TU Clausthal, Institut für Metallurgie
Name der Forschungsstelle(n)

13939N / 4
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.07.2005 — 31.12.2007
Bewilligungszeitraum

Schlussbericht für den Zeitraum : —

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die

AiF
Otto von Guericke

geförderten IGF-Forschungsvorhaben

☒ Normalverfahren
☐ Fördervariante ZUTECH

Forschungsthema : **Eigenspannungen und Maßtoleranzen beim Rohrziehen**

Für ein ZUTECH-Vorhaben sind folgende zusätzliche Angaben zu machen:

Der fortgeschriebene Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

☐ ist beigefügt

☐ liegt bereits vor

☐ wird fristgerecht nachgereicht

Institut für Metallurgie
Technische Universität Clausthal
Robert-Koch-Straße 42
D - 38678 Clausthal-Zellerfeld

CLZ, 30.06.08
Ort, Datum

Unterschrift der/des Projektleiter(s)

TU Clausthal, Institut für Metallurgie
Name der Forschungsstelle

13939N / 4
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.07.2005 — 31.12.2007
Bewilligungszeitraum

Fragebogen zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse

		ja	zum Teil	nein	
1.	Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht	X			
2.	Die Bedeutung der Forschungsergebnisse ist folgendermaßen einzuschätzen :	hoch	mittel	gering	z.Zt. nicht absehbar
	• wissenschaftlich-technischer Nutzen		X		
	• wirtschaftlicher Nutzen für KMU	X			
3.	Die Forschungsergebnisse liefern einen innovativen Beitrag				
	• zu einem neuen Produkt				
	• zur Weiterentwicklung eines Produkts	X			
	• zu einem neuen Verfahren				
	• zur Weiterentwicklung eines Verfahrens	X			
4.	Eine industrielle Anwendung der Forschungsergebnisse ist realisiert	ja	demnächst	nein	z.Zt. nicht absehbar
					X
5.	Eine weiterführende FuE kann in < 3 Jahren zur Innovation (z.B. Pilotanwendung) führen	ja	vielleicht	nein	z.Zt. nicht absehbar
		X			

6. Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Fachgebieten gemäß Anlage 1
7. Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Wirtschaftszweigen gemäß Anlage 2

		ja	demnächst	nein
8.	Die Forschungsergebnisse wurden in einer der entsprechend Abschnitt 3.6 des IGF-Leitfadens zulässigen Formen veröffentlicht	X		

Zusätzlich bei ZUTECH-Vorhaben:

		ja	nein
9.	Der Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft enthält ausreichend beschriebene Maßnahmen zu folgenden Punkten:		
	• zum möglichen Umfang der industriellen Nutzung der Forschungsergebnisse		
	• zur konkreten Umsetzung der Forschungsergebnisse in KMU		
10.	Die Darstellung der Maßnahmen im Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft ist ausreichend, um eine spätere Evaluierung der Forschungsergebnisse zu ermöglichen		

Berlin, 04.07.08
Ort, Datum

i.V.

oder

Institut für Metallurgie
Technische Universität Clausthal
Robert-Koch-Straße 42
D - 38678 Clausthal-Zellerfeld

Clausthal 04.07.08
Ort, Datum

Rechtsverbindliche Unterschrift mit Stempelabdruck

der AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)
- Erstzuwendungsempfänger -

des Leiters der Forschungsstelle (FSt)
- Letztzuwendungsempfänger -

TU Clausthal, Institut für Metallurgie
Name der Forschungsstelle

13939N / 4
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.07.2005 — 31.12.2007
Bewilligungszeitraum

Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Fachgebieten

(**Anlage 1** des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

Fachgebiete	Hauptsächliche Nutzung	Nutzung auch möglich
Rohstoffe		
Werkstoffe, Materialien		
Chemie		
Verfahrenstechnik		
Lebensmitteltechnik, Bio-, Gentechnik		
Mikrobiologie, Hygiene		
Umwelttechnik		
Konstruktion		
Produktion	X	
Elektrotechnik, Mikrosystemtechnik, Medizintechnik		
Mess-, Regel-, Automatisierungstechnik		X
Informations- und Kommunikationstechnik		
Betriebswirtschaft, Organisation		

TU Clausthal.Institut für Metallurgie
Name der Forschungsstelle

13939N / 4
AiF-Vorhaben-Nr. / GAG

01.07.2005 — 31.12.2007
Bewilligungszeitraum

Zuordnung der erzielten Forschungsergebnisse zu Wirtschaftszweigen
(**Anlage 2** des Fragebogens zur Einschätzung der erzielten Forschungsergebnisse)

Wirtschaftszweige		Hauptsächliche Nutzung	Nutzung auch möglich
Abteilung	Kurzname		
10	Kohlenbergbau und Torfgewinnung		
15	Ernährungsgewerbe		
17/18	Textil- und Bekleidungsgewerbe		
19	Ledergewerbe		
20	Holzgewerbe		
21/22	Papier-, Verlags- und Druckgewerbe		
23	Kokerei, Mineralölverarbeitung, Spalt- und Brutstoffe		
24	Chemische Industrie		
25	Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren		
26	Glasgewerbe, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden		
27/28	Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen	X	
29	Maschinenbau		
30/31/ 32/33	Büromaschinen, Datenverarbeitungsgeräte, Elektrotechnik, Feinmechanik und Optik		
34/35	Fahrzeugbau		
36	Möbel, Schmuck, Musikinstrumente, Sportgeräte u. sonstige Erzeugnisse		
40/41	Energie- und Wasserversorgung		
45	Baugewerbe		
60	Landverkehr, Transport		
72/74	Erbringung von Dienstleistungen überwiegend für Unternehmen		

Dokumentationsblatt

zu dem aus Haushaltsmitteln des BMWA über die

AiF Otto von Guericke

geförderten IGF-Forschungsvorhaben

☒ Normalverfahren

☐ Fördervariante ZUTECH

Metalle	13939N / 4
Name der AiF-Mitgliedsvereinigung (MV)	AiF- Vorhaben-Nr. / GAG
27.8	01.07.2005 — 31.12.2007
Wirtschaftszweig (WZ)	Bewilligungszeitraum
	302 . 950,00 €
Aktenzeichen der MV	Summe der beantragten Zuwendung (bZ)

Forschungsstelle(n) : **TU Clausthal**
Institut für Metallurgie
Robert -Koch Straße 42
38678 Clausthal-Zellerfeld

Forschungsthema : **Eigenspannungen und Maßtoleranzen beim Rohrziehen**

Erzielte Ergebnisse und deren Anwendungsmöglichkeiten :

Es wurden die maßgeblichen Einflussfaktoren für die Eigenspannungen und Maßtoleranzen beim Rohrziehen unter industriellen Bedingungen ermittelt:

- Fehlende Führungen vor und nach der Matrize, die einen definierten Materialfluss bzw. Spannungszustand im Ziehhol sicherstellen.
- Die Ziehangel, die bei einer Krümmung zusätzliche Momente in den Umformbereich einbringt und somit den Spannungszustand in der Anfangsphase deutlich beeinflusst.
- Die Dornbewegung, die einem definierten Materialfluss bzw. Spannungszustand im Ziehhol entgegen wirkt.

Diese haben dort einen deutlich höheren Einfluss, als die aus der Literatur vielfach diskutierten. Die Simulation mittels FEM erwies sich bei diesen Untersuchungen als ein hilfreiches Werkzeug. Sowohl der direkte als auch indirekte Einfluss der Exzentrizität konnte auf den Eigenspannungszustand nachgewiesen werden.

Inhaltsverzeichnis

1 Zusammenfassung 2

2 Gegenüberstellung 3

3 Darstellung der erzielten Ergebnisse 5

3.1 Versuche an Industrierohren laut Versuchsplan 5

3.2 Versuche an Industrierohren für eine Ziehfolge 13

3.3 Versuche an der Versuchsziehanlage 15

3.4 Versuche mit Einlaufführung an der Laborziehanlage 20

3.5 Vorbereitung der Versuchsrohre 22

3.6 Eigenspannungsmessungen 26

3.7 FEM-Modell 32

3.8 Einfluss der Ziehparameter auf Exzentrizität und Eigenspannungen 38

3.9 FEM-Ergebnisse für Rohre 50 x 2 48

3.10 Literatur 56

4 Veröffentlichungen 57

1 Zusammenfassung

Bei der Konstruktion von Rohrleitungen erlaubt die Verringerung der Wanddicken Materialeinsparungen und damit Kostenersparnisse. Dies ist im ersten Schritt gleichbedeutend mit der Forderung nach engeren Maßtoleranzen bei der Wanddicke und der Exzentrizität, also der Verteilung der Wanddicken über den Rohrumfang, denn nur so ist gewährleistet, dass sich bei der Wanddicke allenfalls ein geringes Übermaß einstellt. Das Ziel des beantragten Vorhabens lag in der Quantifizierung ausgesuchter Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit, hier in erster Linie gleichbedeutend mit der Exzentrizität, von nahtlos gezogenen NE-Rohren, ihrer Eingliederung in eine Rangfolge und die Optimierung des Prozesses in Richtung auf engere Toleranzen. Des Weiteren sollten bei diesen Untersuchungen die Eigenspannungen mit berücksichtigt werden.

Um im zeitlich vorgegebenen Rahmen die Auswirkung der zahlreichen Einflussfaktoren und ihre Wechselwirkung untereinander zu untersuchen, wurde die statistische Versuchsplanung eingesetzt. Versuche mit industriell gefertigten Vorrohren aus einer Charge auf einer industriellen Ziehanlage ließen auf Grund hoher Streubreite der Ergebnisse keine Korrelation erkennen. Ursache war die ungenügende Datenaufnahme für die Haupteinflussfaktoren, hier in erster Linie die Veränderung der Exzentrizität über die Rohrlänge, deren Schwankung für die Vorrohre unbekannt war sowie weiterer Störfaktoren, die an der industriellen Anlage nicht aufgenommen werden konnten. Zur Messung der Exzentrizitätsverteilung über die Rohrlänge wurde eine Messvorrichtung entwickelt, die neue Erkenntnisse über die starken Toleranzschwankungen der Ausgangsrohre brachte.

Zur Bestätigung und Absicherung dieser Ergebnisse wurden zahlreiche Messungen in der Industrie durchgeführt. Hauptergebnis dieser Versuche war, dass das Exzentrizitätsverhalten in der industriellen Fertigung von Rohr zu Rohr, trotz oberflächlich gleicher Randbedingungen, stark variiert.

Die durch die ausgewählten Parameter zu erzielenden Einflüsse sind laut Literatur und Simulation auf einem deutlich geringeren Niveau einzuordnen. Dies bedeutet aber, dass sie für die hier untersuchten, industriell gezogenen Rohre in Hinblick auf die Toleranzen praktisch nur eine untergeordnete Rolle spielen. Nach diesen Ergebnissen beschloss man in der Arbeitsgruppe, die Versuche zur Beeinflussung und Einstellung einer definierten Exzentrizität an einer Versuchsanlage durchzuführen.

Bei diesen Versuchen zur Vorrohrherstellung wurden die ausschlaggebenden Faktoren identifiziert. Als ausschlaggebende Störfaktoren wurden die Dornbewegung und die fehlende Führungen vor und nach der Matrize ausfindig gemacht, sowie eine schiefe Ziehangel. Die dadurch einhergehenden Momente am Material beeinflussen in Form von Spannungen in der Umformzone den Exzentrizitätsausgleich deutlich.

Die gezielte Beeinflussung der Exzentrizität für die Vorrohre konnte mit Hilfe des Schrägeinlaufs vorgenommen werden. Jedoch konnten mit den zur Verfügung stehenden primitiven Mitteln auch bei diesen Versuchen Schwankungen – bei hohem Exzentrizitätsniveau - nicht vermieden werden.

Mit Hilfe der Simulation und stützenden Versuchen unter Laborbedingungen konnte gezeigt werden, dass sich die Exzentrizität beim Hohlzug auf die Verteilung der Eigenspannungen deutlich bemerkbar macht. Beim Stopfenzug ist der Einfluss von

geringerer Bedeutung. Hier machen sich die zuvor erwähnten Störfaktoren in der Praxis viel deutlicher bemerkbar! Das Hauptaugenmerk sollte sich daher nicht auf die klassischen Parameter wie Ziehwinkel und Radius allein richten.

Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht. Neue Einflussfaktoren auf die Qualität des Ergebnisses konnten im Rahmen dieses Forschungsprojektes ermittelt werden, wie z. B. Führung und Schräglauf. Hier ist weiterer Untersuchungsbedarf gegeben!

2 Gegenüberstellung

Das Ziel des beantragten Vorhabens liegt in der Bewertung der Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit von nahtlos gezogenen NE-Rohren, ihrer Eingliederung in eine Rangfolge und die Einstellung des Prozesses zur Erzielung engerer Maßtoleranzen. Hierdurch sollen Abweichungen weitest möglich reduziert und die mit ihnen einhergehenden, bei einer ungünstigen Prozessführung verstärkt aufgebauten, lokal variierenden Eigenspannungen minimiert werden, um so das Produkt hinsichtlich Lagerfähigkeit, Weiterverarbeitung und Langzeitverhalten zu optimieren.

Die Untersuchungen zeigten, dass die aus der Literaturanalyse und industriellem Kenntnisstand recherchierten und daher für diese Untersuchungen als relevant angesehenen Einflussfaktoren (siehe Abbildung 1) nicht ausreichen, die im Industrieprozess gefertigten Rohre zu beschreiben. Hier spielen andere Parameter eine wesentliche Rolle. Eine Quantifizierung dieser Fertigungsparameter ist im industriellen Versuchsumfeld nicht möglich, wie nach umfangreichen Untersuchungen belegt werden konnte. Wesentliche Gründe sind hierfür die unterschiedlichen Eingangstoleranzen der einzelnen Rohre, die für die Simulationsentwicklung erst einmal erfasst werden müssten. Eine stichprobenartige Messung für jedes Rohr an der Rohrstirnfläche erwies sich als unzureichend, da die Rohre über die Länge in Ihrem Exzentrizitätsverlauf deutlich schwanken, wie sich bei späterer Vermessung außerhalb der Fertigungskette herausstellte. Eine in-line-Messung existiert an industriellen Anlagen nicht und war mit den zur Verfügung stehenden Messtechniken nicht möglich.

Identifiziert wurden als weitere wesentliche Faktoren:

1. Fehlende Führungen vor und nach der Matrize,
2. eine unkontrollierte Dornbewegung
3. eine unsymmetrische bzw. schiefe Ziehangel (Ziehanfang)

Durch die fehlenden Führungen kann sich das Rohr unter verschiedenen Winkeln in die Matrize einziehen. Durch den dadurch hervorgerufenen Schrägeinlauf des Rohres wird die Exzentrizität sehr stark lokal beeinflusst, wie in Demonstrationsversuchen gezeigt werden konnte.

Der Dorn, der durch die elastisch wirkende Dornstange in der Umformzone befestigt ist, kann sich ebenfalls, da er so gesehen auch ohne wirksame Führung ist, in der Umformzone - z.B. durch Maßtoleranzschwankungen im Vorrohr angeregt - frei bewegen. Durch seine Bewegung wird die Exzentrizität direkt beeinflusst, zumal dann besonders, wenn ein konischer Dorn statt eines zylindrischen zum Einsatz kommt. Bei Einsatz eines zylindrischen Dorns fallen die Eigenspannungen deutlich geringer aus, wie in der Simulation gezeigt werden konnte. Die Kontaktfläche zwischen Dorn und Rohr ist bei Einsatz eines zylindrischen Dornes wesentlich größer, so dass auch eine bessere Führung für den Dorn erzielt wird.

Bei Einsatz einer Einlaufführung konnte eine deutlich geringere Streubreite der Ergebnisse erzielt werden, wobei die erzielten Exzentrizitätsverbesserungen allerdings bei maximal 1,5% lagen. Diese sind durch eine verbesserte Vorrohrführung aber noch deutlich steigerbar. Hier wird noch dringender Forschungsbedarf gesehen.

Die Auswirkungen der beiden Haupteinflussfaktoren Führung und Dornbewegung finden sich aber nicht nur in der Exzentrizität wieder. Durch den lokal variierenden Materialfluss in der Umformzone werden auch die Eigenspannungen maßgeblich durch diese Faktoren gelenkt. Bei den Eigenspannungsmessungen waren auch dies die Hauptfaktoren, während die angesprochenen Fertigungsparameter nur eine Nebenrolle bei den Industrieversuchen spielten. Durch eine gezielte Elimination dieser Faktoren, also einen Hohlzug mit Führung, konnte bei den Eigenspannungsmessungen der direkte Einfluss der Exzentrizität auf die Eigenspannungen nachgewiesen und auch in der FEM-Simulation berechnet werden.

Der dritte Einflussfaktor, die Ziehangel, macht sich nur im Anfangsbereich des Rohres bemerkbar, indem er durch das Biegemoment den Spannungszustand in der Umformzone und damit das Fließverhalten in den drei Raumrichtungen verändert.

Für den Endanwender bedeuten diese Ergebnisse, dass er sein Hauptaugenmerk bei der Optimierung seines Prozesses in Hinblick auf eingeschränkte Maßtoleranzen und Eigenspannungen auf einen kontrollierten Materialflusses richten muss. Nur so kann eine deutliche Verbesserung erzielen. Dazu bedarf es natürlich entsprechender Messdaten und Einflussmöglichkeiten im Prozessverlauf, die zur Zeit nicht verfügbar sind!

3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

3.1 Versuche an Industrierohren laut Versuchsplan

Für die Herstellung der Vorprodukte wurde eine für alle Versuche einheitliche Vorgehensweise mit normierten Ausgangsbedingungen gewählt, alle Rohre des jeweiligen Werkstoffs sind aus einer Charge entnommen worden. Im Gegensatz zu den Vorversuchen wird auch die Werkzeuggeometrie variiert und ihr Einfluss untersucht werden. Der Versuchsplan ist in Abbildung 1 dargestellt. Hier ist auch die Variation der Geometrie der Werkzeuge vorgesehen. Entgegen der ursprünglichen Planung, eine dritte Variante (D x s) – zumindest im Ansatz für einige Eckpunktuntersuchungen – in die Untersuchungen einzubeziehen, wurde im Laufe des Projektes darauf verzichtet. Stattdessen widmete man sich der Untersuchung weiterer Parameter, die im Laufe der Untersuchungen als wesentlich erkannt wurden.

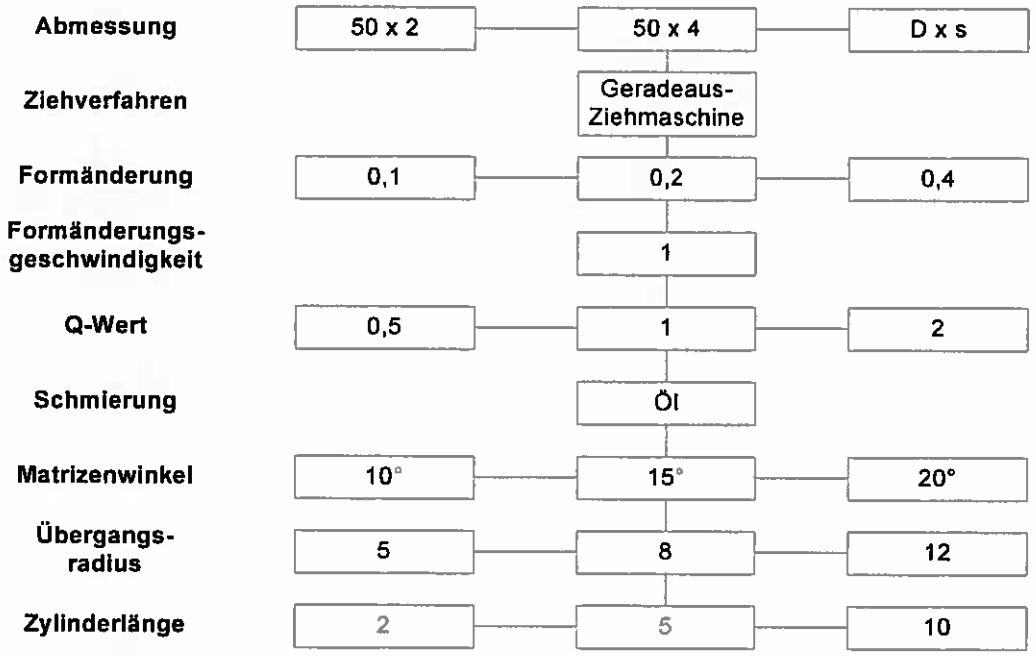


Abbildung 1: Versuchsplan

Im ersten Treffen nach Bewilligung mit dem projektbegleitenden Ausschuss (PBA) wurde der mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung vorbereitete Versuchsumfang vorgestellt, diskutiert und als notwendig bestätigt. Bei der Antragstellung war vorgesehen, die Untersuchungen in Form eines Screeningplans (hier wird jeweils nur ein Parameter betrachtet) durchzuführen. Nicht berücksichtigt würden dabei Interdependenzen zwischen den einzelnen Parametern. Mit der Methode „One factor at a time" könnten alle Interdependenzen ermittelt werden. Aufgrund der hohen Anzahl von Versuchen war das im vorgegebenen Zeitraum und Versuchsumfang nicht zu leisten. Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung war es nur möglich, das komplette Versuchsfeld unter Berücksichtigung der Interpendenzen abzuarbeiten. Das Ziel des Vorhabens blieb dabei folglich erhalten, die zu erzielenden Ergebnisse sind allerdings deutlich aussagekräftiger. Die hierfür aus der statischen Versuchsplanung errechneten Werkzeuggeometrien sind allerdings größtenteils keine Standardgeometrien, so dass von den Partnern keine Werkzeuge bereitgestellt werden konnten.

Werk-zeug-Nr.	Rohr-Nr.	Wand-dicke (mm)	Form-änderung	Q-Wert	Matrizen-winkel (Grad)	Über-gangs-radius (mm)	Zylinder-länge (mm)	Zyl.-Durchm. D-1 (mm)	Zyl.-Durchm. Dorn (mm)
1	2	2	0,40	2,00	10,00	5	2	43,54	40,48
2	12	2	0,10	1,26	10,00	5	2	47,81	44,03
3	5	4	0,40	0,50	20,00	5	2	38,73	31,73
4	25	4	0,10	2,00	20,00	5	2	48,23	40,75
5	33	4	0,16	0,50	10,00	5	2	45,17	37,59
6	13	2	0,25	2,00	20,00	8	2	45,82	42,44
7	3	4	0,10	0,50	16,67	8	2	46,90	39,16
8	6	4	0,40	1,26	10,00	8	2	41,74	35,34
9	19	2	0,40	0,50	10,00	12	2	38,51	35,01
10	26	2	0,10	0,50	20,00	12	2	46,84	42,97
11	28	2	0,40	1,00	15,00	12	2	40,94	37,66
12	7	4	0,10	2,00	10,00	12	2	48,23	40,75
13	17	4	0,40	2,00	20,00	12	2	43,32	37,19
14	9	2	0,40	0,50	20,00	5	5	38,51	35,01
15	34	4	0,20	2,00	15,00	5	5	46,53	39,53
16	29	2	0,10	0,79	10,00	8	5	47,31	43,48
17	31	2	0,40	2,00	10,00	12	5	43,54	40,48
18	16	4	0,10	0,79	20,00	12	5	47,33	39,68
19	32	4	0,40	0,50	13,33	12	5	38,73	31,73
20	14	2	0,10	0,50	20,00	5	10	46,84	42,97
21	11	2	0,40	2,00	20,00	5	10	43,54	40,48
22	10	2	0,20	1,00	10,00	5	10	45,24	41,62
23	4	4	0,40	0,50	10,00	5	10	38,73	31,73
24	18	4	0,10	2,00	10,00	5	10	48,23	40,75
25	15	4	0,10	0,50	13,33	5	10	46,90	39,16
26	35	4	0,40	1,26	20,00	5	10	41,74	35,34
27	20	2	0,40	0,50	13,33	8	10	38,51	35,01
28	21	4	0,16	0,50	20,00	8	10	45,17	37,59
29	40	2	0,10	0,50	10,00	12	10	46,84	42,97
30	27	2	0,40	0,50	20,00	12	10	38,51	35,01
31	39	2	0,10	2,00	16,67	12	10	48,30	44,56
32	22	4	0,40	2,00	10,00	12	10	43,32	37,19
33	41	4	0,10	2,00	20,00	12	10	48,23	40,75
34	42	4	0,16	0,50	10,00	12	10	45,17	37,59
35	37,23,24	4	0,20	1,00	15,00	12	10	45,24	38,00

Tabelle 1: Statistischer Versuchsplan

Dies hatte allerdings den Vorteil, dass kein Einfluss unterschiedlicher Verschleißzustände, Materialien und Beschichtungen berücksichtigt werden musste. Nach Bereitstellung der rekristallisierend geglühten, aus einer Charge stammenden Versuchsrohre in den Abmessungen 50 x 2 und 50 x 4 wurden diese entsprechend dem statistischen Versuchsplan in 35 verschiedenen Einstellungen gezogen (Tabelle 1: **Statistischer Versuchsplan**). Zu diesem Zeitpunkt bedeutete für die Beteiligten des Forschungsprojektes, dass Rohre aus einer Charge die gleiche chemische Zusammensetzung und nahezu gleiche Ausgangsexzentrizität besitzen sollten! Vor jedem Ziehversuch wurden zur Vermessung des Ausgangsrohres ca. 300 mm am Rohrende abgesägt.

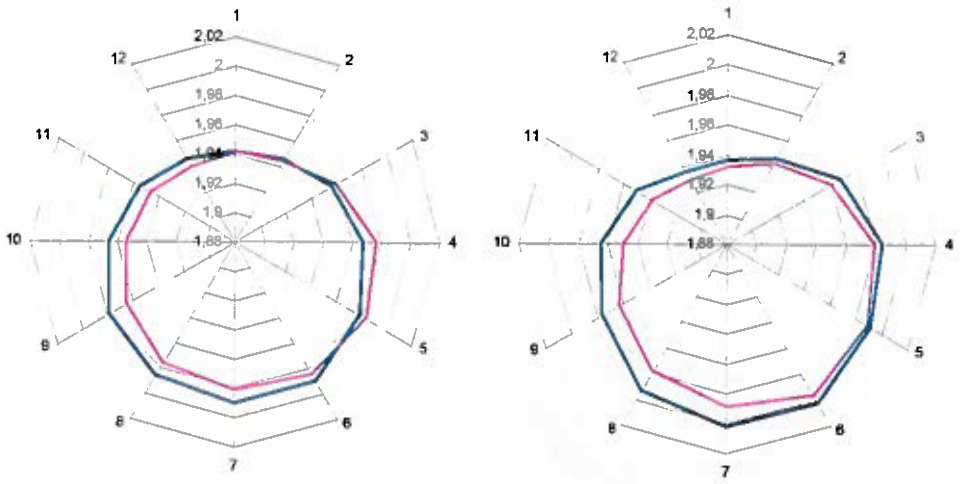


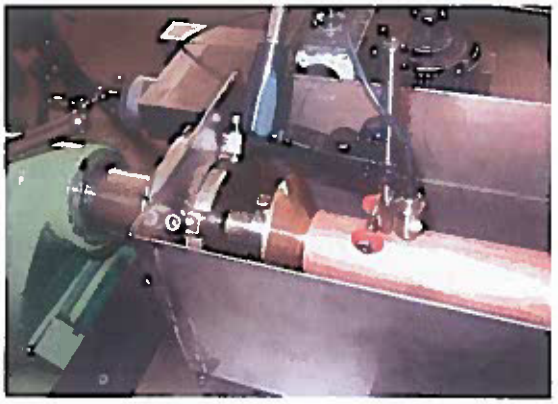
Abbildung 2: Wanddickenmessung über den Umfang in 12 Punkten für zwei Rohrstücke an deren Stirnflächen in einem Abstand von ca. 300 mm

Bei der nachfolgenden Auswertung der Exzentrizitäten wurden bei den Ausgangsrohren unterschiedliche Werte festgestellt. Bei dieser Auswertung wurde nur an den beiden Stirnflächen über 12 Punkte in Umfangsrichtung die Exzentrizität ermittelt. Beispielhaft sind in Abbildung 2 für zwei Rohrstücke die Wandstärkenverteilungen wiedergegeben.

