of roll torque and profile formation during the profile ring-rolling of rings having rectangular protrusions“*, J. Mater. Process. Technol., Vol. 26, pp. 267-280, 1991.
- /74/ Fan, X.: *„Simulation des Ringwalzprozesses mit dem Oberen Schrankenverfahren“*, Dissertation, Universität Hannover, 1995.
- /75/ Prager, W., Hodge, P.G.: *„Theorie idealplastischer Körper“*, Springer Verlag, Wien, 1954.
- /76/ Lange, K.: *„Lehrbuch der Umformtechnik“*, Springer-Verlag, 1972, S.191-197.
- /77/ Maekawa, Y., Hirai, T., Katayama, T., Hawkyard, J. B.: *„Modelling and numerical analysis of cross rolling and profile ring rolling processes“*, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 930-935, 1984.
- /78/ Schiffgen, W.: *„Untersuchung über die Formänderung und den Werkstofffluss beim Warmwalzen“*, Dissertation, Bergakademie Clausthal, 1966.

- /79/ Mamalis, A.G., Hawkyard, J.B., Johnson, W.: *“Spread and flow patterns in ring rolling”*, Int. J. Mech. Sci., Vol. 18, pp. 11-16, 1976.
- /80/ Weber, K.H.: *„Das Walzen von Ringen und der Aufbau der Ringwalzwerke“*, Stahl und Eisen 79, Nr.26, 1959.
- /81/ Kneschke, A.: *„Zur hydrodynamischen Theorie des Warmwalzens“*, Freiburger Forschungshefte, B. 16, S. 5-34, 1957.
- /82/ Kneschke A, Bandemer, H.: *„Eindimensionale Theorie des Walzvorganges“*, Freiburger Forschungshefte, B. 94, S. 9-75, 1964.
- /83/ Lange, K.: *„Umformtechnik“*, Band 2: Massivumformung, Springer-Verlag, 1988, S. 180-191.
- /84/ Schlüssler, K.-H.: *„Zweidimensionale Theorie des Walzvorganges“*, Freiburger Forschungshefte, B. 94, S. 77-111, 1964.
- /85/ Hawkyard, J.B., Johnson, W., Kirkland, J., Appleton, E.: *“Analyses for roll force and torque in ring rolling, with some supporting experiments”*, Int. J. Mech. Sci., 1973, Vol. 15, pp. 873-893.
- /86/ Siebel, E.: *„Zur Theorie des Walzvorganges bei ungleich angetriebenen Walzen“*, Archiv für Eisenhüttenwesen, 1941, 15. Jg., Heft 3.
- /87/ Lugora, C.F., Bramley, A.N.: *“Analyses of spread in ring rolling”*, Int. J. Mech. Sci., Vol. 29, No. 2, pp 149-157, 1987.
- /88/ Yang, D.Y, Ryoo, J.S., Choi, J.C., Johnson, W.: *“Analysis of roll torque in profile ring-rolling of L-sections”*, 21<sup>st</sup> Mach. Tool Des. Res. Conf., London, p. 69, 1981
- /89/ Kopp, R., Wiegels, H., Koppers, U.: *„Untersuchungen zu den Grundlagen des Ringwalzens und Weiterentwicklung des Verfahrens“*, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben III/c 4-48-17, Ministerium für Wirtschaft, Mittelstand und Technologie des Landes NRW, 1986.
- /90/ Lippmann, H., Hansen, E., Buchholz, F.G., Besdo, D.: *„Programmbibliothek für das Kalt- und Warmwalzen von Band“*, Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben FAA-Nr. 409, Lehrstuhl B für Mechanik, TU Braunschweig, 1971.
- /91/ Prager, W.: *„Einführung in die Kontinuumsmechanik“*, Birkhäuser Verlag, 1961.

- 
- /92/ Doege, E., Mathieu, H., Puller, S.: *"Simulation of the material flow at the ring rolling process"*, Advanced Technology of Plasticity, Vol. 2, pp. 965-970, Springer Verlag, 1999.
- /93/ Spittel, M.: *„Ver- und Entfestigung bei Warmumformung, ihre mathematische Formulierung und Anwendung zur Berechnung von Warmumformfolgen“*, Dissertation, Bergakademie Freiberg, 1980.
- /94/ N.N.: *„Rolltech, Version 4.1c, Technologiesoftware für das Radial-Axial-Ringwalzen“*, Thyssen Maschinenbau GmbH Wagner Dortmund, 1997.
- /95/ Richter, F.: *„Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von 52 Eisenwerkstoffen“*, Stahleisen-Sonderberichte Heft 8, Düsseldorf, 1973.

## Lebenslauf

Name: Stefan Puller  
 Anschrift: Neidenburger Weg 10  
 32339 Espelkamp

Geburtsdatum/-ort: 26.12.1967, Rahden  
 Staatsangehörigkeit: deutsch  
 Familienstand: verheiratet, 2 Kinder

### Schulausbildung

08/74 - 07/78     Grundschule, Espelkamp  
 08/78 - 06/87     Söderblom-Gymnasium Espelkamp  
Abschluss: Abitur

### Grundwehrdienst

10/87 - 12/88     2. Pionier Bataillon 110 Minden

### Hochschulstudium

10/88 - 05/94     Elektrotechnik an der Universität/GH Paderborn  
 Fachrichtung: Automatisierungstechnik  
Abschluss: Diplomingenieur

### Beruflicher Werdegang

07/94-07/97     Projektingenieur bei der Fa. Aumann Systemtechnik GmbH (Sondermaschinenbau)  
 08/97-12/01     Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover  
 Abteilung: CA-Techniken  
 Seit 01/02     Leiter der Abteilung Forschung & Entwicklung bei der Fa. Plümat Maschinenbau GmbH