Auffällig ist, dass auch die Winkelposition der Extrema wandert. Die Messungen für alle Rohre ergaben unterschiedliche Exzentrizitätstoleranzen bei den Ausgangsrohren, die zwischen 0,3 bis 5 % schwankten (Abbildung 6 und Abbildung 7). Die erwartete Normalverteilung konnte speziell bei den dickwandigeren Rohren (4,0 mm Wanddicke) nicht festgestellt werden, obwohl diese aus einem Pressrohr stammen sollten. Weiterhin auffällig ist, dass die dünnwandigen Rohre (Wanddicke 2,0 mm) eine deutlich geringere Exzentrizität aufweisen. Das liegt darin begründet, dass diese Rohre aus dem gleichen Pressrohr wie die dickwandigen stammten und zu ihrer Herstellung entsprechend mehr Züge benötigt wurden. Mit jedem Ziehvorgang wird das Rohr erfahrungsgemäß tendenziell gleichwandiger.

Weiterhin stellte sich die Frage, in wieweit die Toleranzen über die Rohrlänge abweichen. Zur deren Beantwortung war eine genauere Untersuchung des Exzentrizitätsverlaufs über die Ziehlänge erforderlich. Eine manuelle und genügend genaue Vermessung war für diesen Zweck zu aufwändig. Zur Bewältigung des gestiegenen Messaufwandes wurde dazu eine automatische Messungsapparatur zur Wanddickenmessung mittels Ultraschall mit folgenden Kenndaten entwickelt:

- Spiralförmige Wandstärkenmessung
- Messgrößen: Wanddicke, Winkelposition, z-Position
- 8 Messpunkte pro Sekunde
- 16 Messpunkte in Umfangsrichtung
- Messabstand: 7mm in Ziehrichtung
- Rohrlänge: max. 400 mm
- Messlänge: max. ca. 350 mm
- Rohrdurchmesser: max. 100 mm
- Messdauer: 5 min pro Rohrprobe



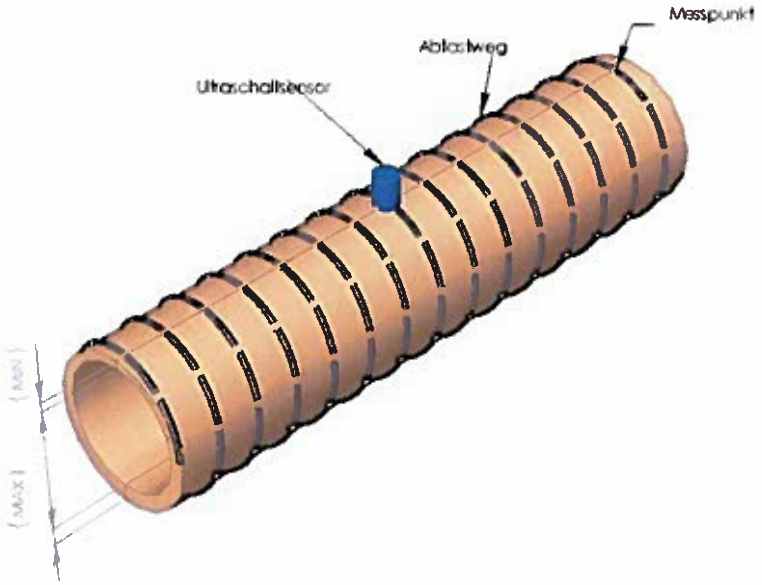
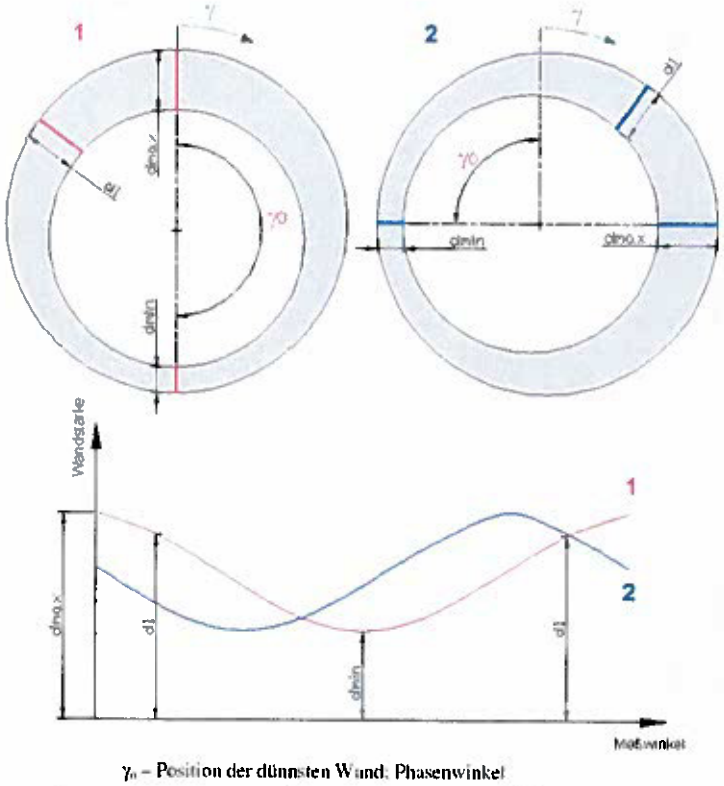


Abbildung 3: Spiralförmige Wanddickenmessung mittels Ultraschall

Zur Bestimmung des Exzentrizitätsverlaufs wurden die Daten mit einem selbst entwickelten Matlab-Programm ausgewertet. Die Messdaten aus der spiralförmigen Abtastung werden dabei für jede Umdrehung separiert und einzeln nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit einer Sinuskurve approximiert. Als Ergebnis liefert das Programm die Wanddickenabweichung in Form der Amplitude, die Phasenverschiebung und die mittlere Wandstärke als Verlauf, der sich aus den einzelnen Auswertungen für jede Umdrehung zusammensetzt. Die Phasenverschiebung ist insofern wichtig, da die Ungleichwandigkeit vom Betrag her für z. B. einen Wechsel der Wanddickenminimums zum Wanddickenmaximums identisch ist. Mit Hilfe der Messung der Phasenverschiebung kann auch diese Abweichung in der Lage erfasst werden (Abbildung 4).



$$y = A\sin(\alpha + B) + C$$

A – *Amplitude*

B – Phasenverschiebung

C – *Achsenverschiebung*

Abbildung 4: Beschreibung der Exzentrizität über die Sinusfunktion für zwei um 90° verschobene Extrema

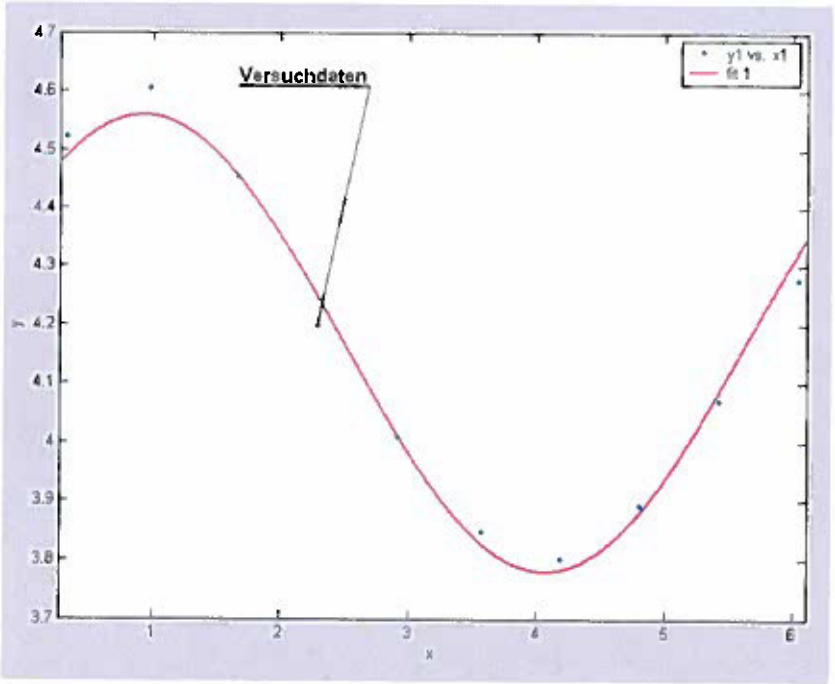


Abbildung 5: Interpolation der Messdaten mittels einer Sinusfunktion

Es konnte festgestellt werden, dass die Toleranzen auch über die gemessene Rohrlänge unterschiedlich ausfielen. Abbildung 10 z.B. zeigt die Wanddickenabweichung des gleichen Rohres vor und nach dem Ziehen, gemessen allerdings an unterschiedlichen Stellen; einmal im Bereich der Stirnfläche der zuvor abgesägten Probe und einmal ca. 200 mm von der Stirnfläche des gezogenen Rohres entfernt. Hier wird die Problematik des Toleranzverlaufes in Längsrichtung sehr deutlich. Es lässt sich nicht

eindeutig sagen, ob die Toleranz durch das Ziehen des Rohres verbessert wurde oder nicht, da die örtlichen Toleranzen bis zu einem Prozent schwanken!

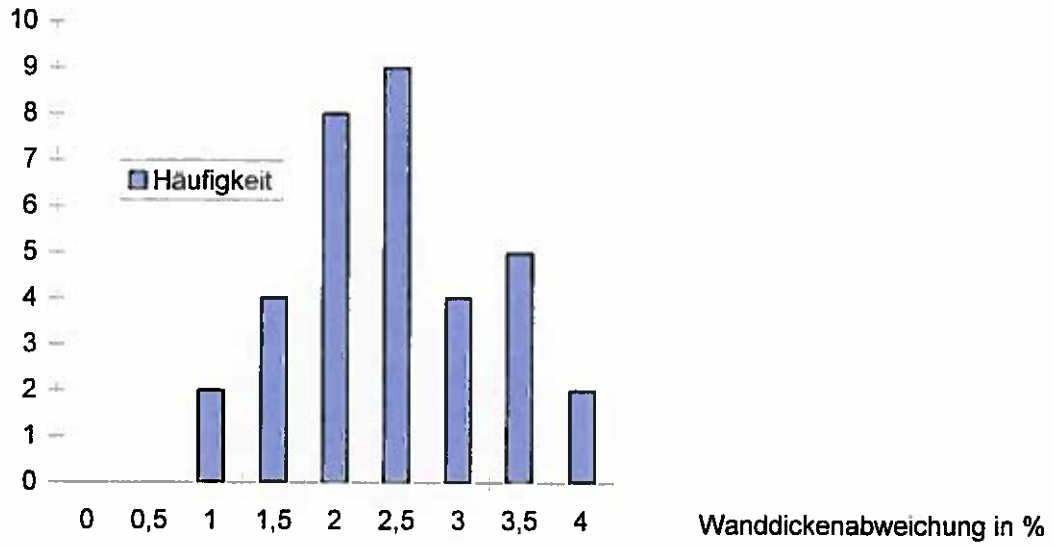


Abbildung 6: Klassifizierung der Ausgangsrohre nach Ihrer Wanddickenabweichung für die Rohre mit einer Wanddicke von 2 mm

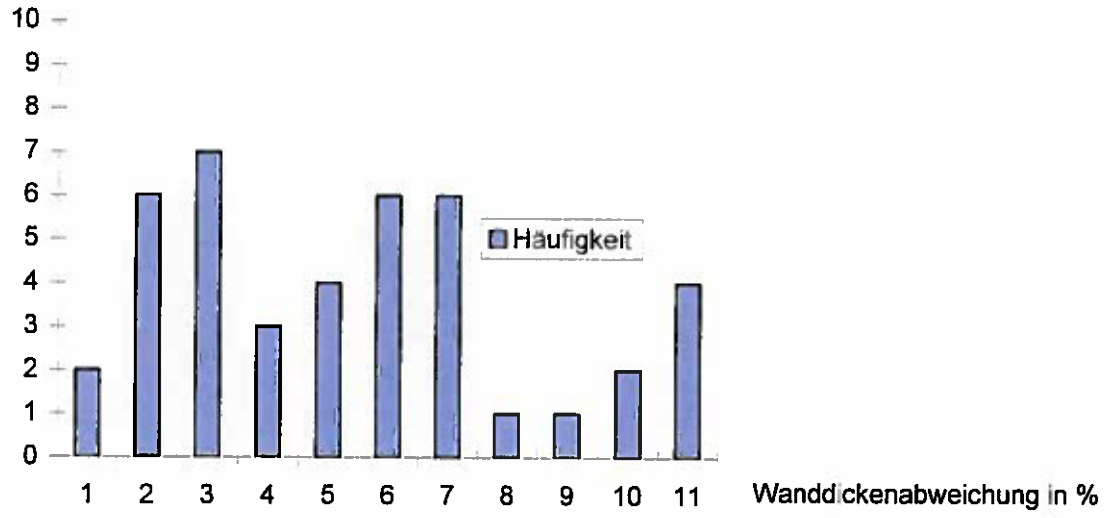


Abbildung 7: Klassifizierung der Ausgangsrohre nach Ihrer Wanddickenabweichung für die Rohre mit einer Wanddicke von 4 mm

Abbildung 8 zeigt vier Rohre mit Exzentrizitäten, die je nach Messlage über identische Toleranzen oder Differenzen im Bereich von knappen 2 % Ungleichwandigkeit verfügen. Abbildung 9 zeigt die Verläufe für fünf Rohre aus gleicher Charge, die die Streubreite bei der Ungleichwandigkeit wiedergeben. Auch hier wird klar, dass die Messung an nur einer Stelle unzureichend ist, um eine Aussage über die Rohrquali-

tät treffen zu können. Auffällig ist zudem die starke Streubreite der einzelnen Rohre untereinander.

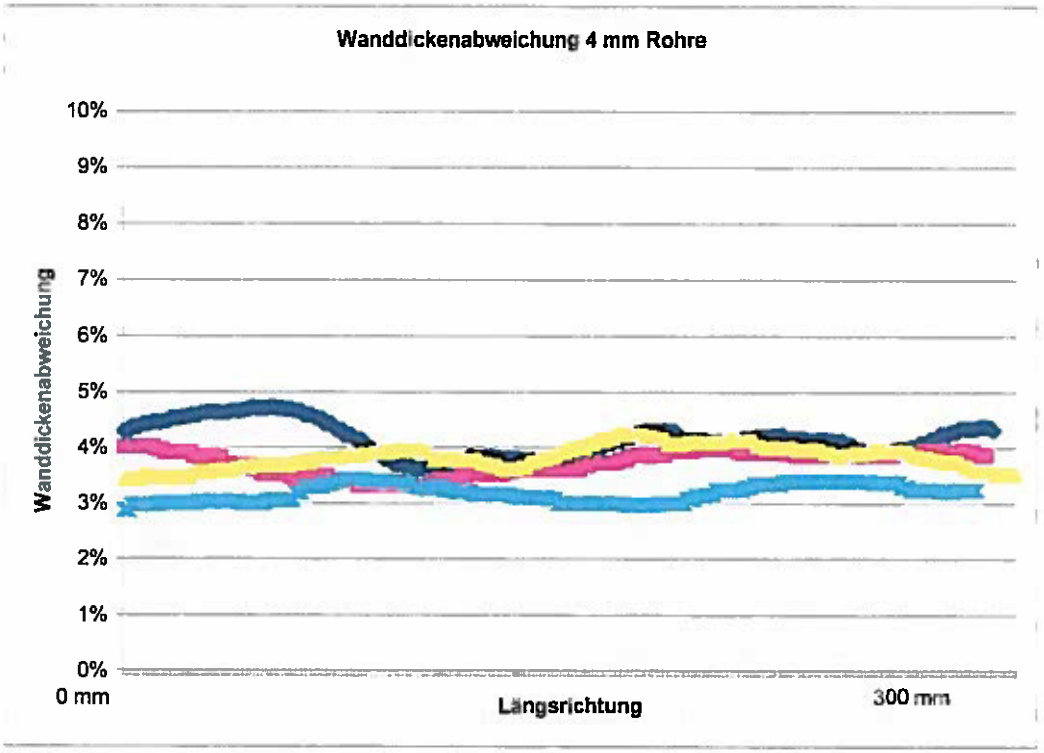


Abbildung 8: Verlauf Wanddickenabweichung in Ziehrichtung über eine Länge von ca. 300 mm für vier Ausgangsrohre mit 4 mm Wandstärke

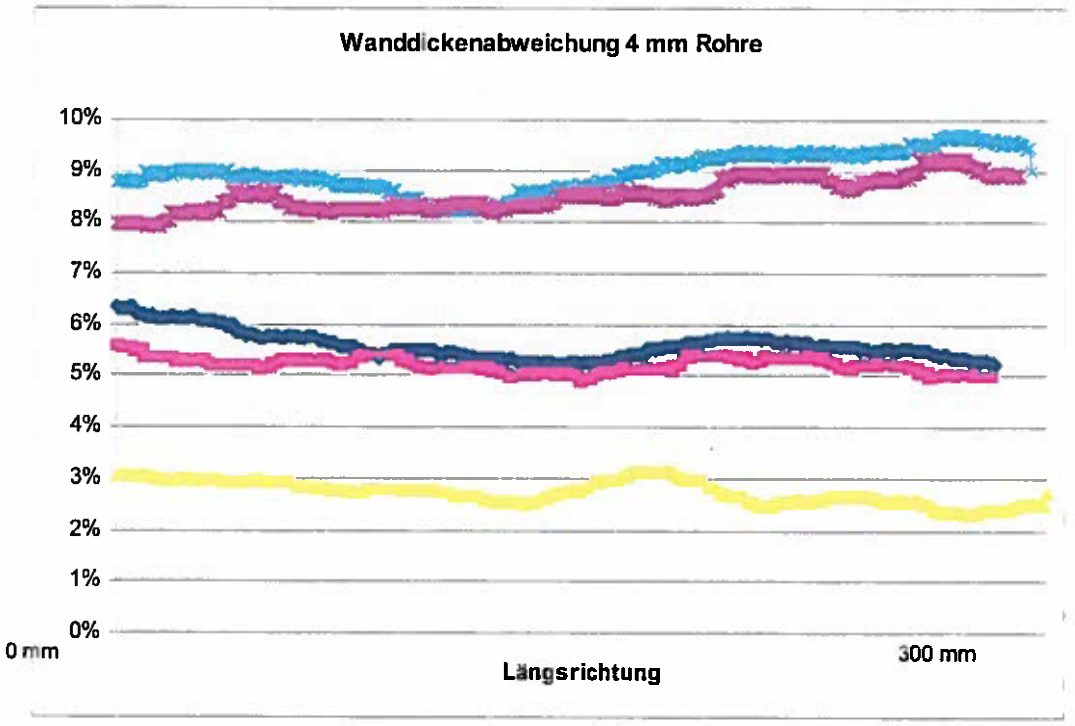


Abbildung 9: Verlauf Wanddickenabweichung in Ziehrichtung über eine Länge von ca. 300 mm für fünf Ausgangsrohre mit 4 mm Wandstärke

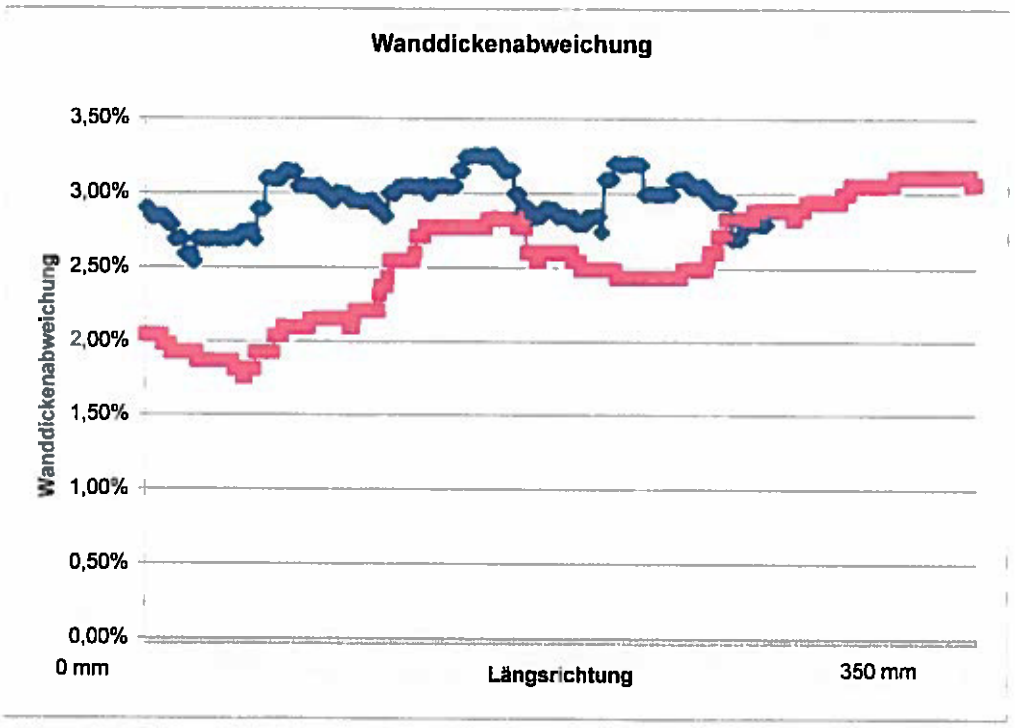


Abbildung 10: Wanddickenabweichung in Zugrichtung für ein ungezogenes (blau) und gezogenes (rot) Rohr auf einer Länge von 300 bzw. 350 mm

Für die Auswertung des Versuchsplanes wurde daher zuerst einmal mit gemittelten Toleranzen über die Messlänge gerechnet. Abbildung 11 zeigt die entsprechend ermittelten Wanddickenabweichungen vor und nach dem Ziehen. Auffällig ist hier, dass die Rohre 24, 23 und 37, die mit den gleichen Ziehparametern gezogen wurden, jedoch unterschiedliche Toleranzen aufwiesen, unterschiedliche Toleranzveränderungen zeigten. Dies unterstützt die These, dass die Eingangstoleranz einen entscheidenden Einfluss auf die Ausgangstoleranz hat und somit einen weiteren wesentlichen Einflussfaktor darstellt. Eine weitere Erklärung hierfür sind zusätzliche Störfaktoren, die nicht aufgenommen wurden, da sie zu Zeitpunkt der Messungen noch nicht als relevant erkannt worden waren und erst nach den in den industriellen Untersuchungen gewonnenen Erkenntnissen in die Überlegungen mit einbezogen wurden.

Die Störfaktoren im Einzelnen:

- Fehlende Führungen vor und nach der Matrize, die einen definierten Materialfluss bzw. Spannungszustand im Ziehhol sicherstellen.
- Die Ziehangel, die bei einer Krümmung für den Rohranfang zusätzliche Momente in den Umformbereich einbringt und somit den Spannungs- und Formänderungszustand deutlich beeinflusst.
- Die Dornbewegung, die einem definierten Materialfluss bzw. Spannungszustand im Ziehhol entgegen wirkt.

Bei der statistischen Auswertung dieser Ergebnisse ergaben sich aus diesen Gründen nicht akzeptable R^2-Werte und Q^2-Werte, respektive Anpassungsgrad und Vorhersagepotential. Eine deutlicher Hinweis darauf, dass diese Faktoren für den industriellen Einsatz nicht die wesentliche Rolle spielen!

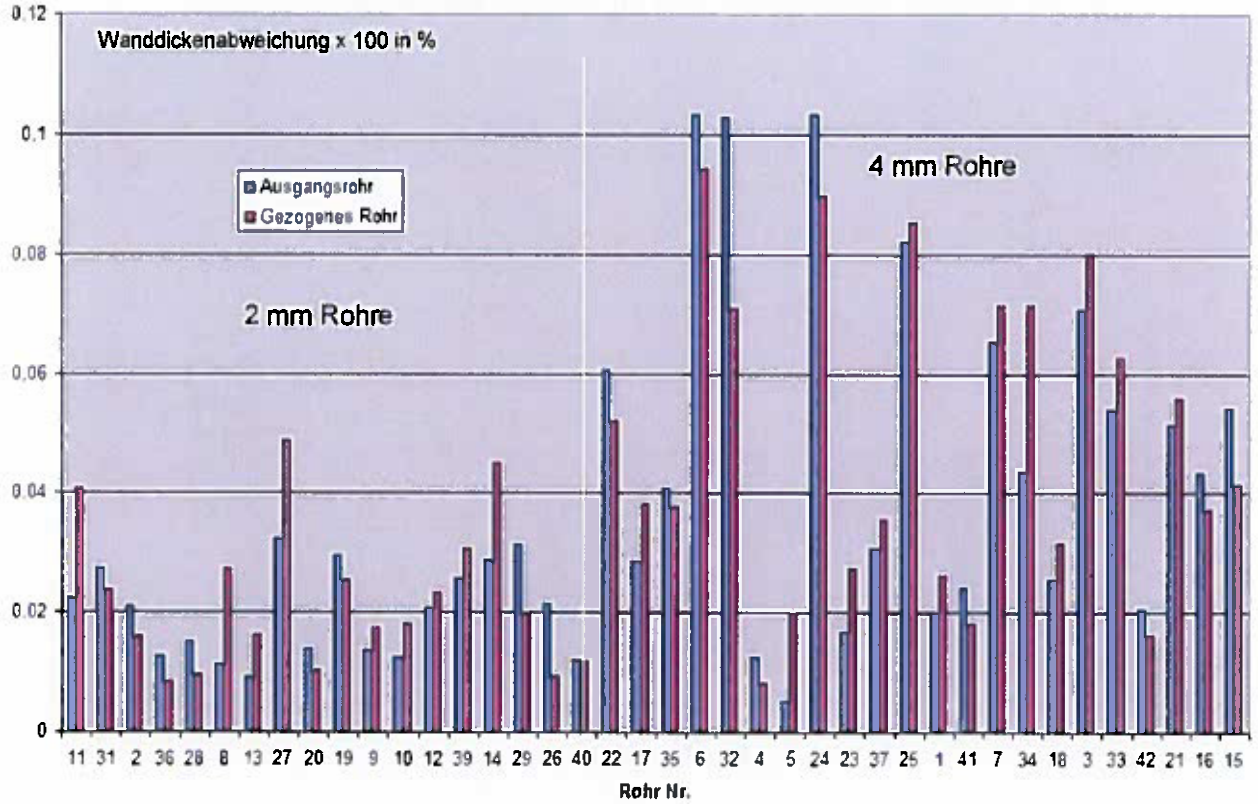


Abbildung 11: Gemittelte Wanddickenabweichungen für die Ausgangsrohre und die dazugehörigen nach Versuchsplan gezogenen Rohre

3.2 Versuche an Industrierohren für eine Ziehfolge

Zur Unterstützung dieser These wurden weitere Untersuchungen in der Produktionslinie eines Herstellers durchgeführt, die diese Ergebnisse in Ihren Aussagen unterstützten.

Die untersuchte Ziehfolge bei diesen Versuchen an Geradeausziehmaschinen für das dickwandigere Ausgangsrohr mit 70 mm Durchmesser war:

70 x 4,0 -> 65 x 3,1

65 x 3,1 -> 55 x 2,5

55 x 2,5 -> 50 x 2,0

An zwei von 85 x 5,0 auf 70 x 4,0 gezogenen Pressrohrstücken, hier mit A und B gekennzeichnet, wurde an drei Stellen (Abbildung 13) die Ungleichwandigkeit gemessen und dort auch mit einem Körner und Marker markiert. Anschließend wurde dieses Rohr in drei Rohre unterteilt, die dann mit der oben beschriebenen Ziehfolge gezogen wurden. Nach jedem Ziehvorgang wurde an diesen gekennzeichneten Stellen erneut gemessen. Die Ergebnisse der Toleranzentwicklung sind in Abbildung 12 dargestellt. Auffällig sind die recht unterschiedlichen Exzentrizitätsverläufe bei gleicher Ausgangsexzentrizität unter –subjektiv– gleichen Fertigungsbedingungen. Es lassen sich drei Schlüsse aus diesen Ergebnissen ziehen:

Grundsätzlich wird die Ungleichwandigkeit mit jedem Zug verbessert, wenn sie größer 1 % ist, darunter bewegen wir uns im Bereich der Messgenauigkeit.

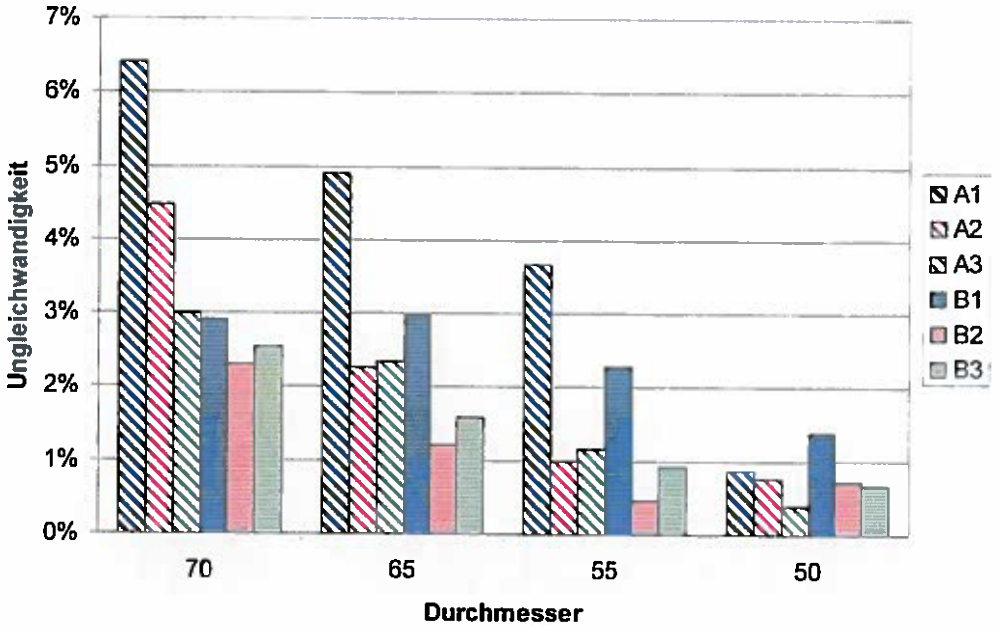


Abbildung 12: Entwicklung der Ungleichwandigkeit für eine Zugfolge

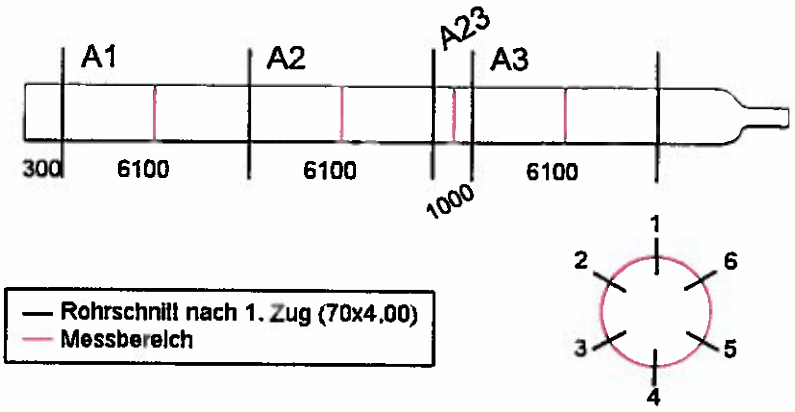


Abbildung 13: Ausgangsrohr für die Versuchsreihe

Unabhängig von der Ausgangstoleranz liegt die Endtoleranz nach dem vierten Zug für fast alle Rohre < 1 %, Der Ausgleich der Ungleichwandigkeit von Zug zu Zug variiert dabei.

Der letzte Punkt macht erneut deutlich, dass eine Parameterstudie mit den für diesen Antrag ausgewählten Einflussfaktoren im industriellen Umfeld praktisch unmöglich ist. So wurde beispielsweise Rohrabschnitt A3 beim ersten Zug in der Ungleichwandigkeit besser, während sich Abschnitt B1 bei gleicher Ausgangstoleranz verschlechterte. Eine Aussage für die hier verwendeten Parameter fällt folglich schwer! Die Aussagen aus den ersten Versuchen, nach einem statistischen Versuchsplan erfolgten Versuchen, finden damit ihre Bestätigung.

Die Ergebnisse der in der Industrie durchgeführten Versuche lassen sich zusammen fassen wie folgt:

Unterschiedliche Exzentrizitätsverläufe in Längsrichtung schon auf relativ kurzen Längen und die unterschiedlichen gemittelten Ausgangstoleranzen stellen eine zu große Fehlerquelle bei der Auswertung der Ergebnisse dar. Die Versuche mussten folglich wiederholt werden, wobei folgende zusätzliche Randbedingungen Berücksichtigung fanden:

- Komplette Wanddickenvermessung der Ausgangsrohre in Längsrichtungrichtung,
- In erster Näherung gleiche Ausgangstoleranz für alle Rohre.

Punkt eins erforderte die Vermessung kurzer Rohrstücke (400 mm) auf der automatischen Wanddickenmesseinrichtung, Punkt zwei zudem eine Herstellung der Rohre unter möglichst reproduzierbaren Laborbedingungen. Die Wiederholung der Versuche unter Laborbedingungen erfolgte bei den nachfolgend diskutierten Versuchen für den gesamten Versuchsplan an der Laborziehanlage der Fa. Bültmann, die im Juni 2007 im Institut in Betrieb genommen wurde und für diese Untersuchungen dann zur Verfügung stand.

3.3 Versuche an der Versuchsziehanlage

Nachdem bei den Versuchen im industriellen Umfeld noch die Fragen offen waren, welche wichtigen Faktoren nicht berücksichtigt bzw. nicht konstant gehalten wurden und welchen Einfluss die zu untersuchenden Faktoren auf die Exzentrizität bzw. Eigenspannungen haben, wurde diese Fragen unter Laborbedingungen untersucht.

In dieser zweiten Phase des Projektes sollten die Ausgangsrohre unter Laborbedingungen mit einer gezielten Exzentrizität hergestellt werden. Die verwendeten Pressrohre stammten aus derselben Presse wie die Rohre, die bei den Industrieversuchen untersucht worden waren. Sie wurden zu Anfang vermessen, und um den Einfluss der Maschine bzw. des Werkzeugs und dessen Ausrichtung gering zu halten, wurde das Wanddickenmaximum bei jedem Versuch an dieselbe Position – oben – platziert.

Für die ersten im Labor hergestellten Vorrohre wurden folgende Ziehfolgen benutzt:

Rohre an 50 x 2,0 (dünnwandig):

85 x 5,0 -> 70 x 4,0 Stopfenzug

70 x 4,0 -> 65 x 3,1 Stopfenzug

65 x 3,1 -> 60 x 2,0 Stopfenzug *-> Rohrriss !*

60 x 2,0 -> 50 x 2,x mit Schrägeinlauf

Rohre an 50 x 4,0 (dickwandig):

85 x 5,0 -> 70 x 4,0 Stopfenzug

70 x 4,0 -> 50 x 4,x mit Schrägeinlauf

Mit einem schrägen Einlauf sollte gezielt eine Ungleichwandigkeit eingestellt werden. Hierzu wurde das Rohr beim Ziehen von Hand ausgelenkt, da eine Apparatur dazu nicht existierte. Beim Ziehvorgang ist selbst bei den dickwandigeren Rohren diese Auslenkung mit geringen Kräften möglich.

Bei diesen Versuchen konnte beobachtet werden, dass die Rohre stark zu schwänzeln begannen, also unter sich stark ändernden Winkeln in die Matrize eingezogen wurden. Dieses „Schwänzeln" ließ sich mit Änderungen in den Exzentrizitäten korrelieren. Auf Grund von Rohrabrissen konnten nicht alle Rohre zu Ende gezogen werden. Ursache hierfür waren die verwendeten Matrizen (Trompetenform, waren vor-

handen) in Kombination mit den gewählten Umformgraden und Toleranzschwankungen der Rohre über die Länge. Bei der Verwendung von speziell für diese Untersuchungen angefertigten Matrizen mit einem kegelförmigen Einlauf und definiertem Übergangsradius traten diese Probleme dann nicht mehr auf.

Zur Unterbindung des Schwänzelns wurden Führungshülsen vor die Matrize montiert. Zum definierten Schrägeinlauf wurde weiterhin eine Rampe vor die Führungshülse montiert.

Mit diesen Maßnahmen ließen sich diese Effekte überwiegend unterbinden bzw. einschränken, jedoch zeigte sich eine Schwachstelle, die weitere Anpassungsmaßnahmen erforderte: Es zeigte sich, dass der deutliche Einfluss der Schrägstellung natürlich eine Auswirkung auf die Geradheit des Rohres hatte. So resultierte aus dem Schrägeinlauf eine Rohrkrümmung, die für die weitere Verarbeitung unzulässig war, da u.a. die Dornstange nicht eingeführt werden konnte.

Die Auslenkung mittels Rampe ließ sich nur mit relativ geringen Auslenkungswinkeln realisieren - daraus resultieren nur geringe Ungleichwandigkeiten - da größere Winkel zu Schwierigkeiten beim Greifen der Ziehangel durch den Ziehwagen führten: Entweder befindet sich die Ziehangel außerhalb der Reichweite der Ziehzange oder die Momente sind zu groß, dass das Rohr den Matrizenblock anhebt.

Auf Grund der geschilderten Probleme wurde die Ziehfolge entsprechend angepasst wie folgt:

Ausgangsrohr: 85x5,0 ->

- mit Dorn, Führung und 78-er Vorsatzmatrize gezogen	an -> 70 x 4,0
- mit Schrägeinlauf und Tischführung (Hohlzug)	an -> 60x4,x
- mit 58-er Vormatrize und 55,7-er Hauptmatrize (Hohlzug)	an -> 55x4,5
- mit Führungshülse + Dorn	an -> 50x4,0

Größter Unterschied zur ersten Ziehfolge waren die beiden Züge nach dem Schrägeinlauf. Der erste dieser Züge diente zur Begradigung des krummen Rohres, der auf Grund der Krümmung als Hohlzug ohne Führung ausgeführt werden muss. Auf Grund der Restkrümmung kann es beim darauf folgenden Zug ebenfalls nicht eng geführt werden. Dieser Zug sorgte aber für die gewünschte Vorabmessung des nun nahezu geraden Rohres. Eine maximale Krümmung von 1 bis 2 mm über eine Länge von 400 mm wird so erzielt. Diese ist ausreichend für die Messungen im Tauchbad mittels Ultraschall. Eine weitere Änderung zu den ersten Versuchen ist die Auslenkung des Rohres, die von Hand erfolgt. Mit einer Leiste wird das Rohr ab dem Zeitpunkt, wo es sich durch die Matrize bewegt, maximal ausgelenkt, also ca. 15 Grad. Dies entspricht dem Ziehwinkel der Matrize. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Nachteile des ganzen Verfahrens die vielen manuellen Eingriffe sind, die nicht immer vorhandenen Führungen, die eine gleich bleibende Qualität für jedes Rohr nicht gewährleisten können.

In Abbildung 14 bis Abbildung 16 sind die Ergebnisse eines repräsentativen Rohres aus eigener Herstellung und von Rohren aus industrieller Produktion dargestellt.

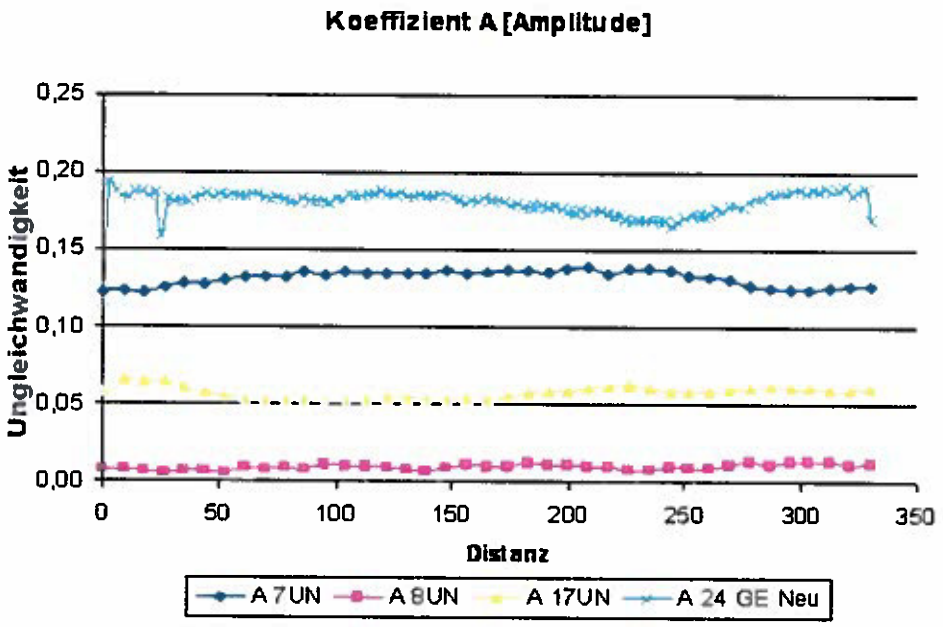


Abbildung 14: Exzentrizität für drei Industrierohre und ein mit Schrägeinlauf erzeugtes Rohr (A 24 GE Neu)

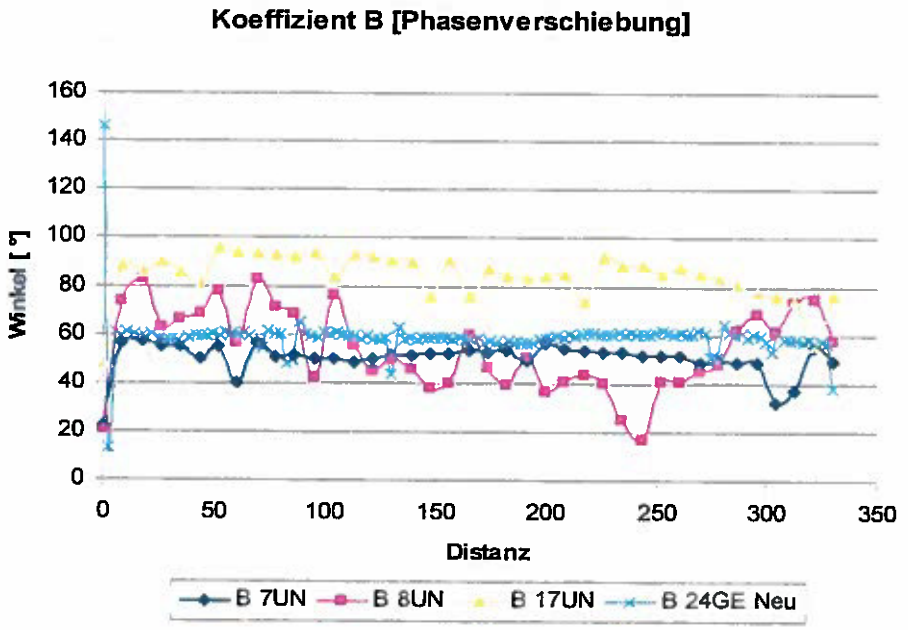


Abbildung 15: Lageänderung des Rohrwandmaximums in Umfangsrichtung über die Rohrlänge für drei Industrierohre und ein mit Schrägeinlauf erzeugtes Rohr (B 24 GE Neu)

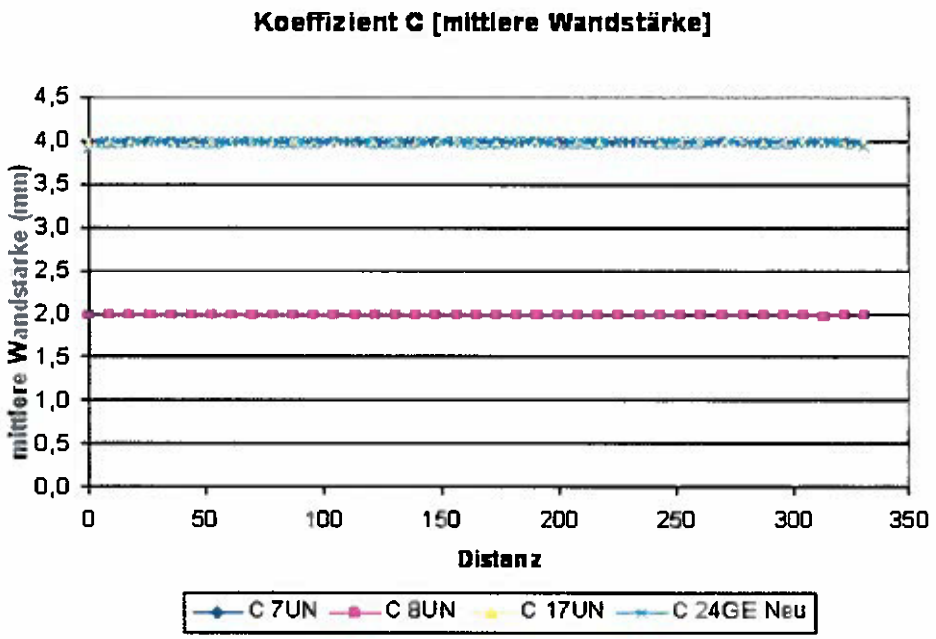


Abbildung 16: Mittlere Wanddicke für ausgesuchte Rohre

Die Ungleichwandigkeit ist immer noch nicht konstant, wohl aber reproduzierbar auf recht hohem Niveau einstellbar. Der Schrägeinlauf ist eine geeignete Größe für die Beeinflussung der Exzentrizität, allerdings ging durch die nachfolgenden Züge zur Begradigung des Rohres dieser Effekt teilweise wieder verloren! Durch die reproduzierbare Positionierung des Wanddickenmaximums beim Ziehvorgang konnten die Phasenverschiebungen ebenfalls minimiert werden. Die mittlere Wanddicke ist bei allen Rohren konstant und stellt keine Variable dar. Dies ist auch nicht anders zu erwarten, da sich bei den verwendeten zylindrischen Dornen bei einer Dornbewegung der Querschnitt des Rohres vom Betrag nicht ändert. Anders sieht es hier natürlich bei Einsatz eines konischen Dorns aus.

Ein weiteres Indiz für die Homogenität der Rohre ist die Härte. Zu ihrer Ermittlung wurden von den erzeugten Rohren Probenabschnitte genommen und in Längsrichtung geteilt. Die Mikrohärte wurde dann auf der Innen- und Außenrohroberfläche in Ziehrichtung mit einem Messabstand von 2 mm gemessen. Auf der Rohraußenseite ergab sich ein recht homogener Härteverlauf, der für die Innenseite deutlich stärkeren Schwankungen unterworfen war. Charakteristische Verläufe sind für zwei auf der Laboranlage hergestellte 50 x 4 Rohre in den Abbildungen Abbildung 16 und Abbildung 1 wieder gegeben. Neben gefügebedingten Unterschieden und der Wirkung der innenseitig freien Umformung im Hohlzugbereich spielt hier sicher der Einfluss des Dornes eine Rolle, der bei seiner Bewegung zu einem entsprechend instationärem Stofffluss mit entsprechender Formänderung führt.

Überlegungen zur Stabilisierung der Dornbewegung sind also nötig, um die Aussagekraft der Ergebnisse zu verbessern. Da diese Dornbewegungen auch den Spannungszustand bzw. Eigenspannungszustand beeinflussen, ist eine kontrollierte Dornbewegung für eine gleich bleibende Rohrqualität unabdingbar. Die durch den Dorn verursachten Materialinhomogenitäten können in Form von Eigenspannungen das Rohr nachhaltig lokal beeinflussen.

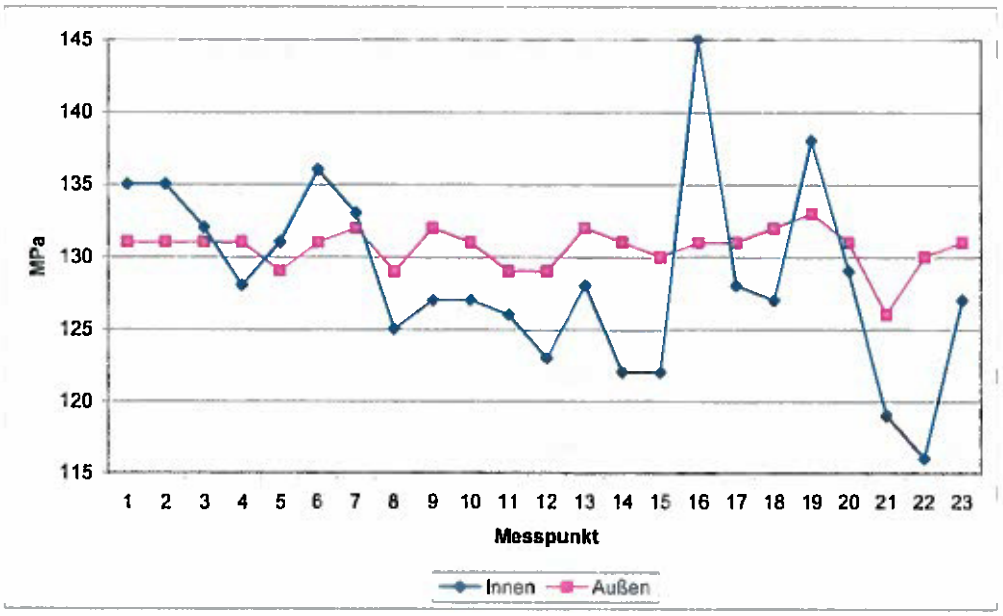


Abbildung 17: Zugfestigkeit aus Härtewerten in Rohrlängsrichtung; 0,1 mm unterhalb der Außen- und Innenfläche, Messpunktabstand 2 mm

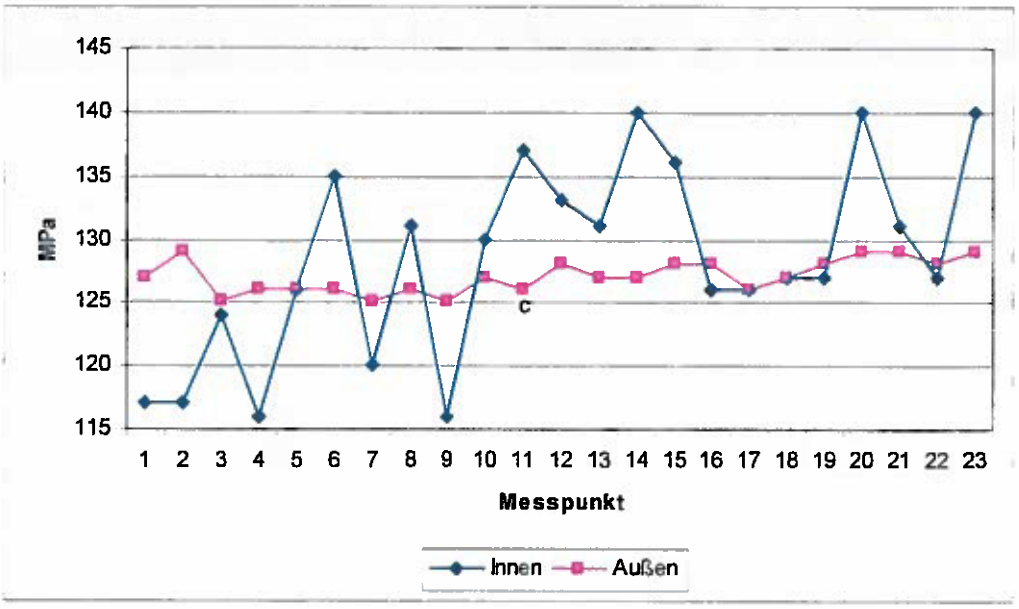
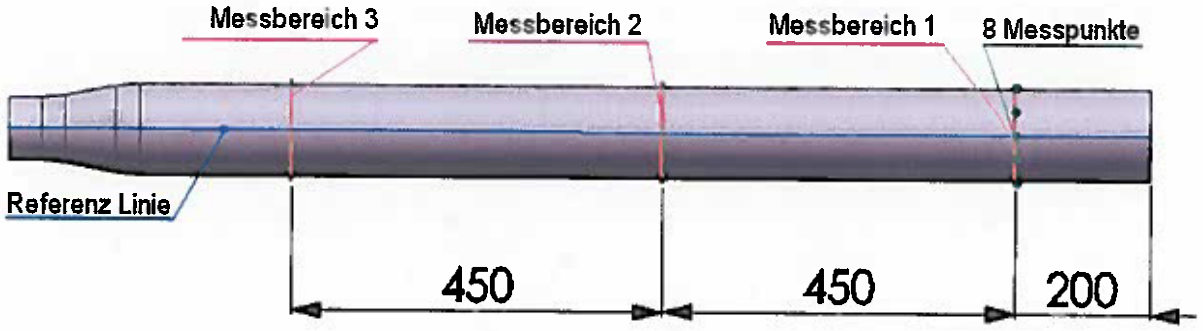


Abbildung 18: Zugfestigkeit aus Härtewerten in Rohrlängsrichtung; 0,1 mm unterhalb der Außen- und Innenfläche, Messpunktabstand 2 mm

3.4 *Versuche mit Einlaufführung an der Laborziehanlage*

Die Erkenntnisse aus den ersten Versuchen, dass eine Führung vor der Matrize die Ergebnisse stärker beeinflusst als die klassischen und ausgewählten Parameter, machten weitere Versuche mit neuen Rohren an einer Versuchsanlage erforderlich.

Hierzu wurden die von der Industrie zur Verfügung gestellten Rohre, die über eine erhöhte - jedoch nicht konstante - Exzentrizität verfügten, zuerst einmal vermessen, um das Wanddickenmaximum zu ermitteln. Abbildung 19 zeigt ein Beispiel einer derartigen Vermessung mit den an acht Stellen über dem Umfang ermittelten Wanddicken. Die Rohre wurden dann mit dem Wanddickenmaximum nach oben unter verschiedenen Einstellungen gezogen. Die Ergebnisse und die dazugehörigen Einstellungen sind in Abbildung 20 zusammen gestellt.



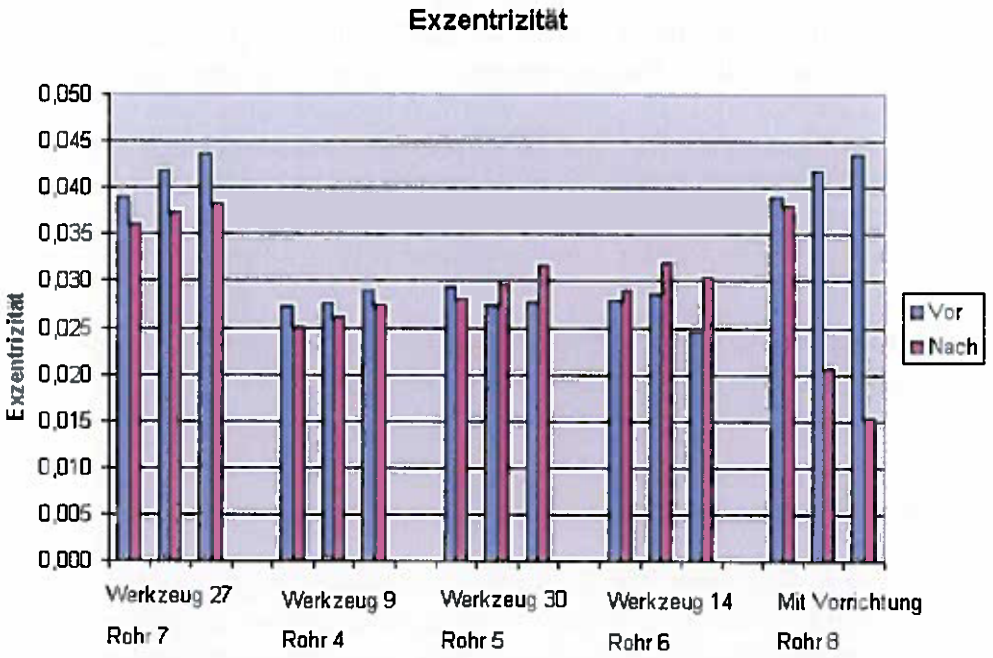
max
min

Rohr 2 Werkzeug 27

		A	B	C	D	E	F	G	H
Vor	Messbereich 1	4,1	4,091	3,996	3,864	3,778	3,779	3,869	4,016
	Messbereich 2	4,111	4,091	3,957	3,824	3,765	3,802	3,925	4,044
	Messbereich 3	4,108	4,092	3,99	3,858	3,775	3,786	3,894	4,026
Nach	Messbereich 1	3,557	3,55	3,461	3,36	3,293	3,309	3,403	3,49
	Messbereich 2	3,552	3,526	3,442	3,35	3,306	3,335	3,422	3,507
	Messbereich 3	3,55	3,528	3,439	3,362	3,318	3,35	3,429	3,502

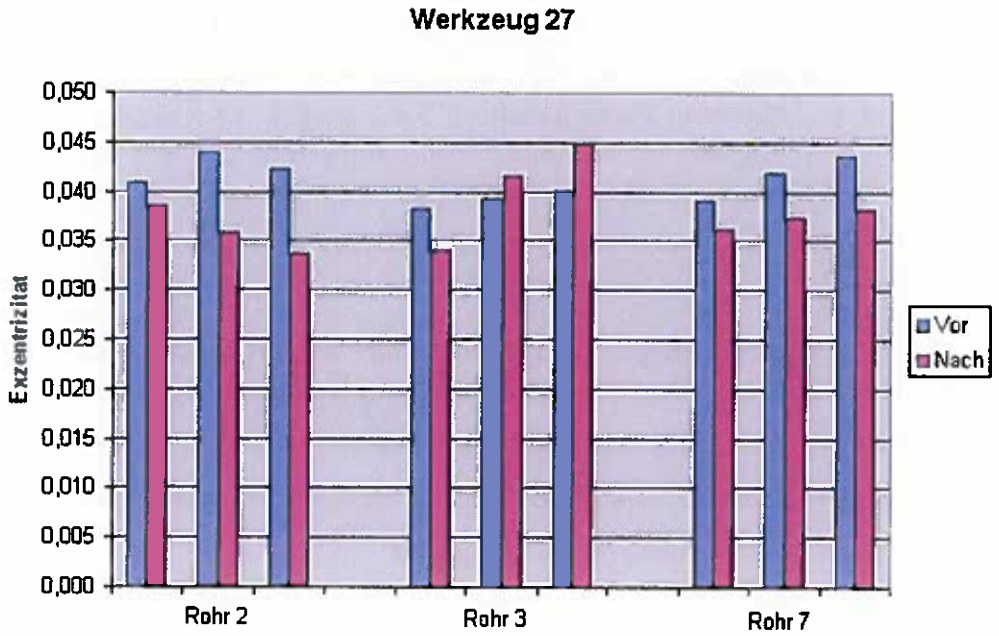
Abbildung 19: Skizze Rohrvermessung für Rohr Nr. 2

Für Rohr 8 (Fertigungsparameter s. Tabelle in Abbildung 20) wurde die Führung gezielt exzentrisch gestellt, um diesen Einfluss zu dokumentieren. Die erwartete Wirkung konnte erzielt werden. Es wurde mit Abstand die größte Exzentrizitätsverbesserung gemessen. Allerdings wurde bei einem Rohr sogar eine Verschlechterung der Exzentrizität über das ganze Rohr gemessen! Ebenso sieht man, dass sich die Veränderungen nur auf niedrigem Niveau abspielen. Dies ist auch verständlich, da sich bei einer starren Einlaufführung das Rohr nicht vor der Matrize auslenken kann. Diese Auslenkung ist aber für starke Exzentrizitätsänderungen notwendig wie durch die Versuche zum Schrägeinlauf gezeigt werden konnte.



Werkzeug Nummer	Matrizenwinkel	Übergangsradius	Zylinder Durchmesser
9	10,00	12,00	38,51
14	20,00	5,00	38,51
27	13,33	8,00	38,51
30	20,00	12,00	38,51

Abbildung 20: Ergebnisse und Werkzeugparameter



Werkzeug Nummer	Matrizenwinkel	Übergangsradius	Zylinder Durchmesser
27	13,33	8,00	38,51

Abbildung 21: Ergebnisse für drei Rohre; Zug unter gleichen Versuchsbedingungen

Für die Versuche mit fixierter Einlaufführung liegt die Standardabweichung für die erzielten Exzentrizitätsdifferenzen bei s = 0,0034. Zur Bestimmung der Standardabweichung innerhalb einer einzelnen Parametereinstellung wurden drei Rohre mit denselben Einstellungen (Werkzeug 27) gezogen. Die Ergebnisse dazu sind in Abbildung 21 zusammen getragen. Die hier gemessene Standardabweichung für die erzielten Exzentrizitätsdifferenzen beträgt 0,0037 und damit sogar über dem Wert für die Versuche mit unterschiedlichen Parameter. Dies ist gleichbedeutend mit der Aussage, dass die untersuchten Parameter keinen erfassbaren Einfluss auf die Exzentrizität haben.

Bei den FEM-Rechnungen sind bei diesen Parametern mit fixiertem Ende auch nur sehr kleine Verbesserungen erzielt wurden.

3.5 Vorbereitung der Versuchsrohre

Aus den Rohren mussten nach dem Zug Rohrstücke in einer Länge von 400 mm abgesägt werden, um ihren Wanddickenverlauf in der automatischen Ultraschall-Messvorrichtung vermessen zu können. Die Lage des Wanddickenminimums und -maximums wurde bestimmt und mit einer Referenzlinie markiert. Auf diesen Referenzlinien wurde dann im Anschluss erneut im 20 mm-Abstand gemessen, um die „Gut-„Bereiche des Rohres für die Versuchsrohrentnahme zu ermitteln. Diese Bereiche wurden dann auf den Rohren gekennzeichnet und herausgetrennt. Ein charakteristischer Schrieb mit instationärem und stationärem Versuchsbereich ist dargestellt in Abbildung 22. „Brauchbares" Material für die weitere Versuchsdurchführung war dann innerhalb des umrandeten Bereiches vorhanden.

Anschließend wurden diese Rohre bei einem Rohrhersteller aus dem projektbegleitenden Ausschuss unter industriellen Bedingungen rekristallisierend geglüht.

Die Verteilung der Exzentrizität dieser auf der Versuchsanlage mittels Schrägeinlauf hergestellten Rohre ist in Abbildung 23 zu ersehen. Sie ist nahezu normalverteilt. Es konnten genügend Proben mit einer Exzentrizität von mindestens e = 3 %, was einer Wanddickenabweichung von 6 % entspricht, hergestellt werden.

Ein weiteres Problem stellte die kurze Rohrlänge von 400 mm dar, die bedingt war durch die Messapparatur. Damit die Ziehangel das Rohr fassen konnte, war eine Mindestanspitzlänge von 180 mm nötig. So wurde nach geeigneten Methoden gesucht, um diesen Anteil am Rohr möglichst kurz zu halten. Als Ergebnis dieser Bemühungen erwiesen sich zwei Methoden als zweckmäßig für unsere Versuche:

- „falsche Ziehangel" mit Verschraubung für die Rohre mit 4 mm Wandstärke
- „falsche Ziehangel" ohne Verschraubung für die Rohre mit 2 mm Wandstärke

Abbildung 24 und Abbildung 25 zeigen diese Lösungen.

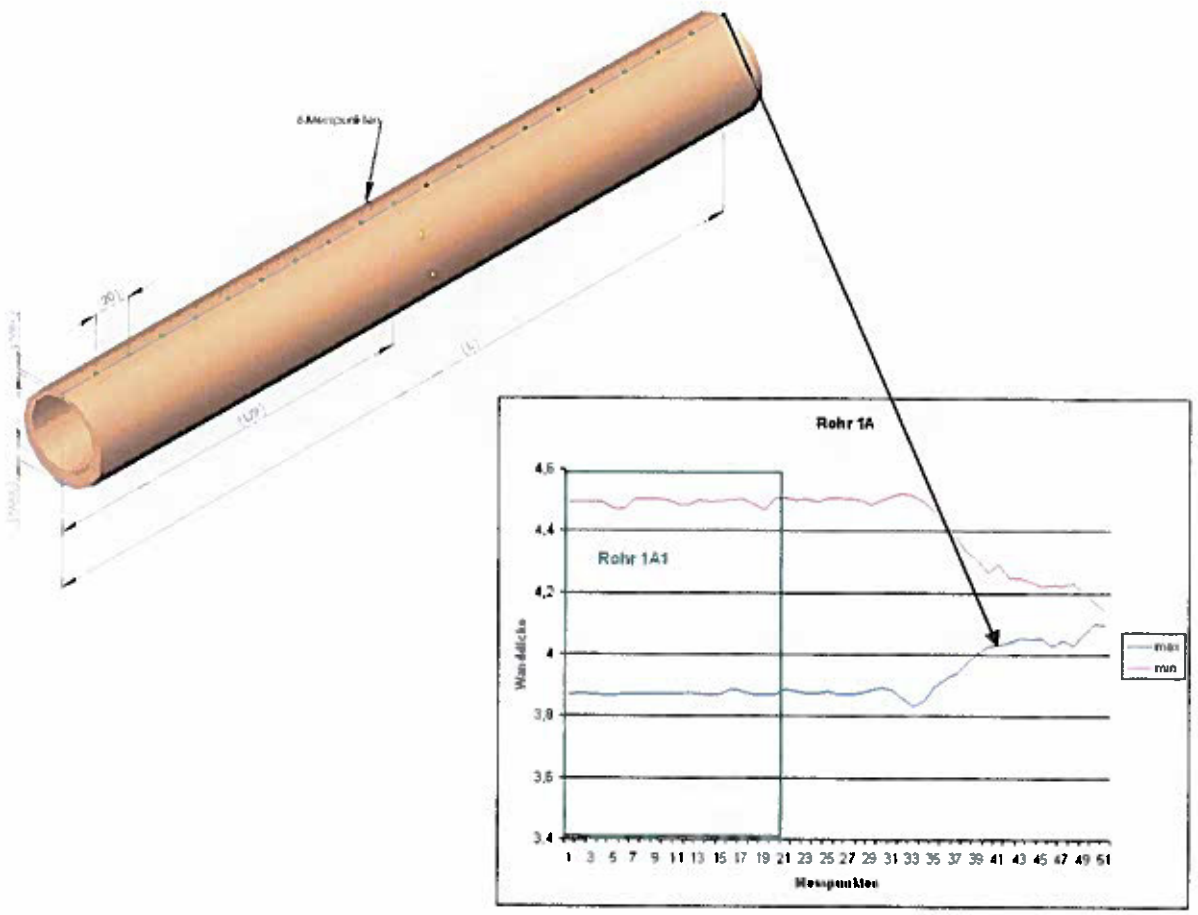


Abbildung 22: Probenentnahme für die weiterführenden Versuche; umrahmter Bereich: Gutprobe (Rohr 1A1) aus Ausgangsrohr 1A

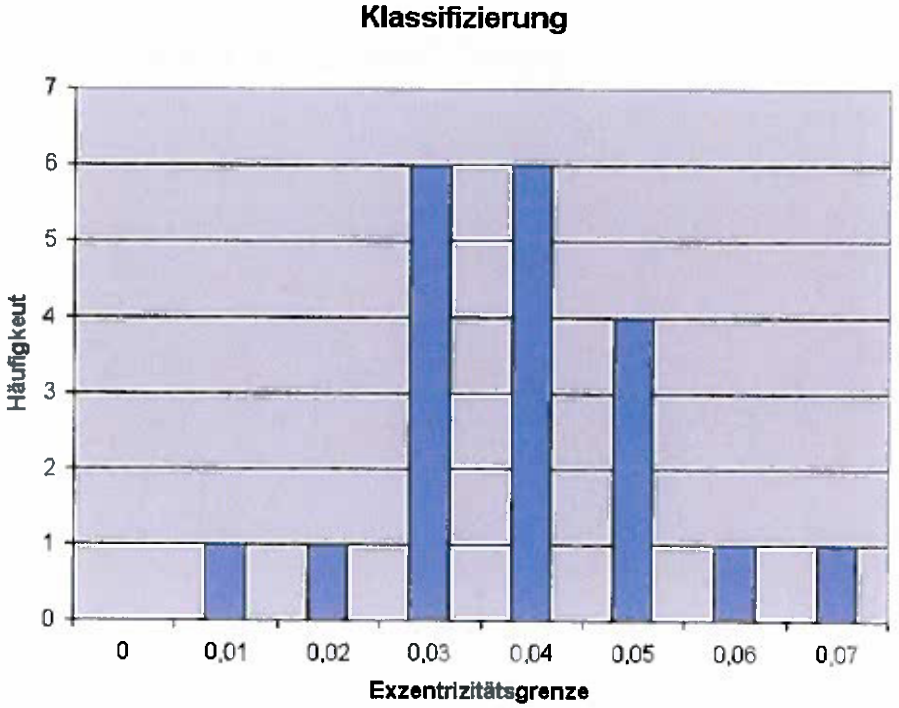


Abbildung 23: Klassifizierung der hergestellten Versuchsrohre nach ihrer Exzentrizität

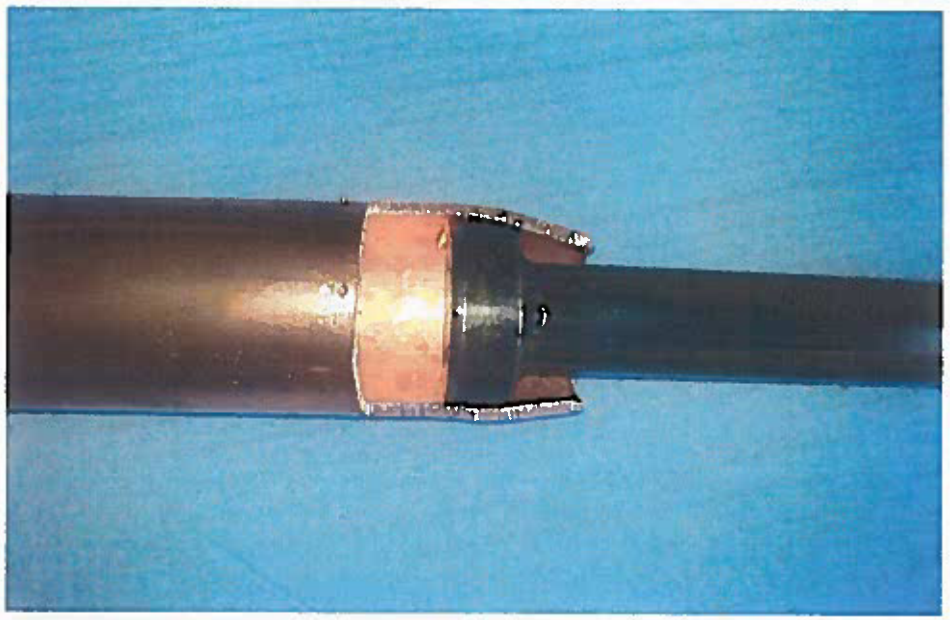


Abbildung 24: Angearbeitete „falsche" Ziehangel für dünnwandige Rohre

Beim dünnwandigen Rohr wurde die Ziehangel auf einer Drehbank durch Andrücken des Rohrkopfes angearbeitet und fixiert. Für die dickeren Rohre konnte diese Methode nicht angewendet werden, da die Andrückkräfte der Drehbank nicht ausreichten, den Kopf einzuformen. Diese wurden daher zuerst am Rohrkopf zusammen gepresst und anschließend die breite Zunge an den Kanten passend abgesägt. Die gehärtete Oberfläche der falschen Ziehangel wurde zusätzlich noch geriffelt, um einen besseren Formschluss zum Rohr herzustellen. Nach dem Einsatz der Ziehangel in das Rohr wurde der Formschluss zusätzlich noch durch Verpressen verbessert, um durch eine Verschraubung dann schließlich einen ausreichenden Kraftschluss zu gewährleisten (Abbildung 25: **Prinzipskizze „falsche" Ziehangel für dickwandige Rohre**).

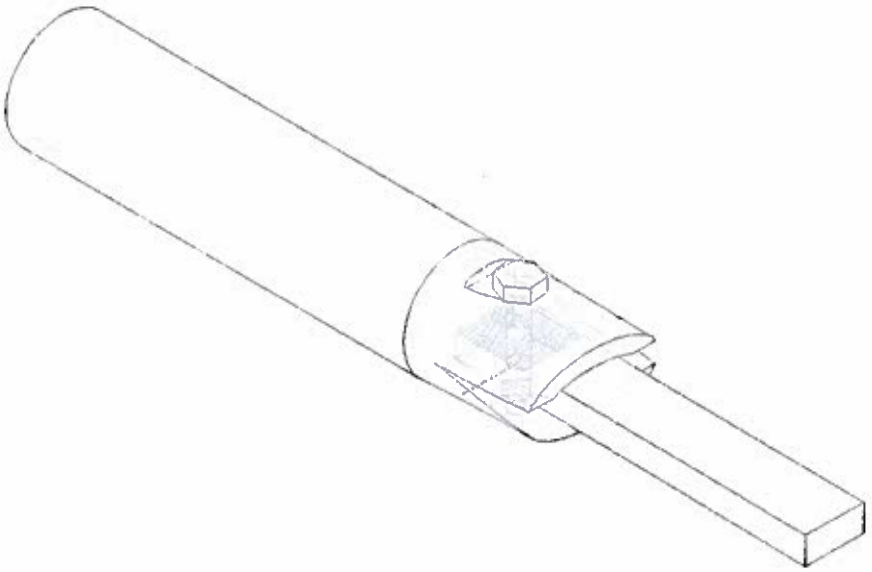
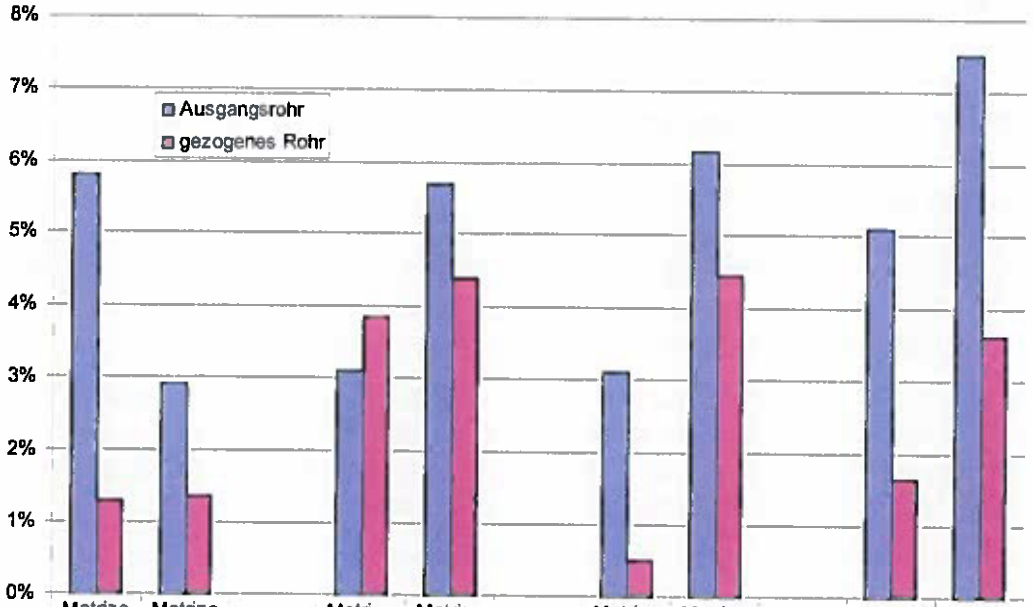


Abbildung 25: Prinzipskizze „falsche" Ziehangel für dickwandige Rohre

Nachteil bei der Konstruktion für dickwandige Rohre sind die durch winkliges und unsymmetrisches Ausbilden der „falschen" Ziehangel verursachten Momente. Ohne Zusatzbauteile bei der Montage ließ sich eine Symmetrie nicht gewährleisten! Hier sind zukünftig andere Verfahrensweisen erforderlich. Aus diesem Grunde beschränkten sich die abschließenden Untersuchungen auf die dünnwandigen Rohre.

Bei diesen Rohren konnte durch eine Verlängerung der Ziehangel mit einem dünnen, recht flexiblen Stahlrohr die Ausbildung unzulässiger Momente vermieden werden. Da jedoch eine Stabilität fehlte, liefen die Rohre schräg aus. Deshalb wurde die Ziehangel wieder starr mit dem Ziehwagen ausgelegt. Bei diesen kurzen Stücken von ca. 370 mm diente dabei allein die Dornstange als Führung vor der Matrize!

Die Messdaten für die Ungleichwandigkeit sind für diese Versuchsreihen in Abbildung 26 zusammen gestellt. Auch hier streuen die Ergebnisse für identische Versuchsreihen, speziell bei den Rohren mit Kennzeichnung Matrize 14, so dass das Rohr mit 3,1% Ausgangsexzentrizität als Ausreißer gewertet wird. Bei dem großen Übergangsradius von 12 mm haben alle Rohre die größte Reduzierung erfahren, wobei jedoch dieser Effekt nicht allein stehend gesehen werden darf. So konnten in der Kombination von großem Radius mit großem Winkel die besten Ergebnisse erzielt werden, während bei kleinem Radius und kleinem Winkel (Matrize 27), das schlechteste Ergebnis erzielt wurde.



	Matrize 30	Matrize 30	Matrize 27	Matrize 27	Matrize 14	Matrize 14	Matrize 9	Matrize 9
Ausgangsrohr	5,80%	2,90%	3,10%	5,70%	3,10%	6,15%	5,10%	7,50%
gezogenes Rohr	1,30%	1,38%	3,86%	4,38%	0,52%	4,45%	1,64%	3,61%

Werkzeug Nummer	Matrizenwinkel	Übergangsradius	Zylinder Durchmesser
9	10,00	12,00	38,51
14	20,00	5,00	38,51
27	13,33	8,00	38,51
30	20,00	12,00	38,51

Abbildung 26 Ergebnisse Exzentrizitätsmessungen für die Rohre aus eigener Fertigung

3.6 Eigenspannungsmessungen

Nachdem bereits im Antrag der Stand der Technik in der Berechnung der Einflussfaktoren auf den Eigenspannungszustand von axialsymmetrischen, idealen Rohren vorgestellt wurden, lag das Augenmerk bei diesen Untersuchungen in der Erweiterung der Ansätze durch Einbeziehung der Auswirkung der Exzentrizität auf die Verteilung der Eigenspannungen in Umfangsrichtung. Der Einflussfaktor „Exzentrizität" wurde bis dato noch nicht in Zusammenhang mit der damit verbundenen Beeinflussung der Eigenspannungen betrachtet. Die hier gewonnenen Ergebnisse sollten weiterhin zur Verifizierung des ebenfalls zu entwickelnden FEM-Modells dienen. Grund für diese Überlegungen sind die bei ungleichwandigen Rohren aus den unterschiedlichen Formänderungen in Umfangsrichtung erwachsenden Eigenspannungen, die sich entsprechend auswirken müssen. Die Messungen von Eigenspannungen wurden sowohl zerstörungsfrei als auch zerstörend durchgeführt.

Bei der zerstörenden Messung mittels Bohrlochmethode wird lokal die elastische Rückfederung, die auf Grund des durch das eingebrachte Bohrloch gestörten Gleichgewichts auftritt, erfasst und ausgewertet. Als Messsystem wurde das MTS 3000 der Firma HBM verwendet. Nachteil dieses Verfahrens ist neben dem erhöhten Platzbedarf der applizierten DMS-Rosetten, die relativ geringe Messtiefe und abnehmende Sensibilität über die Tiefe, so dass nur oberflächennahe Spannungen an der äußeren Rohraußenfläche bis ca. 1-1,5 mm Tiefe sinnvoll ermittelt werden können.

Bei der zerstörungsfreien Methode mittels Neutronenstrahlung wird die Änderung des Gitterabstandes im Metallgitter infolge der vorherrschenden Spannung ermittelt. Vorteil dieser Methode ist die hohe Eindringtiefe; Messungen von Spannungsprofilen über die ganze Wanddicke sind möglich. Nachteile sind die im Vergleich zur röntgenographischen Spannungsmessung oder zerstörenden Messungen extrem hohen Kosten, die langen Messzeiten und die aufwändige Antragstellung zur Reservierung entsprechender Messzeiten. Auf die zerstörungsfreie Prüfung mittels Röntgenstrahlung wurde wegen der geringen Eindringtiefen ebenfalls verzichtet.

Bereits in Vorversuchen konnte neben einem in etwa spiralförmigen Wanddickenverlauf in Längsrichtung eine starke Inhomogenität bei den Eigenspannungsmessungen mit dem Schlitzverfahren, das allerdings nur grobe Mittelwerte über die gesamte Wandstärke liefert, für die tangentiale und longitudinale Richtung festgestellt werden.

Bei den Messungen mittels Bohrlochverfahren, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes durchgeführt wurden, wurde jeweils an drei Punkten im Wanddickenminimum und an drei gegenüberliegenden Punkten auf gleicher Höhe im Wanddickenmaximum gemessen. Die drei Messpunktepaare waren jeweils ca. 70 mm von einander in Ziehrichtung entfernt. Es wurden dieselben Industrierohre, die nach dem statistischen Versuchsplan gezogen wurden, verwendet. Hierzu wurde bei diesen Versuchsrohren im mittleren Bereich ein Rohrstück mit einer Länge von ca. 400 mm entnommen und dann mit einem Abstand von mindestens 100 mm zu den Stirnflächen die sechs beschriebenen Messpunkte mit DMS präpariert. Der Abstand von mindestens 100 mm von Stirnflächen ist erforderlich, da es zur Stirnfläche hin schon zunehmend zu Entspannungen kommt. In Abbildung 27 sind die Ergebnisse für zwei Rohre dargestellt, die repräsentativ für die Eigenspannungsergebnisse mittels Bohrlochmethode stehen. Die Rohre entstammen der Fertigung aus Kapitel 3.1. Daten der Rohre sowie geometrische Daten der Werkzeuge sind in den Tabellen 1 und 2 aufgelistet.

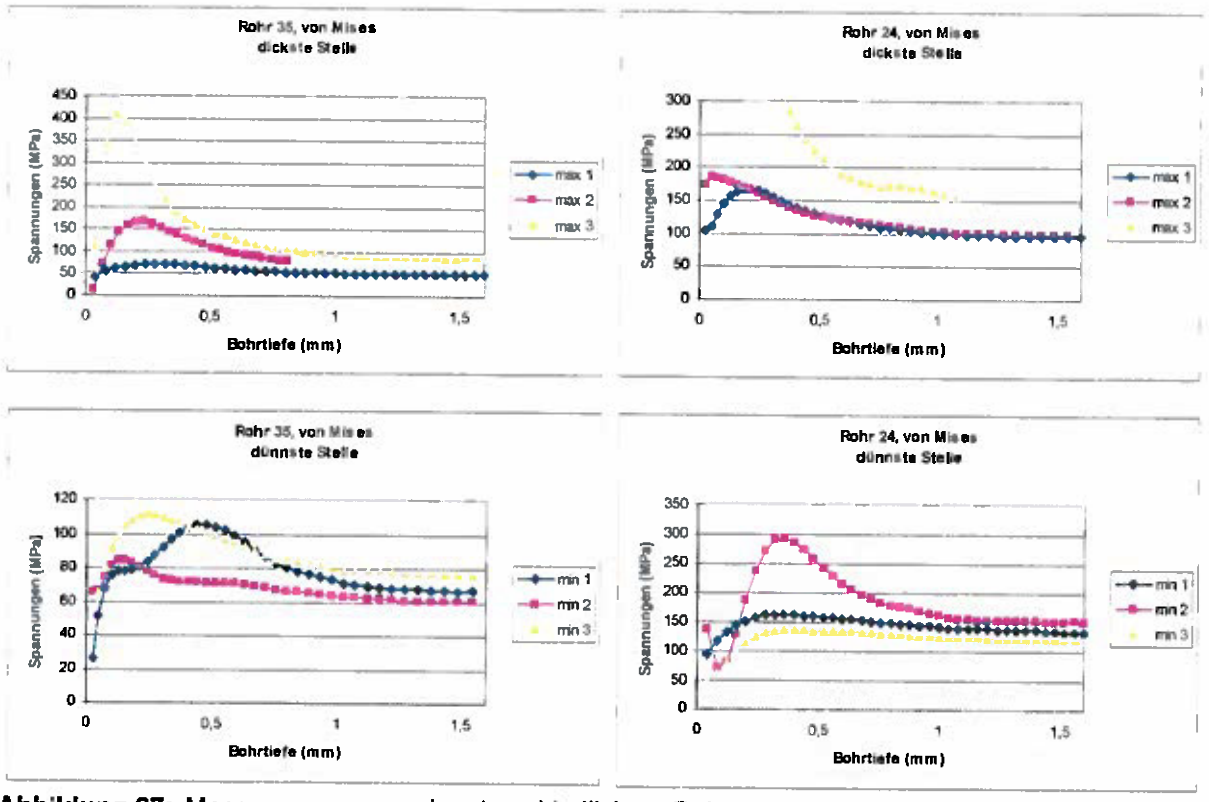


Abbildung 27: Messungen an zwei unterschiedlichen Rohren im Wanddickenminimum (min) und -maximum (max)

Rohr-bezeich-nung	Dorn Ø (mm)	Umform-grad φ	Matrize (Nr)	Außen- Ø (mm)		Mittlere Wand-stärke (mm)		Exzentrizität (%)	
				vorher	nachher	vorher	nachher	vorher	nachher
Rohr 24	38.00	0.2	35	50.0	45.24	4.0	3.62	5.0	4.5
Rohr 35	35.34	0.4	26	50.0	41.70	4.0	3.20	2.0	1.9

Tabelle 2: Spezifikationen der Rohre 24 und 35

Matrize Nr.	Winkel (°)	Radius (mm)	Zylindrische Länge (mm)	Ausgangsdurch-messer (mm)
26	20	5	10	41.74
35	15	12	10	45.24

Tabelle 3: Geometrien der verwendeten Matrizen

Die Ergebnisse zeigen eine starke Streuung der Eigenspannungen für Messpunkte, die aufgrund der gleichen Position in Ziehrichtung bei konstanten Randbedingungen identische Spannungsverläufe aufweisen sollten.

Mögliche Ursachen sind - wie schon bei den Exzentrizitätsmessungen ausgeführt - Oberflächeneinflüsse des Rohres und der instationäre Materialfluss über die Länge, bedingt durch fehlende Führungen und die Dornbewegung. Diese Fehlerquellen müssen sich natürlich auch auf den Eigenspannungszustand auswirken. Auch bei Betrachtung der einzelnen Spannungsniveaus lässt sich hier kein eindeutiger Zu-

sammenhang mit Literaturergebnissen feststellen. Rohr 35, gezogen mit den für die Spannungsentwicklung ungünstigeren Parametern, also großer Winkel und kleiner Radius, weist - wider Erwarten - die im Vergleich kleineren Spannungen bei der Messung auf.

Ein Teilstück aus der Fertigung von Rohr 35 wurde im Sychrotron am ILL in Grenoble untersucht. Die Ergebnisse dieser Messungen über die Wanddicke des Rohres sind in Abbildung 28 wieder gegeben. Gemessen wurde wiederum an je drei Stellen über die Rohrlänge im Wanddickenmaximum und -minimum, die in Ziehrichtung jeweils um ca. 150 mm entfernt lagen und mit B0, A0 und A150 gekennzeichnet sind.

Im Wanddickenmaximum sind bei diesem Rohrstück zueinander ähnliche Verläufe gemessen worden. Im Wanddickenminimum gab es dagegen wieder stärkere Streuungen. Es ist zu beachten, dass bei den Messungen mit einem minimalen Messfleck von ca. 0.5 mm² gearbeitet wurde, um das Wanddickenprofil aufnehmen zu können. Die Diagonale dieser Messfläche von rund 1,0 mm in radialer Richtung liefert also nur Mittelwerte über die jeweilige Messlänge von ca. 1 mm. Insofern gibt es eine recht gute Übereinstimmung beim Vergleich mit den Bohrlochmesswerten. Die starken Gradienten im Oberflächenbereich konnten aufgrund der unterschiedlichen Messmethode nicht bestätigt werden. Auch der tendenzielle Verlauf ab 0,2 mm unter der Außenoberfläche stimmt korreliert nicht in allen Fällen.

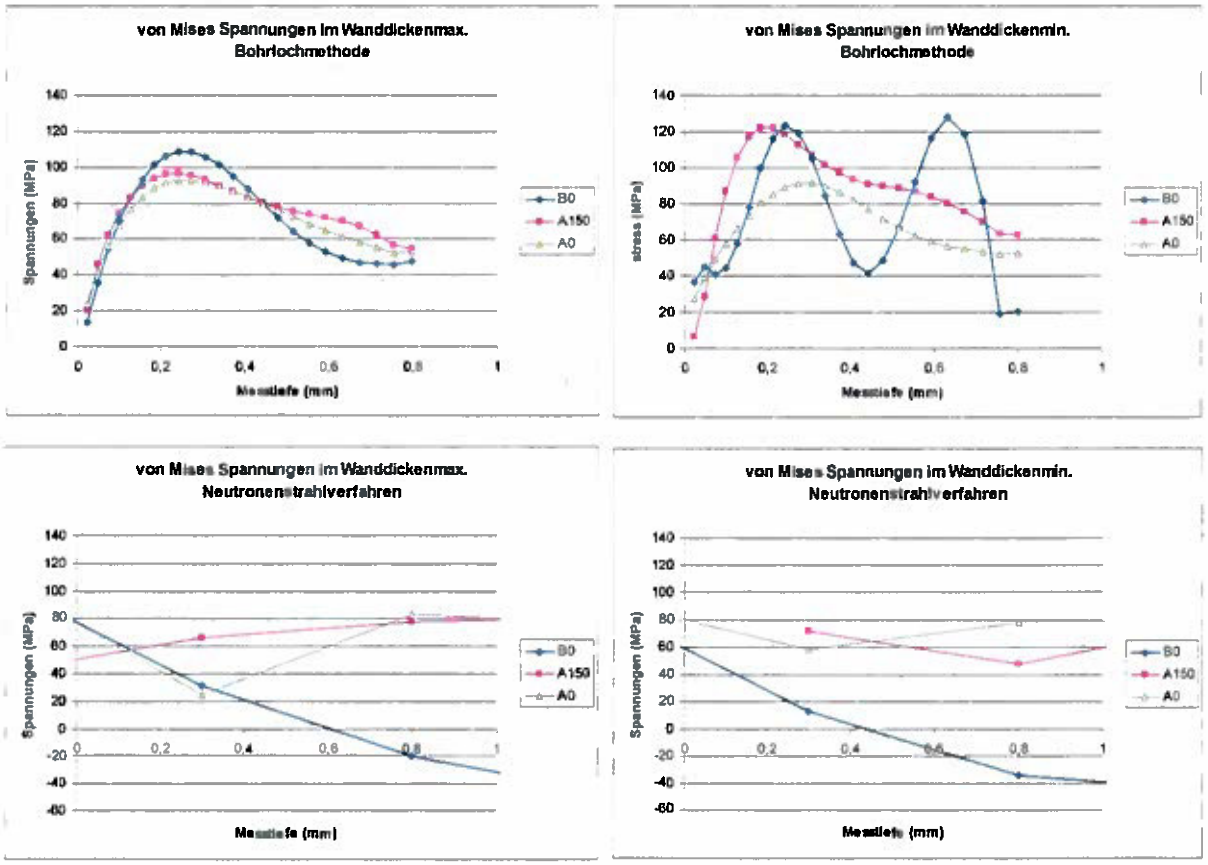


Abbildung 28: Vergleich der Ergebnisse für unterschiedliche Messmethoden

Eine weitere Messung konnte an demselben Messinstrument an Rohr Nr. 24 durchgeführt werden. Gemessen wurde dieses Mal über die Wanddicke in radialer Richtung in elf Punkten von Innen nach Außen an jeweils vier Positionen in Umfangsrich-

tung. Bei 90° war das Wanddickenmaximum und bei 180° Wanddickenminimum positioniert.

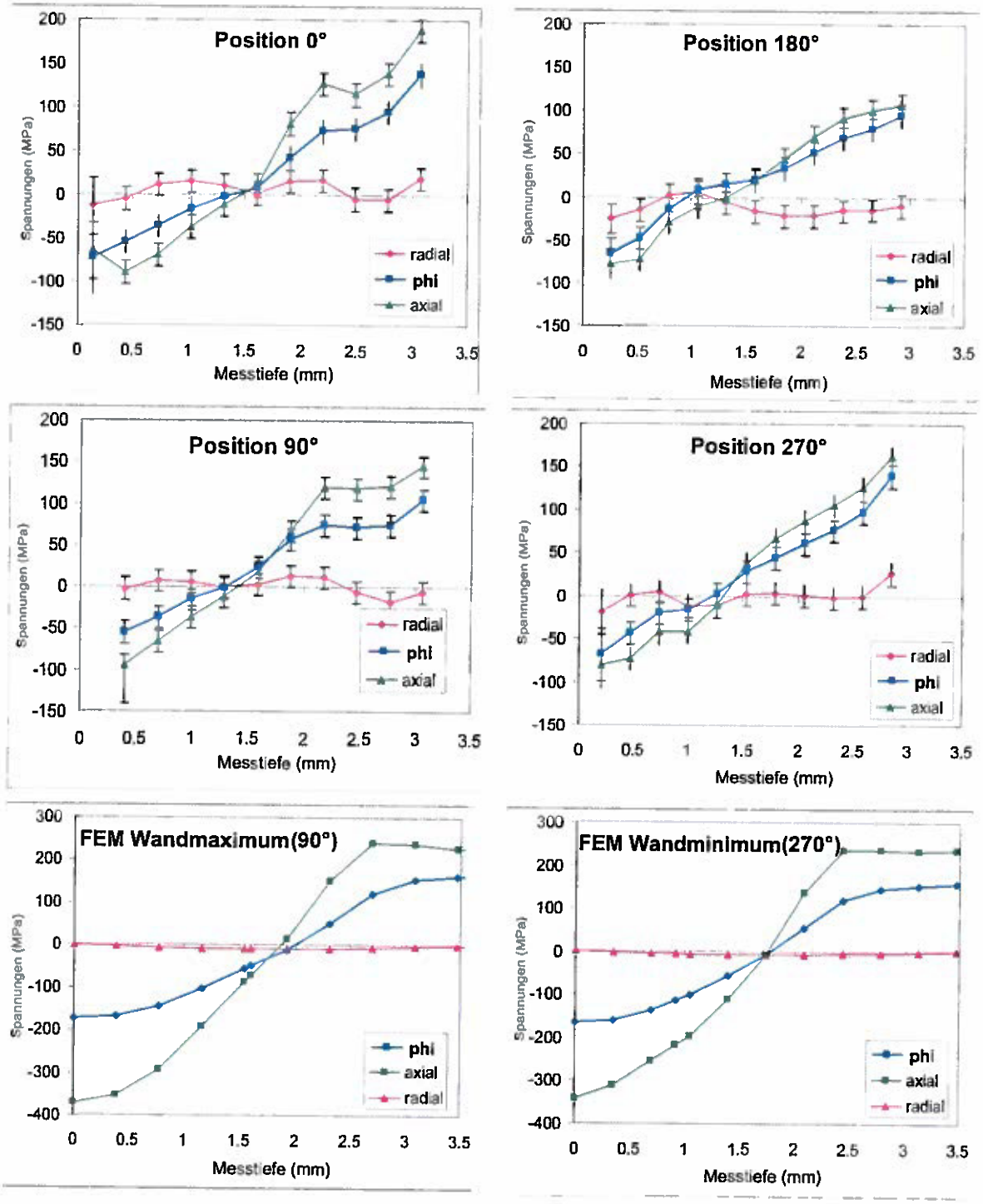


Abbildung 29: Vergleich der Eigenspannungen aus der Neutronenmessmethode und FEM-Simulation in radialer, axialer und tangentialer Richtung; gemessen von innen nach außen

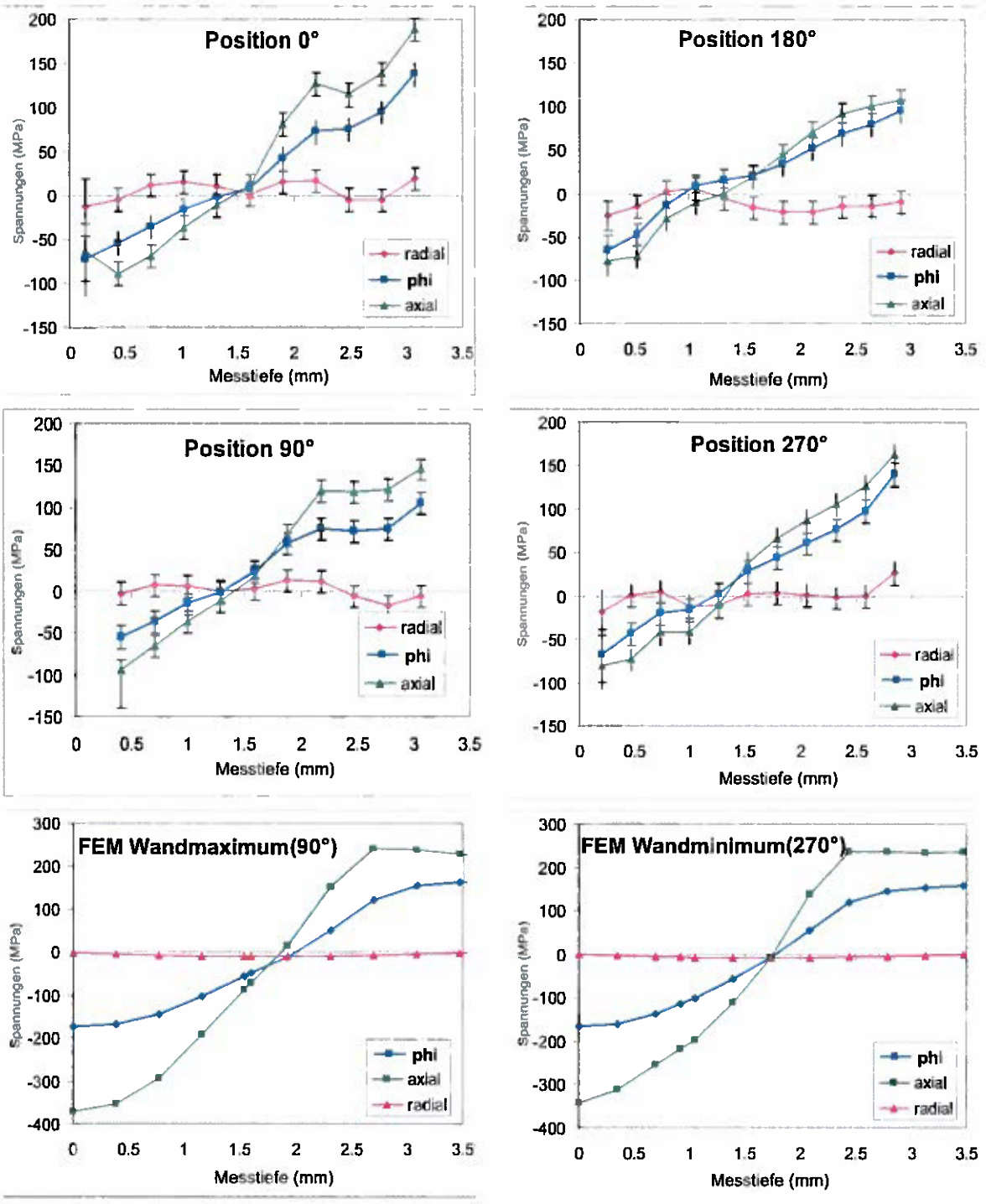


Abbildung 29 sind die Ergebnisse für diese Messungen dargestellt. Sie zeigen eine recht gute Übereinstimmung mit den Simulationswerten. Auf Grund der Symmetrie bei der Wanddickenverteilung würde man unter idealen bzw. symmetrischen Randbedingungen jedoch eine deutlichere Übereinstimmung zwischen 0° und 270° erwarten, jedoch stimmen die Werte für die Positionen 0° und 90° besser überein. Hier ist das Plateau im Bereich der Rohraußenwand deutlich bei beiden vorzufinden. Ursachen hierfür dürften in den Schwankungen bei der Prozessführung zu suchen sein, die schon zuvor bei den Messergebnissen für die Industrierohre in Kapitel 3.1 diskutiert wurden. Das Fehlen von Führungen scheint sich auch hier deutlich stärker auf den Eigenspannungszustand bemerkbar zu machen, als die vorliegende Exzentrizität.

Bei Messungen an den unter Laborbedingungen selbst hergestellten Rohren (siehe Kapitel 3.3.1), die mit einer in Ziehrichtung konstanten Exzentrizität sich von den industriellen Ausgangsrohren unterschieden und im Hohlzugverfahren gezogen wurden, ließen sich wesentlich konstantere und reproduzierbarere Ergebnisse erzielen, wie aus Abbildung 30 hervorgeht. Hier wurde mit Führung und ohne Dorn gezogen, folglich wurden zwei wesentliche Störfaktoren eliminiert.

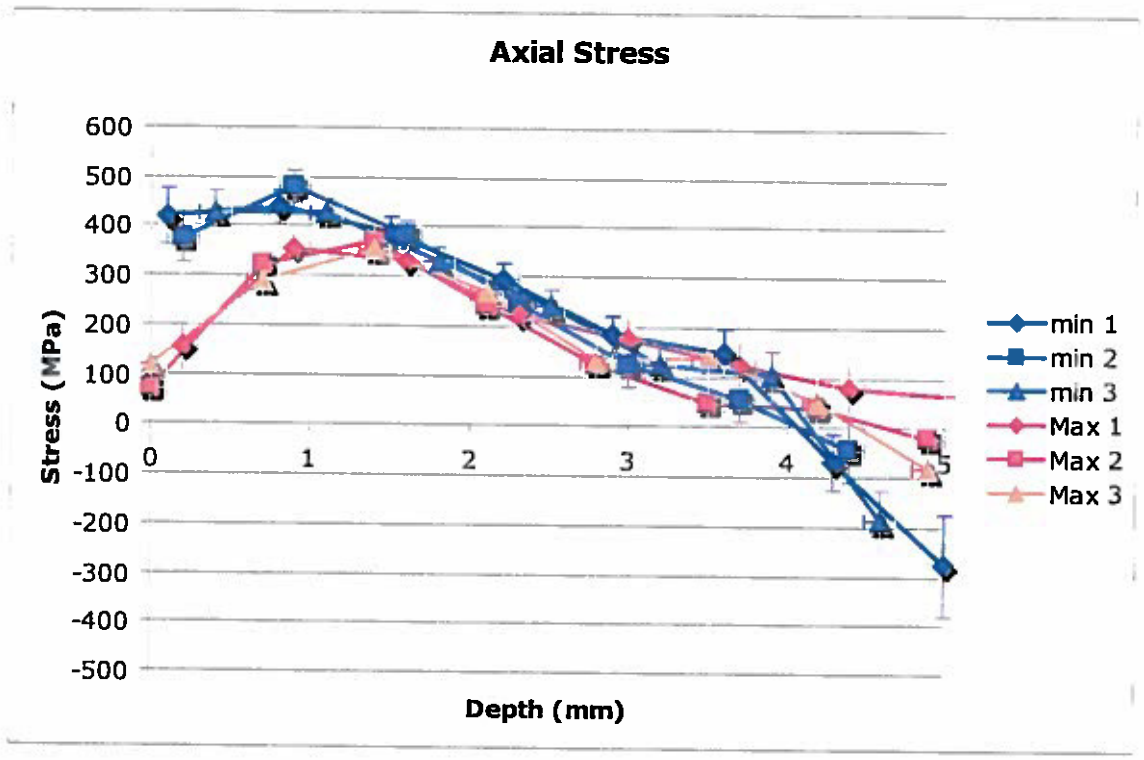


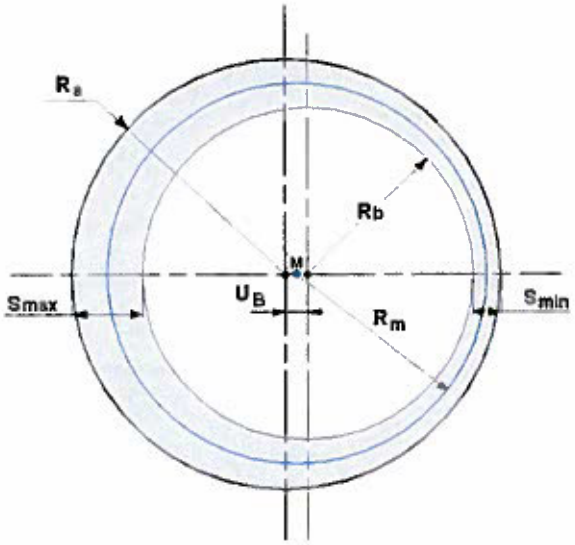
Abbildung 30: Spannungen in Axialrichtung für je drei Messpunkte im Wanddickenmaximum und –minimum für ein hohlgezogenes Rohr mit Matrize NR. 11

Mit Hilfe des am Institut entwickelten FEM-Modells sollte auch die örtliche Verteilung der Eigenspannungen über den gesamten Rohrquerschnitt ohne diese störenden Randeffekte abgebildet werden. Im Gegensatz zu den Modellen, die bisher immer von einem rotationssymmetrischen Rohr ausgegangen sind, lassen sich Differenzen in Umfangsrichtung eindeutig aufzeigen (vgl. Kapitel 3.9)

3.7 FEM-Modell

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens sollte ein FEM-Modell für die Untersuchungen von Eigenspannungen und Änderungen der Exzentrizität in Kupferrohren für verschiedene Einflussfaktoren entwickelt werden. Die Simulation wurde abgestimmt auf die Geometrien, die auch industriell und im Labor untersucht wurden, vornehmlich Rohre 50 x 2, also mit 2 mm Wandstärke bei einem Außendurchmesser von 50 mm. Die Exzentrizität lag bei U_b =5%. Ihre Definition ist aus Abbildung 31 zu entnehmen, die Geometrie der Werkzeuge ist in Abbildung 32 bzw. Tabelle 4 wiedergegeben.

Die bei den Versuchen eingesetzten Dorne wiesen eine Durchmesserreduktion von 0,2 mm auf einer Länge von 70 mm auf. Diese Geometrie wurde auch für die Modellierung übernommen. Für die Modellierung und Simulation wurde das Programm ABAQUS 6.7 eingesetzt.



$$U_b = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}}$$

Abbildung 31: Darstellung der Exzentrizität eines Rohres

Winkel α [grad]	Radius R [mm]	Zylinderlänge L [mm]
20	10	2
15	8	5
10	5	10

Tabelle 4: untersuchte Rohrparameter für 50 x 2 Rohre

Für die Simulation wurde die Geometrie der Realbauteile benutzt. Die Dimensionen für Matrize (A), Dorn (B) und Rohr (C) sind in der Abbildung 33 dargestellt.

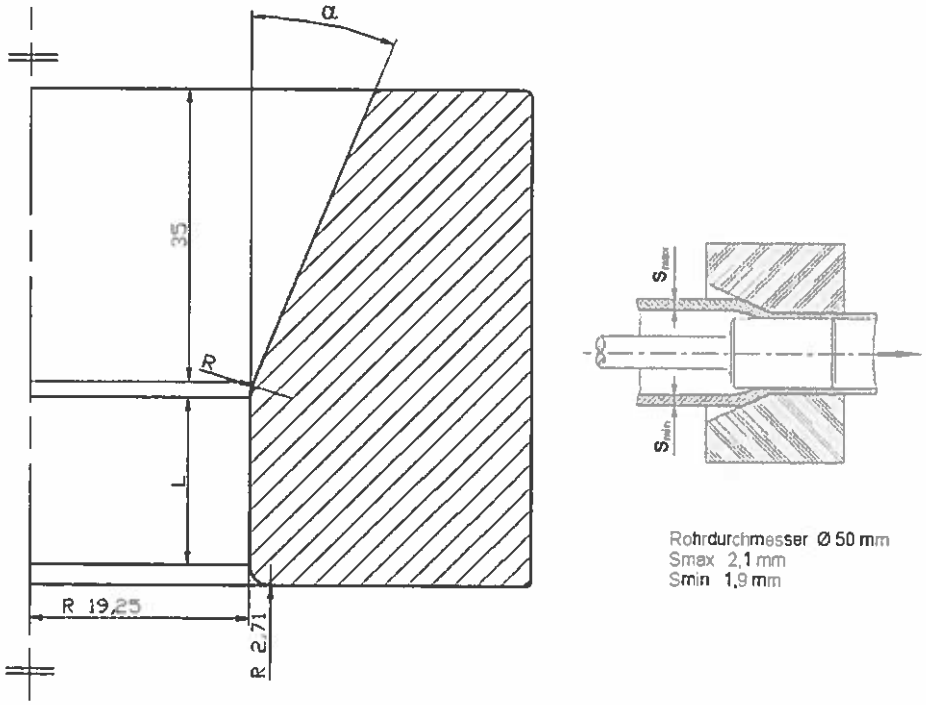


Abbildung 32: Geometrie der verwendeten Matrize und Rohre

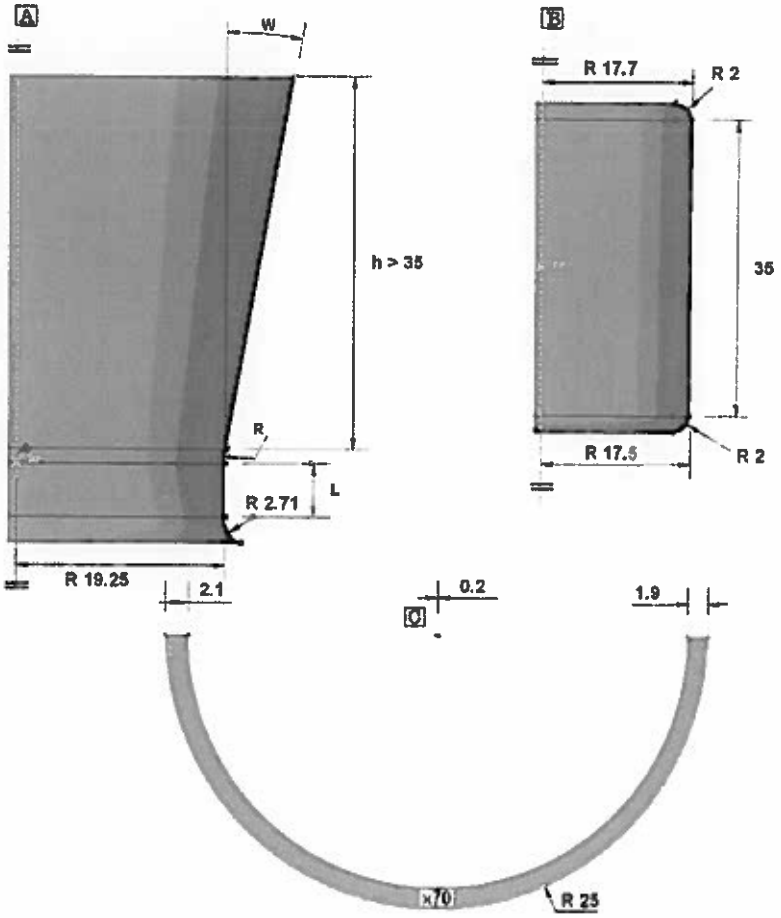


Abbildung 33: Abmessungen der Modellteile

Zur Reduzierung der Rechenzeit wurde nur mit einer Rohrhälfte gearbeitet, was auf Grund der Symmetrie in der Schnittebene, die sich in Ziehrichtung zwischen Wanddickenmaximum und Wanddickenminimum aufspannt, zulässig ist. Das Rohrstück wurde als ein deformierbares Bauteil angenommen, Matrize und Dorn hingegen zur Reduzierung der Rechenzeit als starre Körper (Rigid Body) betrachtet. Ein starrer Körper ist eine Sammlung von Knoten, Elementen, und/oder Oberflächen, deren Bewegung durch die Bewegung eines einzelnen Knotens, den so genannten Körperbezugsknoten, geregelt wird. Alle übrigen Knoten und Elemente, die ein Teil des starren Körpers sind, bleiben unverändert zu dieser Position des Bezugpunktes. Deshalb deformieren die konstituierenden Elemente nicht, aber können große starre Körperbewegungen ausführen. Diese Vereinfachung ist gerade bei der Verwendung von gehärtetem Material, wie es bei diesen Untersuchungen verwendet wurde, zulässig, da zudem das Kupfer im Vergleich zum Werkzeugwerkstoff relativ weich ist. Bei einer Vergleichsrechnung unter Annahme elastischer Werkzeugmaterialien konnte kein nennenswerter Unterschied (3 % für Versuchsreihe mit 2 mm Rohren) festgestellt werden.

Für die Materialeigenschaften vom SF-Kupfer wurden folgende Daten verwendet, die am realen Werkstoff im Institut ermittelt wurden:

Massendichte: $\rho = 8{,}96 * 10^{-9} \frac{T}{mm^3}$

Elastizitätsmodul: $E = 1{,}15 \times 10^5 \, MPa$

Querkontraktionszahl: $\nu = 0{,}3$

Die ermittelte Fließkurve für den verwendeten Kupferwerkstoffes ist in Abbildung 34 dargestellt:

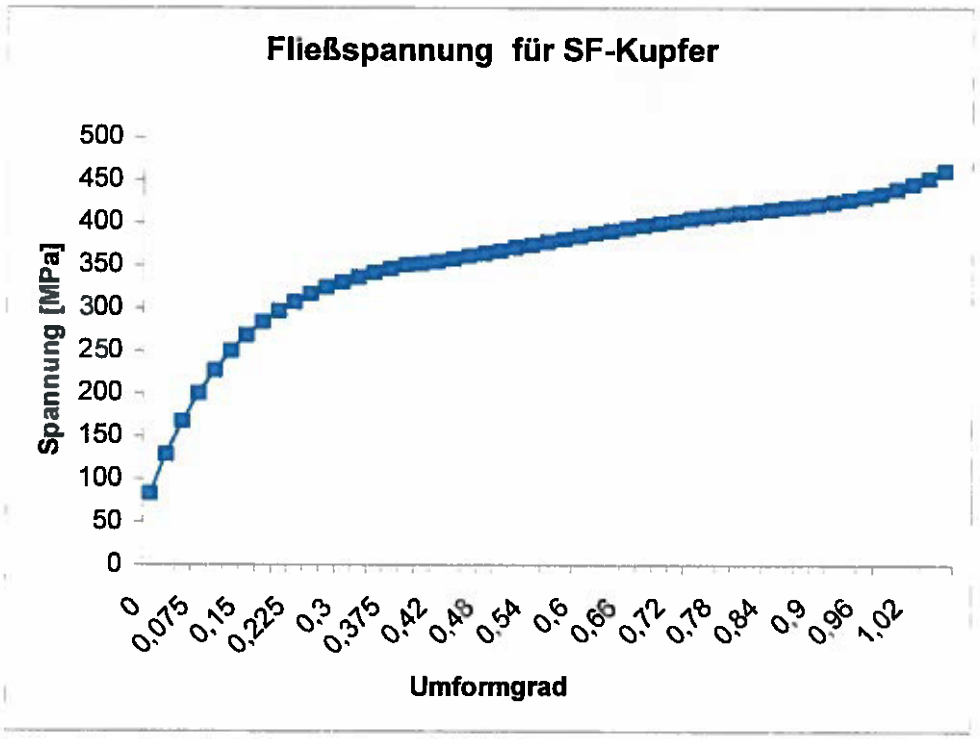


Abbildung 34: Fließkurve für das verwendete SF-Kupfer

Jedes einzelne Bauteil des Gesamtsystems hat sein eigenes lokales Koordinatensystem, das später in das übergeordnete Koordinatensystem transformiert werden muss. Die Anordnung im Gesamtsystem gibt Abbildung 35 wieder.

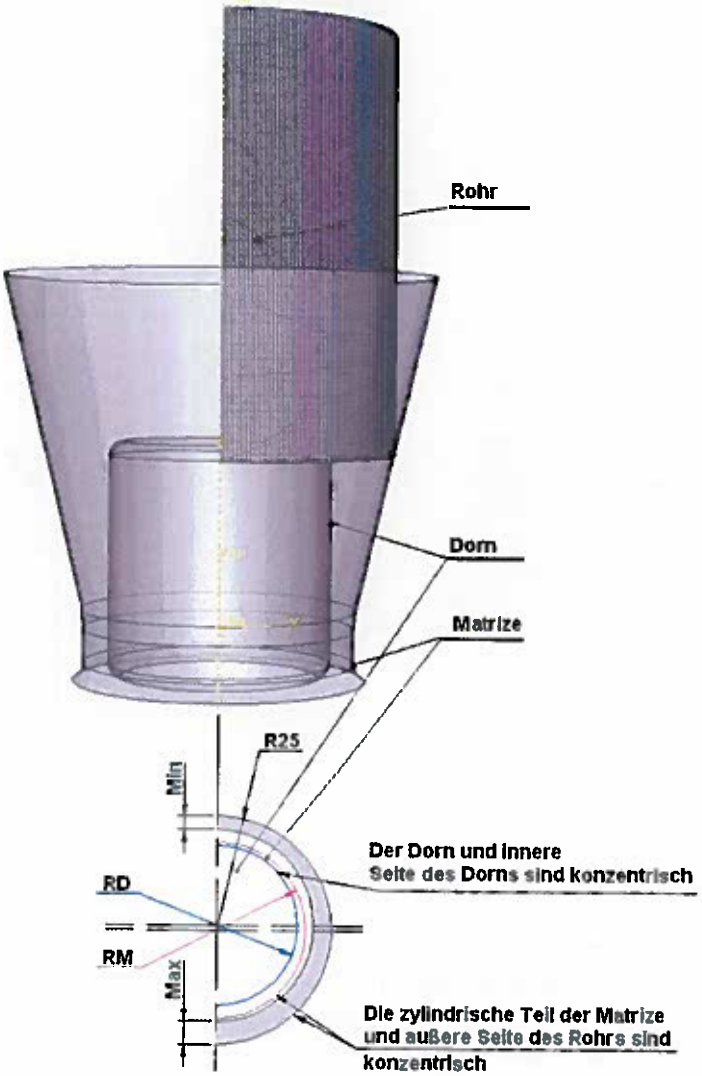


Abbildung 35: Aufbau des Gesamtmodells

Im Modell wurde mit der Annahme zu Beginn der Berechnung gestartet, dass der Dorn mit der inneren Oberfläche des Rohres sowie die zylindrische Fläche der Matrize mit der Außenfläche des Rohrs konzentrisch sind. Dies hat den Vorteil, dass der Dorn nicht zuerst auf den ersten Zentimetern in seine Endposition einschwingen muss. Der Dorn ist so befestigt, dass er sich nur in Richtung Wanddickenminimum bzw. Maximum bewegen kann. Die Matrize ist folglich in alle Richtungen fixiert. Das Rohr in der Symmetrieebene in seiner Bewegung eingeschränkt. Eine Übersicht für diese Randbedingungen liefert Abbildung 36.

Für die Berechnungen die eine Führung berücksichtigen sollten wurde am hinteren Ende das Rohr in Richtung eins und drei fixiert. Sobald das Ende dann im Matrizenbereich angelangt ist, wird diese Fixierung dann aufgehoben, damit das Rohr komplett durch die Matrize gezogen werden kann.

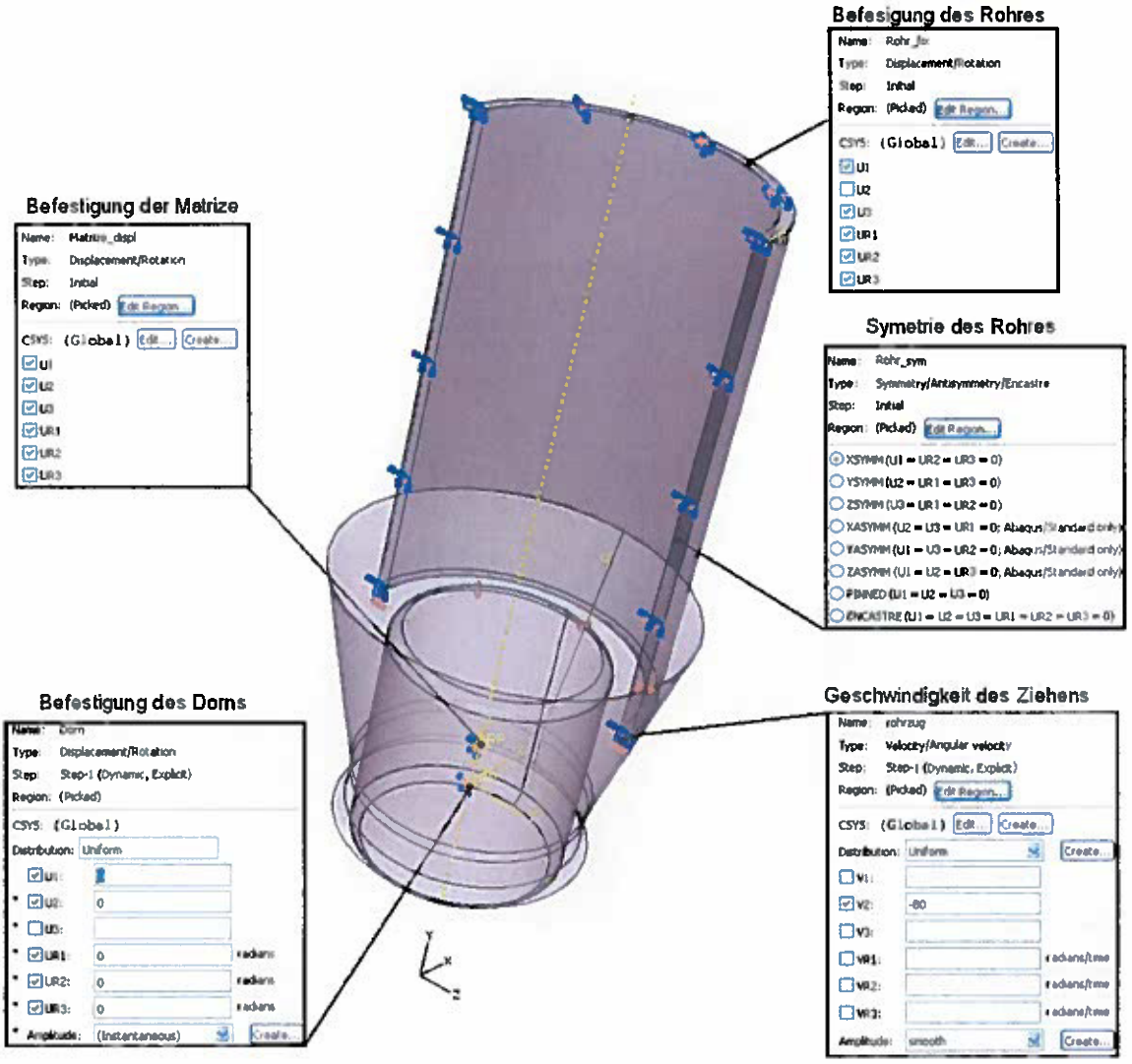


Abbildung 36: Randbedingungen für das FEM-Modell

Das allgemeine Ziel einer FEM-Simulation ist, die Lösung, die auftretende Verformungen und Spannungen des Modells für bestimmte Belastungen zu ermitteln. Man teilt einen kompletten Belastungszyklus einer Simulation in eine Anzahl von Schritten ein. Jeder Schritt wird als eine Periode der Zeit definiert. Für diese Rohrziehsimulation wurde mit mindestens zwei Schritten gearbeitet. Der erste Schritt läuft vom Kontakt mit der Matrize bis zur Kontaktierung mit dem Dorn. Er wird mit langsamen Geschwindigkeiten angefahren, um den Dorn möglichst wenig zu beschleunigen und anzuregen. Der zweite Schritt beinhaltet den eigentlichen Umformprozess mit Berücksichtigung des Stopfeneinflusses. Der dritte Schritt war nur für den Fall erforderlich, für den die Randbedingung „Rohrführung" zutraf.

Bei Abaqus gibt es die Möglichkeit sowohl implizit als auch explizite Rechnungen für dieses Problem durchzuführen.

Eine dynamische explizite Analyse ist für die Analyse von großen Modellen mit relativ kurzen dynamischen Ansprechzeiten und für die Analyse von äußerst diskontinuierlichen Ereignissen effizient. Speziell bei der hohen Anzahl an Elementen, in unserem Fall sind es bis zu 400.000, und den stark variierenden Kontaktbedingungen zu Anfang der Analyse, die sich auch in der dynamischen Bewegung des Dorns fortsetzen, ist der explizite Ansatz hier klar im Vorteil (Abbildung 37). In unserem Fall ließ sich die Rechnung bei impliziertem Ansatz nicht zu Ende führen, im expliziten Fall lag die

Rechenzeit bei dem dickwandigeren Rohr bei ca. sieben Tagen, für das dünnwandige Rohr bei ca. drei Tagen.

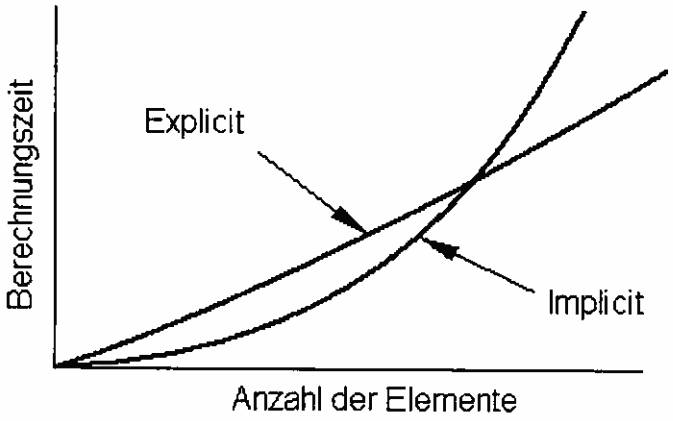


Abbildung 37: Vergleich der Berechnungszeit für implizite und explizite Modelle

Anders sieht es wiederum bei der Berechnung des Eigenspannungszustandes nach dem Verlassen des Rohres aus dem Ziehhol aus. Hierfür ist der implizite Ansatz im Vorteil. Es wurde folglich zur Bestimmung des Eigenspannungszustandes die implizite Berechnung gewählt, die mit importierten Daten aus der expliziten Analyse rechnet. Dieses Vorgehen ist das übliche, das auch z.B. zur Berechnung der Rückfederung nach dem Tiefziehen angewandt wird.

Der Zeitschritt bei der expliziten Analyse wird durch nachfolgende Gleichung berechnet:

$$\Delta t \leq \min\ (L_e \sqrt{\frac{\rho}{\hat{\lambda}+2\hat{\mu}}}) \qquad \text{und} \qquad n \approx \frac{T}{\Delta t}$$

wobei:

$\hat{\lambda}$, $\hat{\mu}$ - Lamé-Konstante

L_e - Elementlänge

ρ - spezifische Dichte des Werkstoffes

n - Schrittweite

Abaqus ist im Stande, die Rechenzeit zu reduzieren, indem das Prinzip der Massenskalierung verwendet wird. Dabei wird künstlich die materielle Dichte ρ, durch einen Faktor f^2 vergrößert, womit n reduziert wird auf $\frac{n}{f}$. Dies führt zu einer Verringerung der Rechenzeit T auf $\frac{T}{f}$.

Unter dieser Massenskalierung, die sich durch eine kleinere Anzahl an Inkrementen auswirkt, leidet natürlich auch die Genauigkeit der Rechnung. Versuchsweise wurden

mehrere Variationen von 100 bis 10.000 untersucht, wobei eine Massenskalierung mit dem Faktor 1000 einen akzeptablen Kompromiss darstellte. Die Messungenauigkeit in Form der Maximalspannung stieg um ca. 3 % bei einer Reduzierung der Rechenzeit auf ca. 1/3.

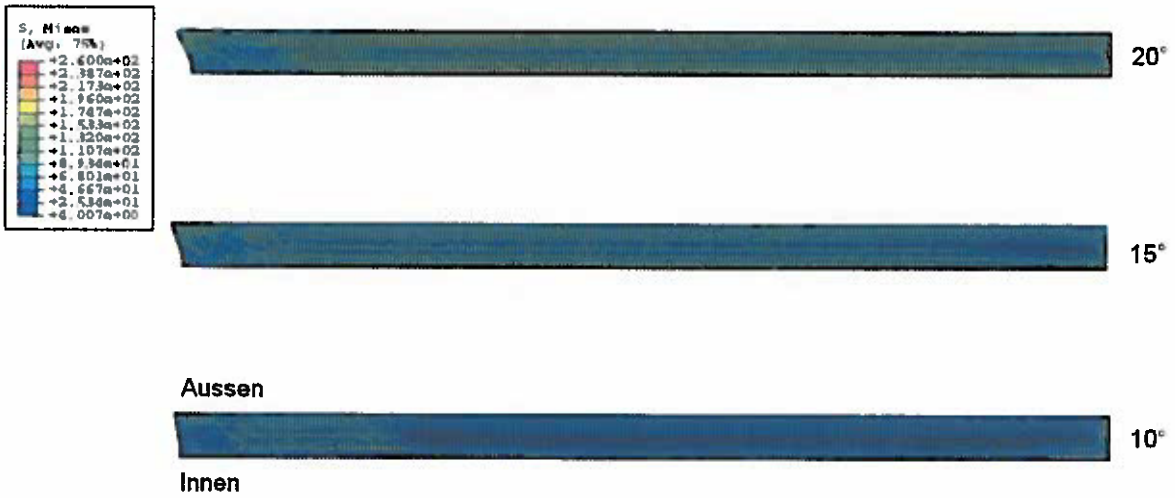
Für den Reibungsfaktor wurde ein Wert von $\nu = 0.06$ angesetzt. Für diesen mittleren Wert gab es die beste Übereinstimmung mit der gemessenen Ziehkraft.

Als größte Herausforderung stellte sich die derzeit real nicht erfassbare Dornbewegung dar. Auch im Modell finden sich auf Grund der sich ändernden, nicht axialsymmetrischen Kraftverhältnisse diese Bewegungen wieder. In Abhängigkeit von den Randbedingungen, also mit oder ohne Führung, kleiner oder großer Winkel usw. waren unterschiedliche Mindestrohrlängen nötig, um einen quasi-statischen Zustand bei der Berechnung zu erlangen. Indiz für das Erreichen dieses Zustandes war die fehlende Bewegung des Dornes.

3.8 *Einfluss der Ziehparameter auf Exzentrizität und Eigenspannungen*

Die Wahl der Ziehparameter hat sowohl einen direkten Einfluss auf die Maßhaltigkeit als auch einen indirekten, aber sehr bedeutsamen, über die sich einstellenden Eigenspannungen, da letztere - zumindest bei Eigenspannungen I. Art (homogen über mehrere Körner bis zu ganzen Bauteilbereichen) und II. Art (homogen im Kornbereich) - zu makroskopischen Verformungen führen /1/. Hierzu wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, die bereits im Forschungsantrag diskutiert wurden.

Nachfolgend werden Ergebnisse aus der Simulation und praktischen Versuchen mit denen in der Literatur vorliegenden verglichen. Es können zum Teil neue Aspekte bei den Einflussparametern aufgezeigt werden.



Matrize Durchmesser = 45,24 mm
Winkel = 15°
Radius = 12 mm
Zylinderlänge = 3 mm

Dorn mit der Steigung	Umformgrad φ	Q-Wert
D = 38 mm	0,2	0,54

Abbildung 38: Eigenspannungen nach von Mises für Ausgangsrohre 4 mm in Abhängigkeit vom Ziehwinkel für Stopfenzug

In der Literatur herrscht weitgehend Übereinstimmung über den Einfluss des Ziehdüsenöffnungswinkels α. Die Eigenspannungen steigen mit wachsendem Winkel /2/, /3/, /4/ teilweise wurde beobachtet, dass sie zunächst leicht abfallen, um dann wieder anzusteigen /5/. Die Simulationsrechnungen für Rohre mit 4 mm Wandstärke korrelieren mit den aus der Literatur bekannten Ergebnissen, wie aus Abbildung 39 und Abbildung 40 ersichtlich wird. Interessanter Weise zeigen die Ergebnisse für die 2 mm-Rohre einen gegenläufigen Trend (Abbildung 41). Mit größeren Winkeln ergaben sich kleinere Spannungen. Ursache hierfür dürfte in dem Biegeverhalten der Rohrwand beim Einlauf und beim Übergang vom konischen zum zylindrischen Teil liegen. Hier stellt die Wandstärke den ausschlaggebenden Faktor dar.

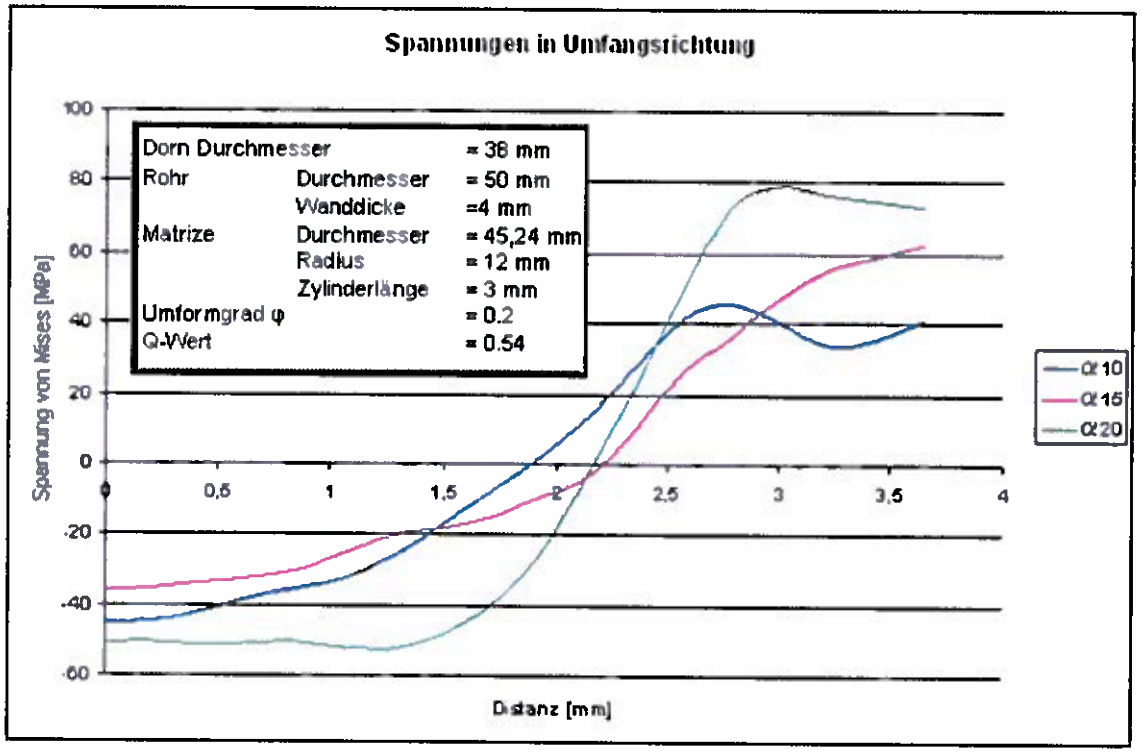


Abbildung 39: Spannungsverlauf (in Umfangsrichtung) von Rohrinnenfläche zur Rohraußenfläche in Abhängigkeit vom Ziehwinkel für 4 mm Ausgangsrohre

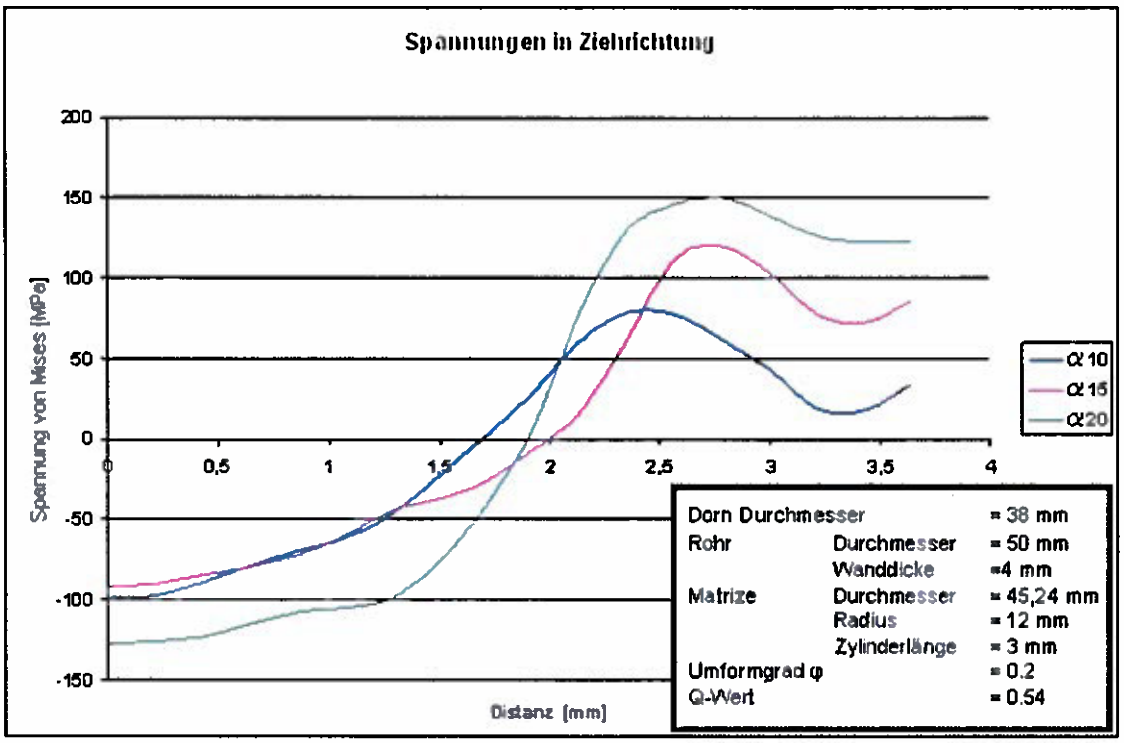


Abbildung 40: Spannungsverlauf (in Ziehrichtung) von Rohrinnenfläche zur Rohraußenfläche in Abhängigkeit vom Ziehwinkel für 4 mm Ausgangsrohre

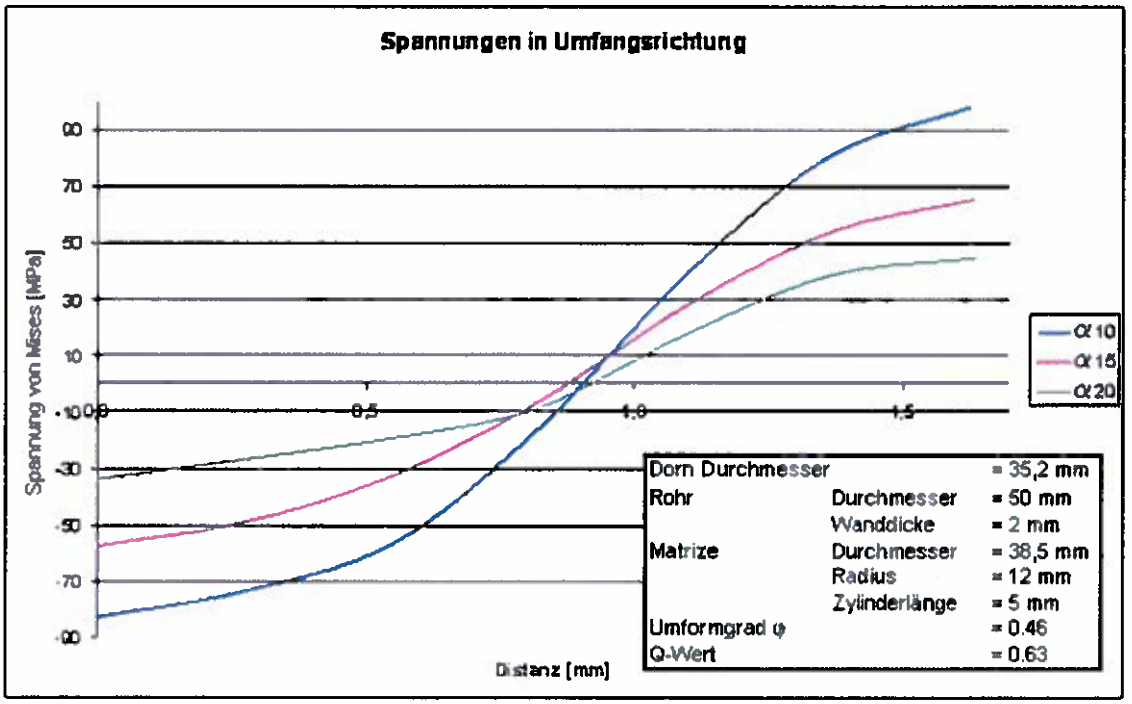
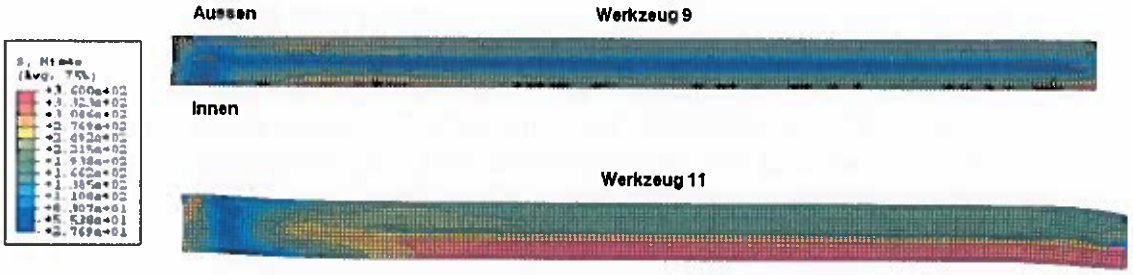


Abbildung 41: Simulierter Spannungsverlauf (in Umfangsrichtung) von Rohrinnenfläche zur Rohraußenfläche in Abhängigkeit vom Ziehwinkel (α in Grad) für 2 mm Ausgangsrohre

Im Hohlzug sind laut Literatur die Spannungen etwa um den Faktor 1,5 – 2 größer als beim Stopfenzug /1/, /2/, /3/, /5/, /6/.



Werkzeug Nummer	Matrizenwinkel	Übergangs-Radius	Zylinder Durchmesser	Zylinder - lange	Dorn Durchmesser
9	10,00	12,00	38,51	2,00	32,1
11	15,00	12,00	40,94	2,00	-------

Abbildung 42: Auswirkung des Stopfen-/Hohlzugs auf den Eigenspannungszustand nach von Mises

Abbildung 42 gibt den berechneten Spannungszustand nach von Mises für ein 4 mm Ausgangsrohr wieder, das einmal mit und einmal ohne Dorn von 50x4 an einen Rohraußendurchmesser von ca. 38,5 bzw. ca. 40,5 mm gezogen wurde. Deutlich sichtbar sind die geringeren wie auch homogeneren Spannungen beim Stopfenzug. Für die Spannungsverteilung über die Wanddicke ist dieser Unterschied noch einmal in Abbildung 43 dargestellt.

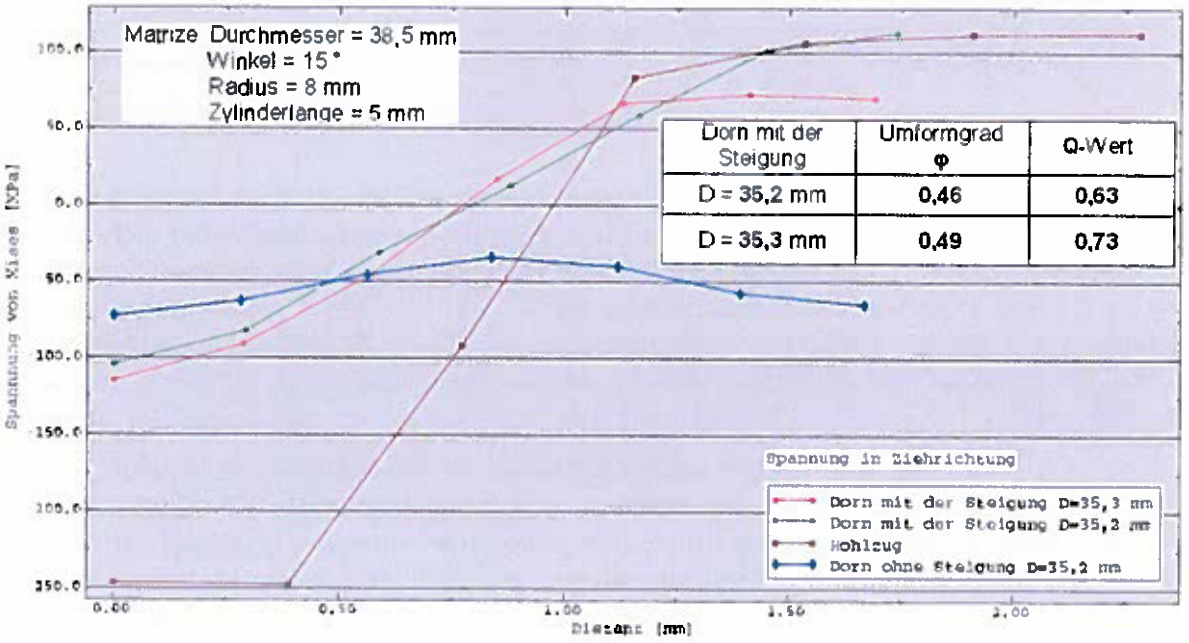
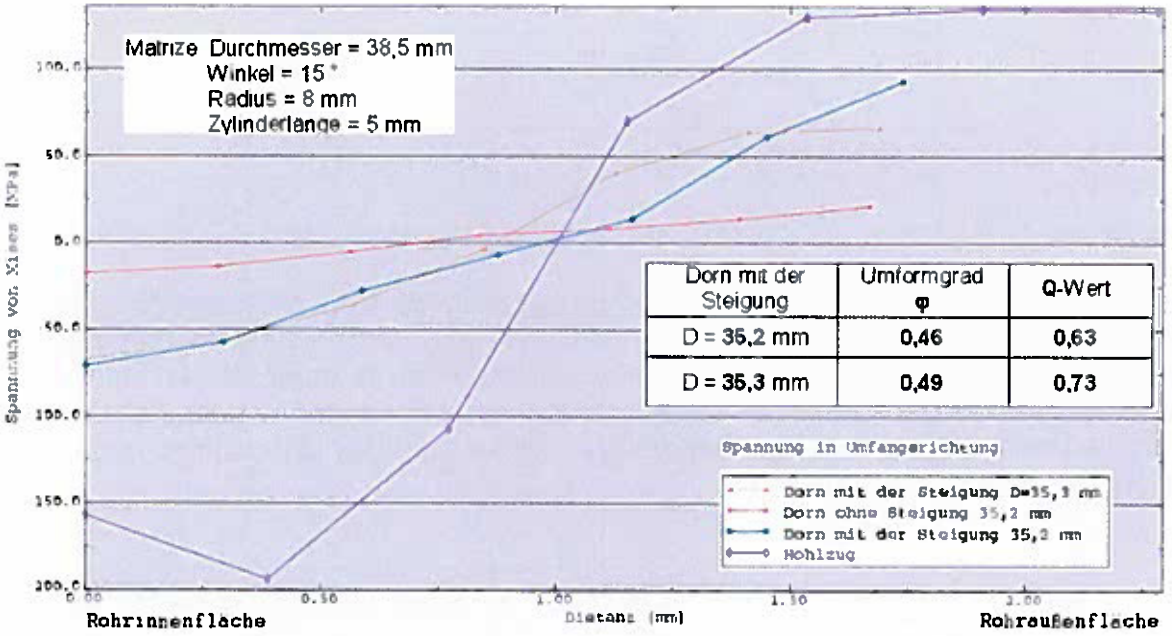


Abbildung 43: Auswirkung der Dorngeometrie auf den Eigenspannungszustand in Ziehrichtung

Hier ist der positive Einfluss des Stopfens auf die Eigenspannungen zu sehen. Einen deutlichen Einfluss hat auch der Dornwinkel. Oftmals werden in der industriellen Praxis Dorne mit einer minimalen Steigung verwendet, um die Wandstärke des Rohres durch die Positionierung des Dorns in Ziehrichtung im Zehntelmillimeterbereich oder noch genauer einstellen zu können. Diese Steigung im Dorn, sie liegt bei rund 0,16°, hat, wie aus Abbildung 43 ersichtlich ist, einen merklichen Einfluss auf den Eigen-

spannungszustand. Mit zylindrischem Dorn sind wesentlich geringere Spannungen zu erwarten.

Auffällig hierbei ist, dass sich bei Betrachtung der Spannungen in Ziehrichtung der konische Dorn primär auf den Spannungszustand im Bereich der Innenfläche auswirkt. Der zylindrische Dorn dagegen hat auch Auswirkungen bis auf die Außenoberfläche, da auch über den zylindrischen Teil eine hohe Druckspannung aufrechterhalten wird. Durch Vergrößerung des Dorndurchmessers, dies entspricht bei gleicher Matrizengeometrie einer Vergrößerung des Q-Werts, kann auch das Eigenspannungsniveau verringert werden.



Dorn mit der Steigung	Umformgrad φ	Q-Wert
D = 35,2 mm	0,46	0,63
D = 35,3 mm	0,49	0,73

Abbildung 44: Auswirkung des Dorns auf den Eigenspannungszustand in Ziehrichtung

Ein kleiner Öffnungswinkel α in Kombination mit einem großen Ziehdüsenübergangsradius zwischen konischem Ziehtrichter und zylindrischem Auslauf wirkt sich ebenfalls positiv auf die Reduzierung der Oberflächeneigenspannungen aus. Dieser Effekt wird mit steigendem Übergangsradius verstärkt, und die Maxima der Längseigenspannungen werden zur Rohrinnenseite hin verschoben /3/. Auf die Exzentrizität hat er keinen Einfluss, hier bildet der Ziehdüsenöffnungswinkel nach /7/ den dominierenden Faktor.

Dieses Ergebnis ließ sich bei unseren Versuchen für die dünnwandigen Rohre mit 2 mm Wandstärke nicht bestätigen! Hier war der Übergangsradius ein sensibler Parameter! Diese Sensibilität wurde durch Simulationsrechnungen bestätigt (Abbildung 45). Danach hat der Radius einen ähnlich großen Einfluss wie der Matrizenwinkel. Bei diesen Rechnungen wurde eine Führung vor der Matrize als Randbedingung mit berücksichtigt. Entsprechend gering fallen die Verbesserungen bei der Ungleichwandigkeit aus. Ähnlich geringe Verbesserungen im Bereich von 1 % bis 1,5 % ergaben sich für Züge mit Führung vor der Matrize bei den dickerwandigen Rohren.

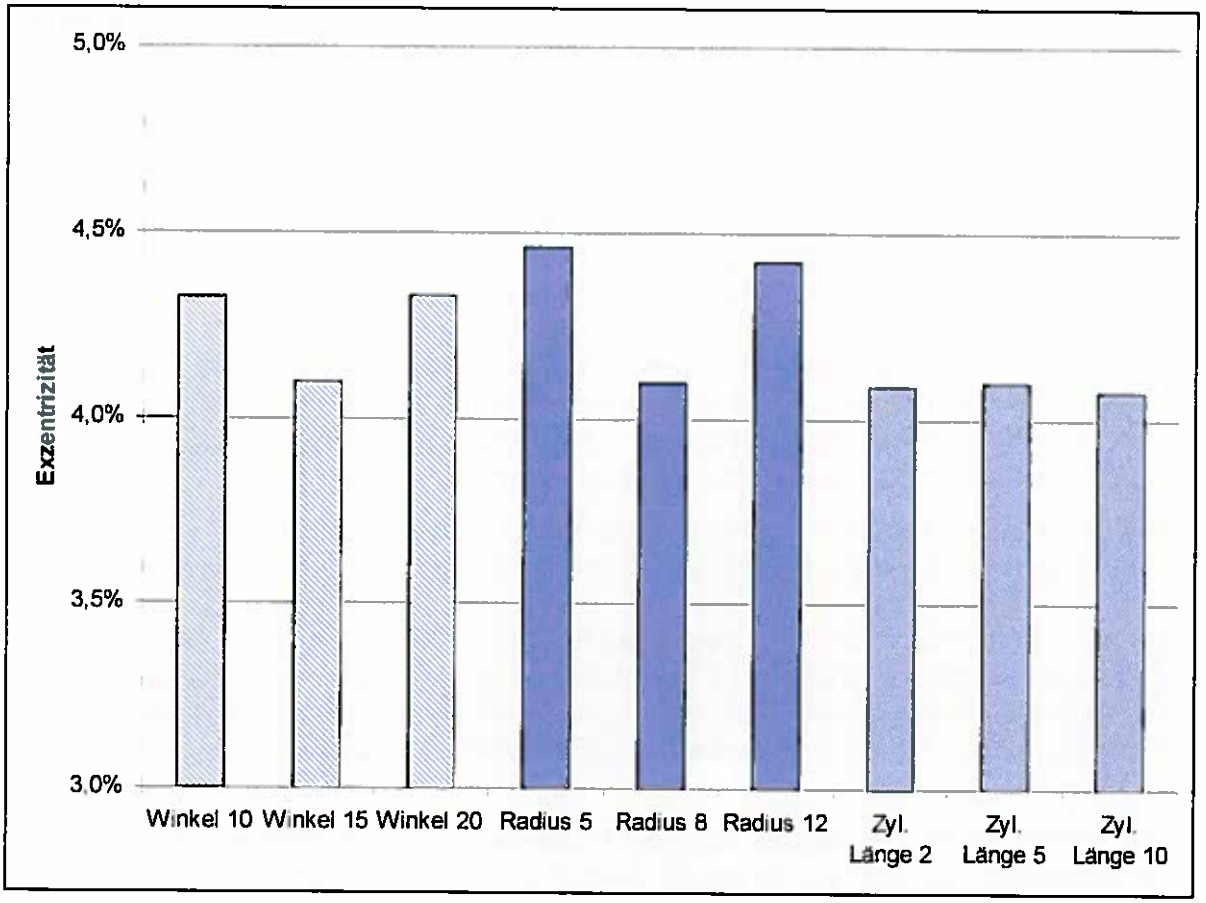


Abbildung 45: Simulation der Exzentrizitäten für 2 mm Rohre mit Führung in Abhängigkeit von Matrizenwinkel (in °), Übergangsradius und zylindrischer Führungslänge der Matrize (in mm) mit Ausgangsexzentrizität 5 %, Matrizendurchmesser 38,5 mm, Dorndurchmesser 35,2 mm.

Anders sah es bei den Versuchen ohne Führung aus. Hier sind die erzielten Verbesserungen um ein Vielfaches höher. Auch bei den Simulationsrechnungen wurde ein deutlich höherer Wanddickenausgleich festgestellt. Bei einem Umformgrad von φ = 0,4 und einer Ausgangsexzentrizität von e = 5 % wurden bei einem Winkel von α = 15° eine Exzentrizität von e = 3,3 % und bei α = 20° e = 2.9 % ermittelt. Dieser Einflussfaktor wurde schon bei /7/ erkannt und beschrieben.

Bei den praktischen Versuchen ohne Dornstange wurde eine Auslenkung des Rohres im Einlauf beobachtet. Diese Auslenkung ist auf den Spannungs- und daraus resultierenden Formänderungszustand im Ziehhol zurückzuführen. Im Bereich des Wanddickenminimums sind deutlich höhere (hydrostatische) Spannungen im Vergleich zum Bereich des Wanddickenmaximums vorhanden, deren Ursache in den höheren Druckspannungen in Umfangsrichtung zu suchen ist. Diese örtlich höheren Spannungen beeinflussen die Formänderungen in Ziehrichtung über den Umfang. Im Bereich des Wanddickenminimums längt sich das Rohr folglich stärker.

Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass im Falle einer behinderten Auslenkung durch eine Führung oder sonstige Konstruktion der Dornstange oder des Ablagetisches die Spannungen in Umfangsrichtung diesem Effekt entgegen wirken und die Ungleichwandigkeit daher weniger beeinflusst wird.

Eine konstruktionsbedingte ungleichmäßige Auslenkung in Form einer schief eingebauten Matrize oder eines Ablagetisches vor der Matrize hat in Abhängigkeit von der Position des Wanddickenmaximums unterschiedliche Auswirkungen für das selbe Rohr und führt somit zu unterschiedlichen Ergebnissen, wie sie bei den Industrieversuchen zu finden waren.

Die Gesamtformänderung teilt sich bei der Rohrherstellung in eine Wanddicken- und eine Durchmesserformänderung auf. Bei beiden Größen wird jeweils der Logarithmus der Änderung (neu/alt) angegeben. Da diese unterschiedliche Effekte auf das Rohr haben, muss auch deren Verhältnis, der Q-Wert, berücksichtigt werden. Bei konstantem Q-Wert werden mit wachsender Formänderung geringere Eigenspannungen aufgebaut /2/, /4/, /8/. Auch dieses Ergebnis lässt sich aus Abbildung 43 ableiten. Mit größerem Dorndurchmesser - und somit einer größeren Umformung und Wanddickenreduktion - sinken die Eigenspannungen.

Die Formänderung im Hohlzugbereich der Umformung resultiert aus dem Anstieg der Spannungen in Umfangsrichtung und deren Inhomogenität auf Grund unterschiedlicher Querschnitte über den Umfang. Die Spannungen sind im Bereich des Wanddickenminimums am größten. Ein wichtiger Einflussfaktor ist hier der Gradient der Fließkurve. Ein hoher Gradient bedeutet, dass sich das Material im Bereich des Wanddickenminimums schneller verfestigt und die gewünschte Formänderung in diesen Bereichen schwächer ausfällt. Folglich wirkt sich auch der Werkstoff stark auf das erzielte Ergebnis aus.

Durch eine Variation Q-Wertes kann die Höhe der Eigenspannungen beim Stopfenzug beeinflusst werden. Bis zu einem Q-Wert von 1 stellen sich zunehmend geringere Eigenspannungen ein, danach sind nur noch geringe Änderungen zu erwarten. Die Ergebnisse finden sich in Abbildung 43 wieder. Die Exzentrizität hingegen ist nach /7/ nicht von dieser Grenze betroffen, sondern soll kontinuierlich mit wachsendem Q-Wert fallen. Das steht aber im Widerspruch zum Spannungsverlauf im Ziehhol! Abhängig vom Werkstoff können die Randeigenspannungen zudem ihr Vorzeichen umkehren /3/, /4/, /9/.

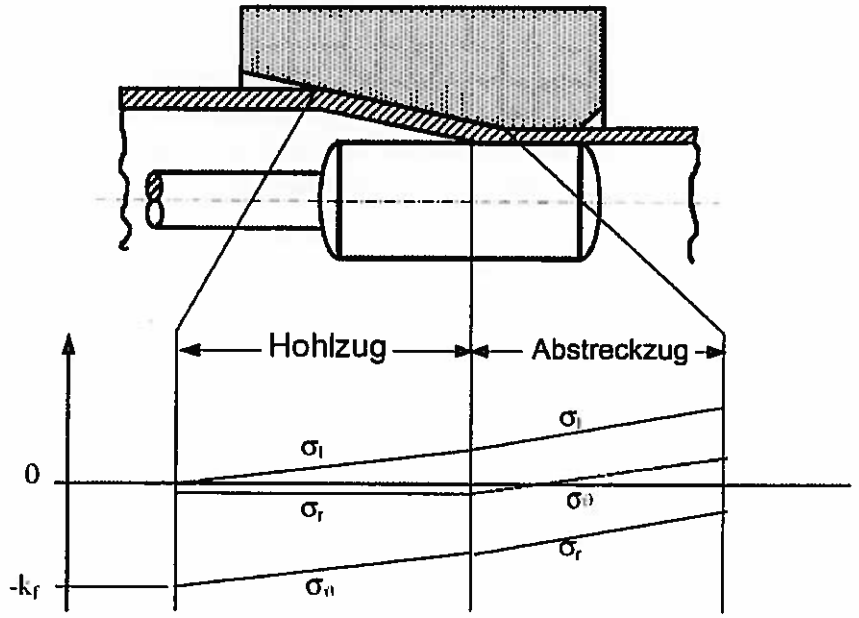


Abbildung 46: Spannungsverlauf Stopfenzug

Nach der Elementaren Theorie sieht der Spannungsverlauf beim Stopfenzug wie folgt aus: Im Hohlzugbereich fließt der Werkstoff, nachdem das Rohr die Ziehmatrize berührt hat, längs des Matrizenkonus unter Reduktion des Rohrdurchmessers. Die Spannungen in Umfangsrichtung sind hier als Druckspannungen deutlich größer als diejenigen in radialer Richtung. Ab dem Punkt, ab dem das Rohr den Dorn berührt, wird im Wesentlichen die Wanddicke des Rohres reduziert. Hier treten hohe radiale Spannungen auf, die in Richtung Auslauf abnehmen. Die Spannungen in Umfangsrichtung sind im Verhältnis zu den anderen Spannungen sehr gering und bewegen sich aus dem Druckbereich in den Zugbereich. Da jedoch die Umfangsspannungen nach /8/ ausschlaggebend sind für den Exzentrizitätsausgleich, resultiert daraus, dass der Hohlzugbereich hier den wesentlichen Einfluss hat (Abbildung 46).

Betrachtet man die Ergebnisse aus der FEM entlang eines Messpfades in Ziehrichtung, lassen sich die gleichen Aussagen treffen (Abbildung 47). Auffallend ist hier, dass die Umfangsspannungen im Ziehhol stetig zunehmen. Grund hierfür ist die Verfestigung des Materials, die gerade beim Kupfer im weich geglühten Zustand ausgeprägt ist. Das Verhältnis der Spannungen in radialer zu tangentialer Richtung weist bei dieser Berechnung den gleichen Verlauf auf: im Abstreckbereich findet eine Umkehrung statt.

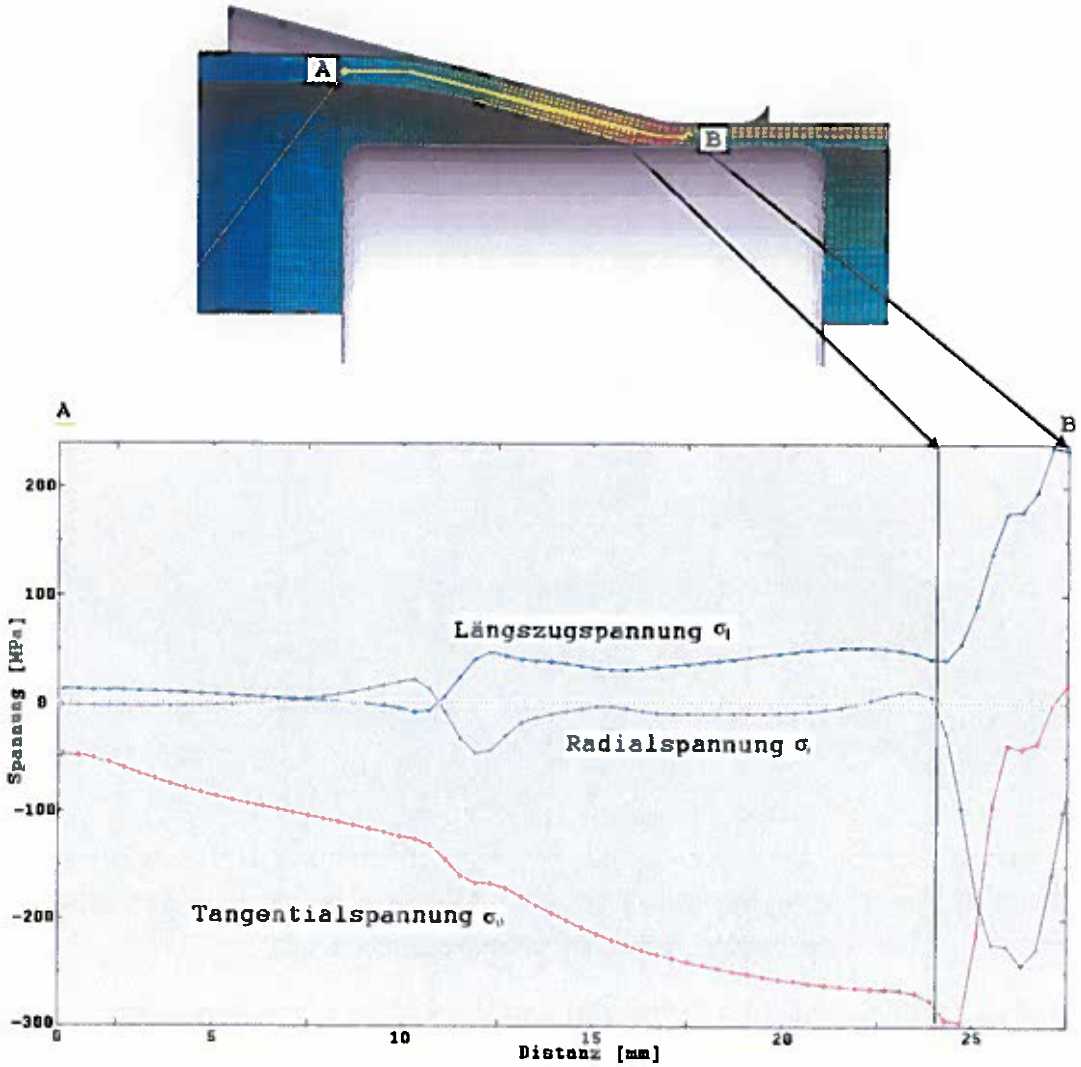


Abbildung 47: Spannungsverlauf in Ziehrichtung beim Stopfenzug (Simulation)

Die Schmierung muss einen möglichst reibungslosen Kontakt zwischen Werkzeug und Rohr gewährleisten. Überschreiten die Normalpressungen einen Grenzwert, kann der Reibungskoeffizient schlagartig stark ansteigen. Der Schmierfilm kann hier lokal abreißen oder regelrecht abgestreift werden, wobei sich die mit einer Wanddickenreduktion einhergehende Oberflächenvergrößerung noch verstärkend auswirkt. Die Reibungsenergie wird von der Rohroberfläche aufgenommen, was neben der Induzierung von Eigenspannungen auch noch zu einer Herabsetzung der erzielbaren Formänderung in den Randschichten führt /10/, /11/. In Abbildung 48 sind die Vergleichsspannungen für eine Rechnung mit und ohne Reibung für ein Ringelement mit dargestellt. Bei dieser Modellrechnung wurde ein Rohrsegment nur in radialer Richtung durch ein Schalenelement, das seinen Durchmesser verkleinert, gestaucht. Der Einfluss der Biegung und Ziehkraft wurde hier folglich nicht berücksichtigt, es wurde nur der Einfluss der Durchmesseränderung untersucht.

Im Randbereich beim Modell mit Reibung sieht man deutlich das reduzierte Spannungsniveau. Aber auch der erzielte Wanddickenausgleich , der sich aufgrund der unterschiedlichen Fließbedingungen in Umfangsrichtung ergibt, ist erkennbar.

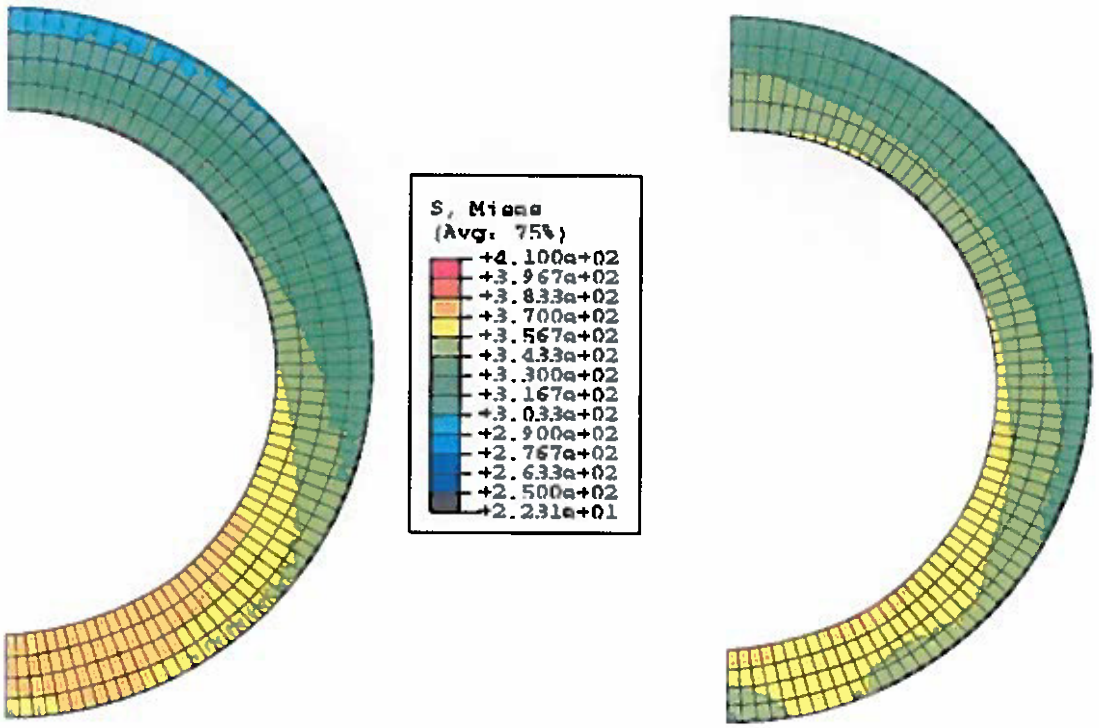


Abbildung 48: Spannungsverteilung nach von Mises für einen in radialer Form gestauchten Ring. Links ohne Reibung, rechts mit Reibung gerechnet.

Durch den Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück entstehen, je nach Affinität, zusätzlich Aufschweißungen und Werkzeugverschleiß, die zu einer weiteren, allgemeinen Oberflächenschädigung oder Riefenbildung führen - mit sekundären Folgeerscheinungen hinsichtlich Riss- und Korrosionsanfälligkeit. Der Einfluss auf andere Werkstoffeigenschaften ist auf den unmittelbaren Randbereich beschränkt. Die mathematische bzw. numerische Beschreibung des Schmierungseinflusses ist komplex.

Im einfachsten Fall, der immer noch bei der Mehrzahl der Berechnungen Anwendung findet, wird von einem durchschnittlichen, über die gesamte Umformzone gemittelten Reibkoeffizienten ausgegangen. Doch tatsächlich ändert sich der Reibkoeffizient über die Strecke der Umformung durch Neubildung von Oberflächen. Insgesamt kann also festgehalten werden, dass der Reibkoeffizient einen zumindest indirekten Einfluss auf den Umformgrad hat, indem durch diesen eine potentielle Schädigung der oberflächennahen Bereiche definiert wird. Dieser Einfluss hängt von der Festigkeit des Werkstoffes ab /10/, /11/.

Zur qualitativen Abschätzung wurden im Rahmen des Forschungsprojektes Versuche mit unterschiedlichen, industrieüblichen Schmierstoffen durchgeführt, wobei kein signifikanter Unterschied bei den Ziehkräften gemessen werden konnte. Umgerechnet ergaben sich für den Reibungsfaktor danach nur Unterschiede in der zweiten Nachkommastelle. Daher wurden die Versuche mit einem Schmierstoff durchgeführt.

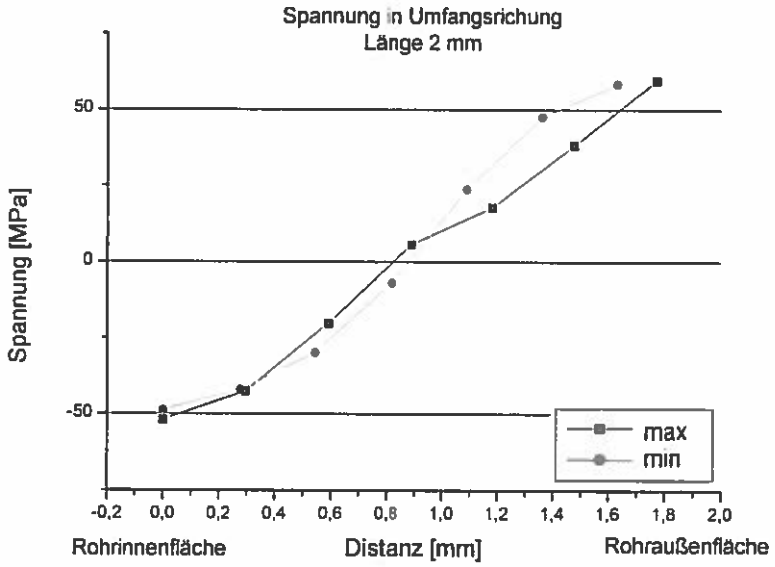
Mittels FEM-Rechnungen wurde der Einfluss des Schmiermittels qualitativ untersucht. Kleine Unterschiede machten sich bei der Ungleichwandigkeit nicht bemerkbar. Bei den darauf folgenden praktischen Versuchen mit Führung vor der Matrize konnten auch keine Einflüsse bei den geringen Unterschieden im Reibungsfaktor für die verwendeten Schmiermittel erkannt werden.

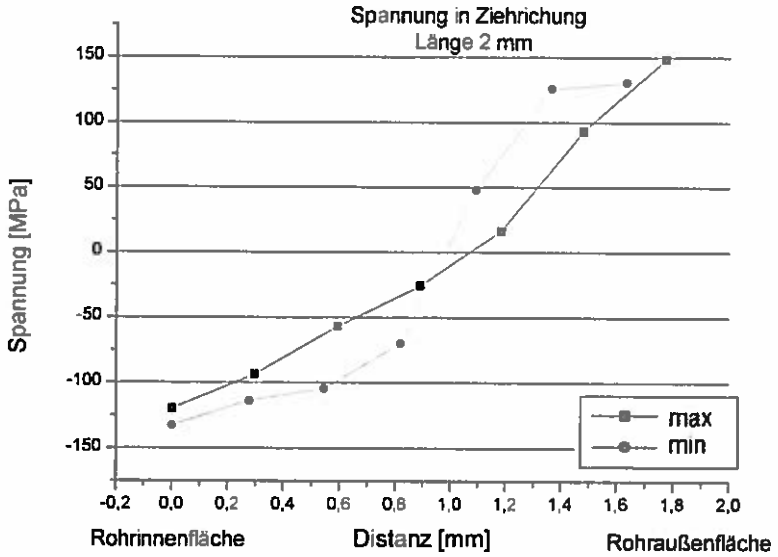
Der Einfluss der Zylinderlänge auf die Eigenspannungen wurde mittels FEM durch /12/ für das Ziehen gekrümmter Drähte untersucht. Der Einfluss war nur gering. Bei den für die Simulation verwendeten dünnwandigen Rohre konnte ebenfalls kein gravierender Einfluss ermittelt werden.
Eine Übersicht mit Ergebnissen für die dünnwandigen Rohre für die Parameter Ziehwinkel, Übergangsradius und Zylinderlänge folgt im nächsten Kapitel. Die Prozessdaten sind Abbildung 41 zu entnehmen. Bei diesen Simulationsrechnungen wurde jeweils nur ein Parameter geändert, die anderen beiden wurden von den Standardparametern (Winkel 15°, Radius 8 mm, Zylinderlänge 5 mm) übernommen.

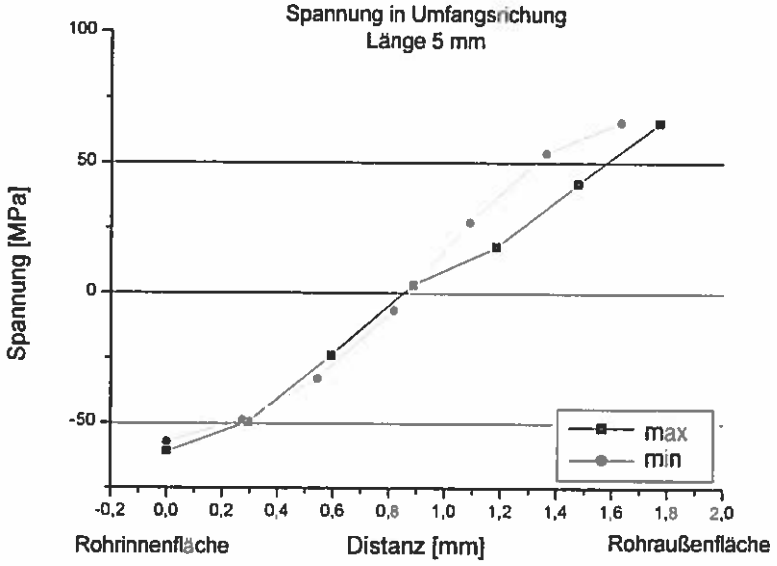
3.9 FEM-Ergebnisse für die Rohre 50 x 2

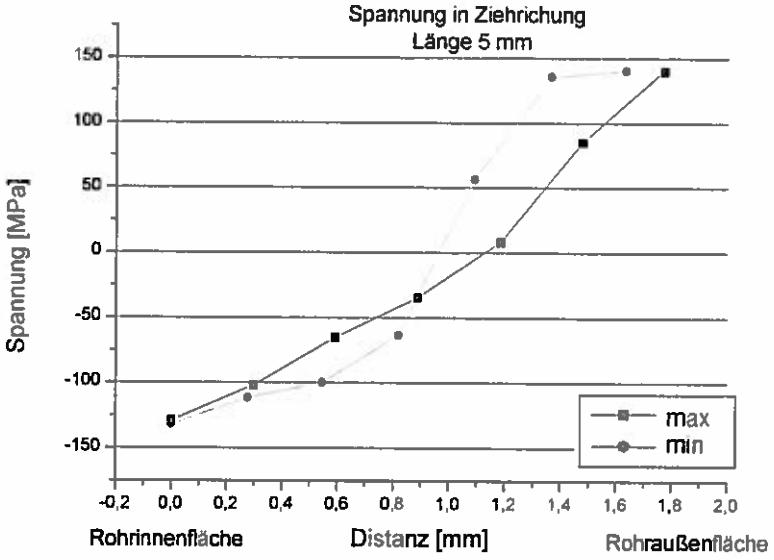
Einfluss Zylinderlänge

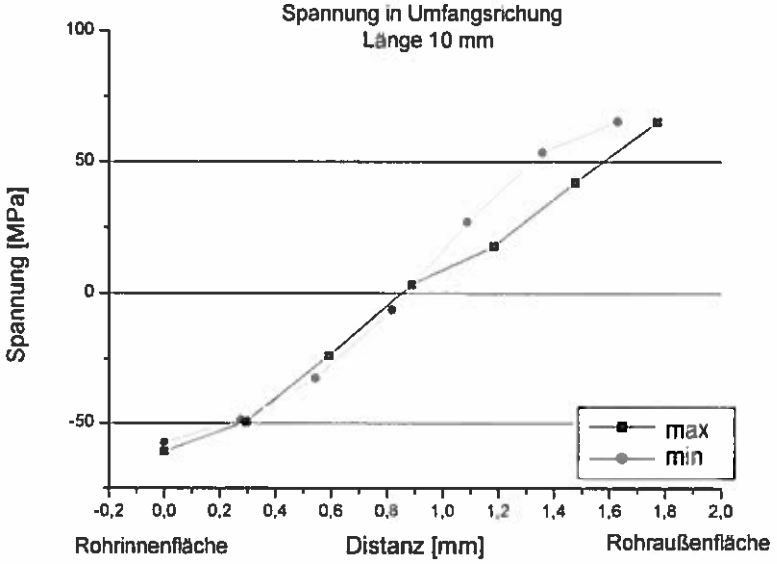
Standard: Ziehholöffnungswinkel 15°, Radius 8 mm

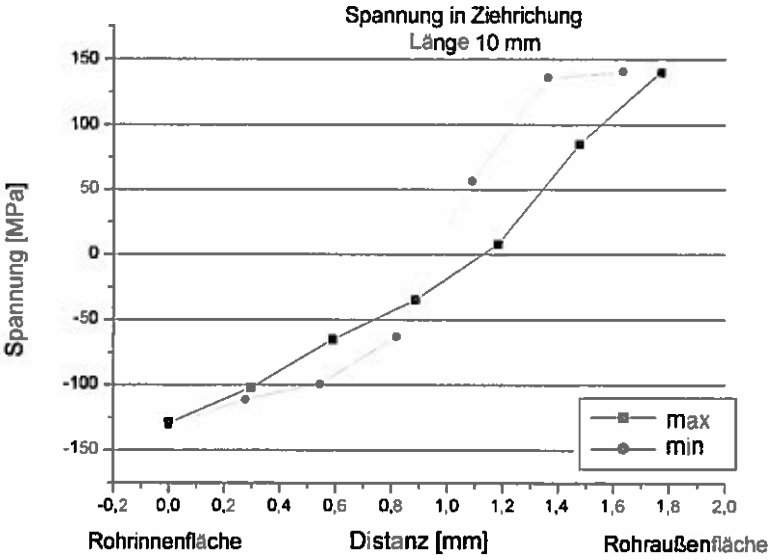





Spannung in Umfangsrichung
Länge 5 mm
Spannung [MPa]
100
50
0
-50
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
max
min
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche

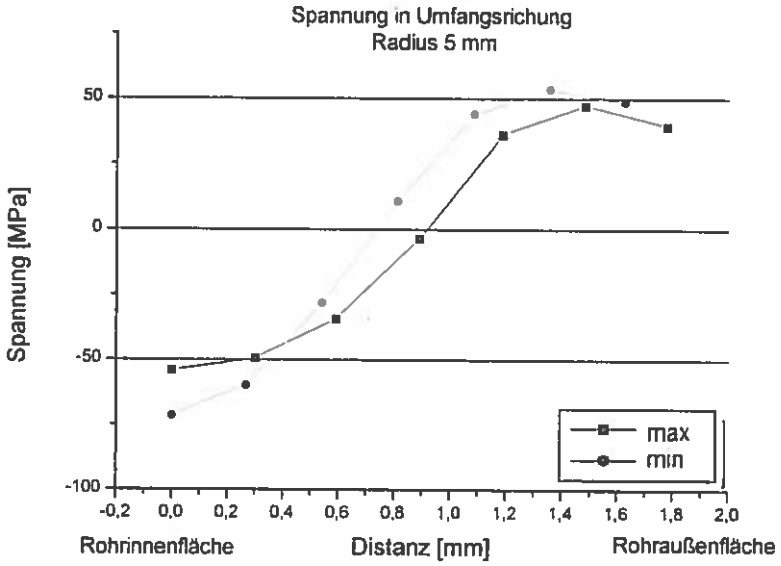

Spannung in Ziehrichung
Länge 5 mm
Spannung [MPa]
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
max
min
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche

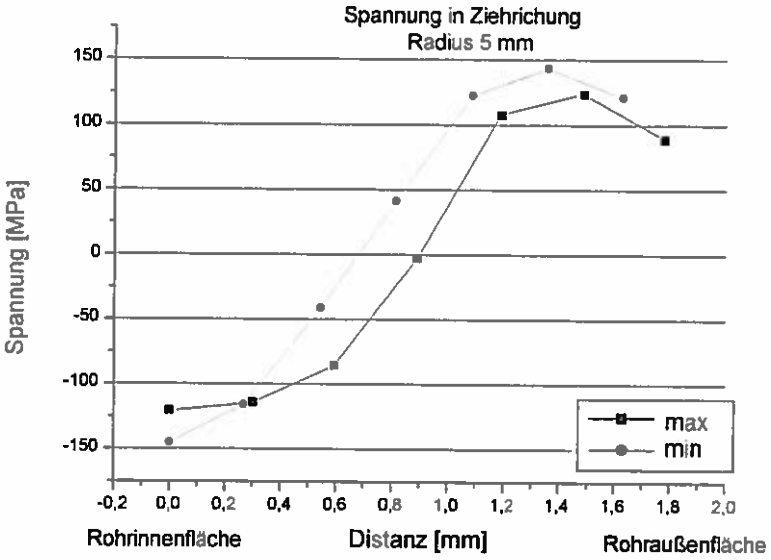

Spannung in Umfangsrichung
Länge 10 mm
Spannung [MPa]
100
50
0
-50
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
max
min
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche

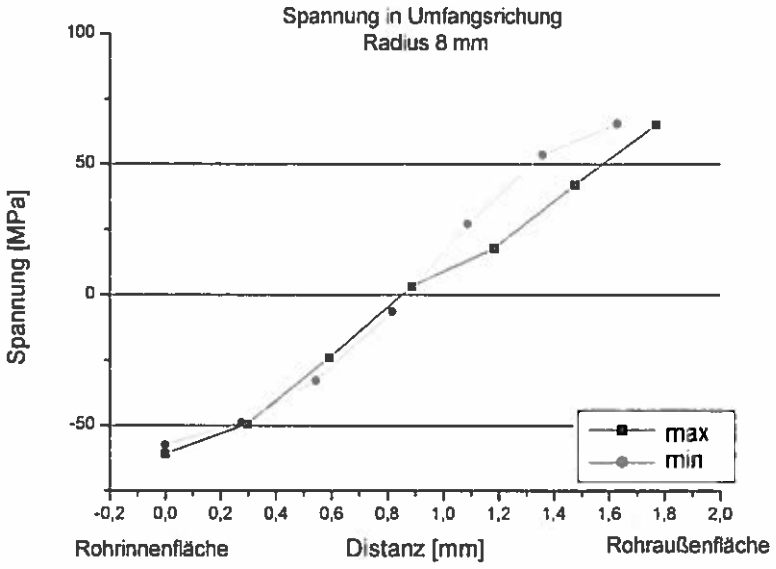

Spannung in Ziehrichung
Länge 10 mm
Spannung [MPa]
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
max
min
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche

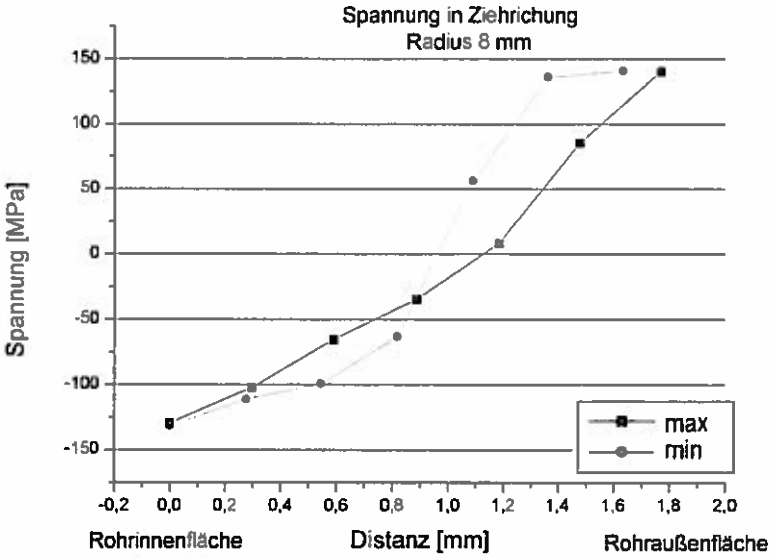
Einfluss Radius

Standard: Ziehholöffnungswinkel 15°, Zylinderlänge 5 mm



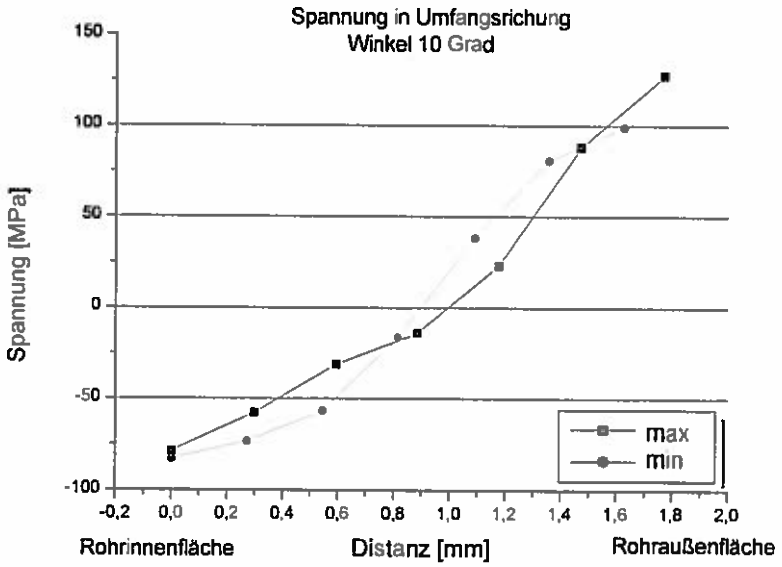


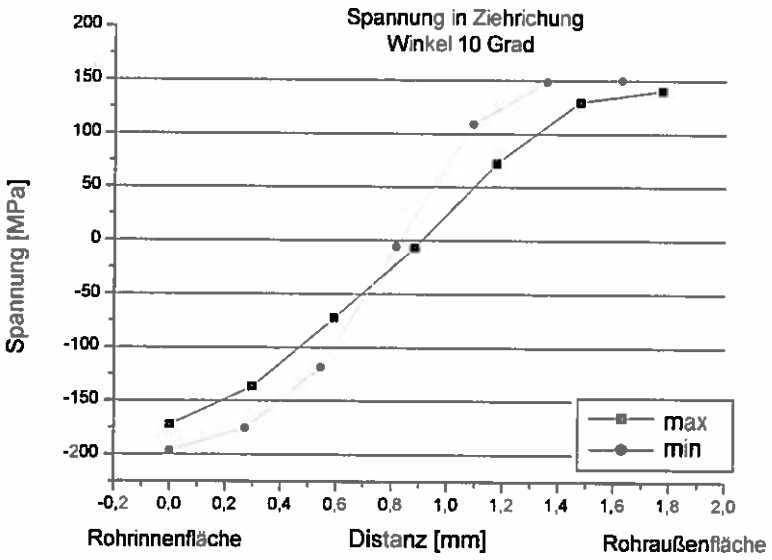

Spannung in Umfangsrichung
Radius 8 mm
Spannung [MPa]
100
50
0
-50
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
max
min
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche

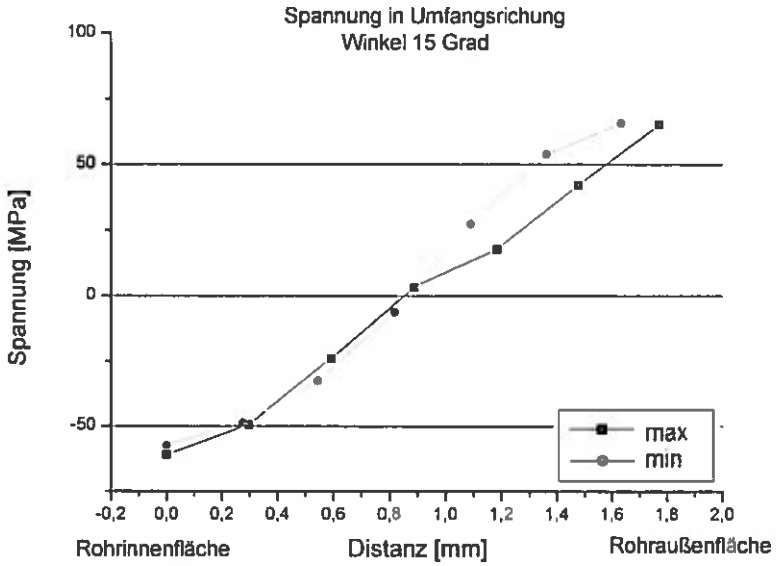

Spannung in Ziehrichung
Radius 8 mm
Spannung [MPa]
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
max
min
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche

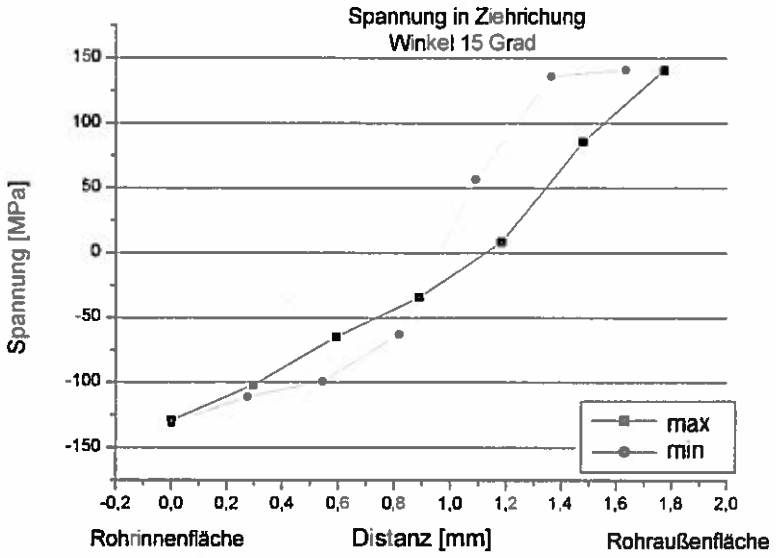
Einfluss Ziehwinkel

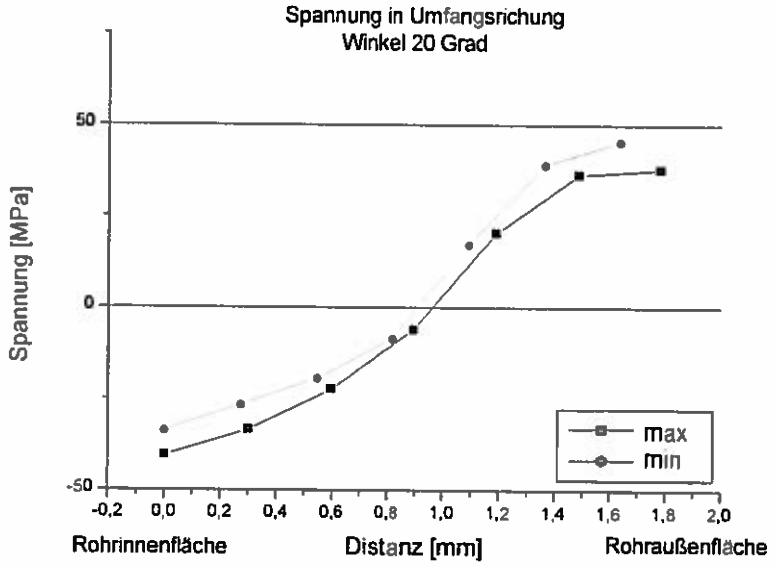
Radius 8 mm, Zylinderlänge 5 mm

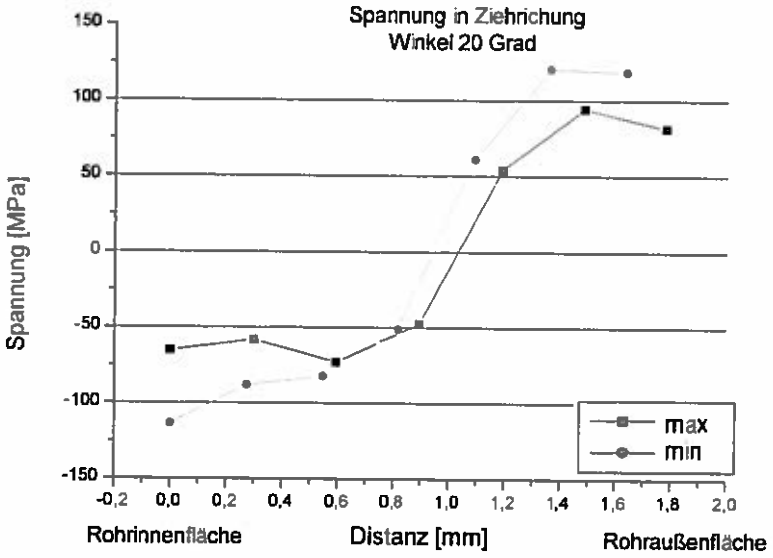





Spannung in Umfangsrichung
Winkel 15 Grad
Spannung [MPa]
100
50
0
-50
max
min
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche


Spannung in Ziehrichung
Winkel 15 Grad
Spannung [MPa]
150
100
50
0
-50
-100
-150
max
min
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche


Spannung in Umfangsrichung
Winkel 20 Grad
Spannung [MPa]
50
0
-50
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
max
min
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche


Spannung in Ziehrichung
Winkel 20 Grad
Spannung [MPa]
150
100
50
0
-50
-100
-150
-0,2
0,0
0,2
0,4
0,6
0,8
1,0
1,2
1,4
1,6
1,8
2,0
max
min
Rohrinnenfläche
Distanz [mm]
Rohraußenfläche

3.10 Literatur

1 Krause, H., H. H. Jühe, R. Kopp und K. R. Baldner
Ziehverfahren beeinflusst Eigenspannungszustand
Drahtwelt 1978, H. 11, S. 428-432

2 Skolyszewski, Andrzej
Größe und Verteilung von Eigenspannungen in Rohren
Bänder Bleche Rohre 1986, H. 7, S. 137-140

3 Bühler, Hans und Peter-Jürgen Kreher
Eigenspannungen in kalt gezogenen Rohren
Archiv für das Eisenhüttenwesen 1968, H. 5, S. 353-359

4 Dahl, Winfried und Heinz Mühlenweg
Eigenspannungen und Verfestigungen beim Rohrziehen
Stahl u. Eisen 84 (1964), S. 1250-1260

5 Rasty, J. und D. Chapman
Effect of process variables on the tube drawing process and product integrity
PVP vol. 225 (1991), S. 81-94

6 Skolyszewski, Andrzej
Eigenspannungen vermindern in kaltgezogenen Stahlrohren
Bänder Bleche Rohre 1986, H. 5, S. 85-87

7 Gummert, Hans-Joachim
Ein Beitrag zur Untersuchung des Umformverhaltens von exzentrischen Rohren beim Kalt-Gleitziehen
Dissertation TU Clausthal, 1991

8 Gebhardt, J.
Werkstoffuntersuchungen zum Ziehen von Rohren mit und ohne Innenwerkzeug
Dissertation TU Clausthal, 1984

9 Funke, P. und J. Gebhardt
Untersuchung über den Zusammenhang zwischen verschiedenen Fertigungsbedingungen beim Ziehen von Rohren mit Innenwerkzeug und dem Eigenspannungszustand im gezogenen Rohr
Bericht zum AIF-Forschungsvorhaben 4733, Clausthal

10 Ziegler, Wolfgang
Die Auswirkung der Schmierbedingungen und der Vorverfestigung auf die maximale Formänderung beim Rohrziehen über feststehenden Dorn
Metall (1988) H. 4, S. 364-366

11 Donnison, Mike
Schmierstoffe für das Ziehen von Kupferrohr
Umformtechnik 26(1992) 2, S. 134-136

12 Daves, W. und F. D. Fischer
Finite-Element-Simulation des Ziehens von gekrümmten Drähten
Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Band 141(1996) 5, S. 195-198

4 Veröffentlichungen

Palkowski, H.; Brück, S.: Maßtoleranzen und Eigenspannungen beim Rohrziehen. Metall, 11/2007, S. 708-713

A. Carradò, D. Duriez, L. Barrallier, S. Brück, A. Fabre, U. Stuhr, T. Pirling, V. Klosek, H. Palkowski, "Variation of Residual Stresses in Drawn Copper Tubes", Mat. Science Forum 21 (2008), 571–572.

T. Pirling, A. Carradò, S. Brück and H. Palkowski "Neutron stress imaging of drawn copper tube: comparison with FE model", under revision in Metallurgical and Materials Transactions A.