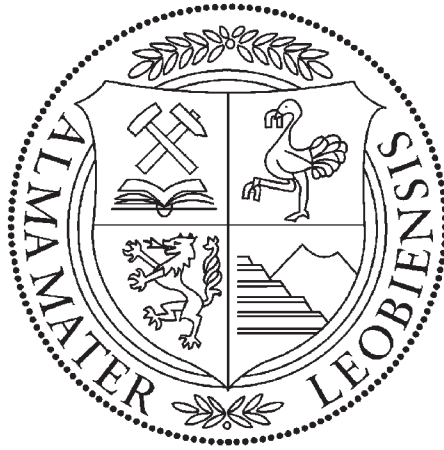


Lehrstuhl für Umformtechnik

Department Product Engineering,
Montanuniversität Leoben



DOKTORARBEIT

**MESSUNG UND BERECHNUNG VON EIGENSPANNUNGEN AN
KALTGEWALZTEN BÄNDERN**

DI Kurt Forstner

März, 2011

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Leoben, März 2011

Dipl.Ing. Kurt Forstner

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Umformtechnik im Department Product Engineering an der Montanuniversität Leoben.

Ich bedanke mich hiermit herzlichst bei meinem Betreuer, dem Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr, der mir durch seine vielen Ideen immer wieder wichtige Inputs für diese Arbeit gab. Auch durch sein kreatives und innovatives Denken war er mir ständig hilfreich bei der Erstellung meiner Arbeit.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem Zweitprüfer, Prof. Dipl.-Ing. Dr. Jozef Keckes, der es mir durch seine Unterstützung, vor allem in der Schlussphase meiner Dissertation, ermöglichte, meine Arbeit fristgerecht zu erstellen.

Einen herzlichen Dank an die Firma Böhler Ybbstal Precision Strip. Die in Zeiten einer wirtschaftlichen Krise Handschlagqualität bewies und es mir durch die Finanzierung eines Arbeitsjahres ermöglichte, diese Arbeit fertig zu stellen.

Ein herzliches Glück Auf an Thomas Hatzenbichler und Robert Kaiser, die mir viele wichtige Inputs zu dieser Arbeit gaben.

Danke schön auch an meine Kollegen, die mir in schwierigen Zeiten Kraft gaben und dadurch viel zum Erfolg beigetragen haben.

Ein ganz besonderer Dank gilt noch meiner lieben Frau Sylvia Holly, die mir den nötigen Rückhalt gab und mich immer wieder motivierte, wenn es gerade nicht nach Wunsch lief.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der Messung und Berechnung von Eigenspannungen in Blechbändern. Ziel dabei war es einerseits den Eigenspannungszustand von kaltgewalzten Blechbändern unter Verwendung der Bohrlochmethode zu erfassen, und andererseits eine alternative Messmethode für Eigenspannungen, nämlich das optische Messsystem Aramis[®], zu analysieren und zu vergleichen.

Nach der Analyse der kaltgewalzten Bänder wurden sogenannte Schneidlinien in Bezug auf ihre Eigenspannungen betrachtet. Diese Schneidlinien finden vor allem in der Papierindustrie als Stanzmesser für Kartonagen Anwendung. Dabei wurde zuerst die Säbelbildung der einzelnen Herstellstufen der Schneidlinien verglichen, dies geschah mit dem optischen Messsystem Aramis[®]. Die mit Aramis[®] gemessenen Säbel wurden anschließend in einer Simulation mit Deform berechnet und verglichen.

Als letzter Schritt wurde danach die Anwendbarkeit des optischen Messsystems Aramis[®] zur direkten Messung von Dehnungsrelaxationen betrachtet. Dabei wurden an den Schneidlinien durch Verwendung des Zerlegeverfahrens, Eigenspannungen durch einen Schnitt quer zur Walzrichtung freigelegt. In Verbindung mit einer numerischen Berechnung wurde der Eigenspannungszustand quer zur Schneide bestimmt. Danach wurden die Ergebnisse noch mit Analysen nach der Röntgenmethode verglichen.

Die Arbeit zeigt dabei einen Vergleich unterschiedlicher Eigenspannungsmessmethoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit, Genauigkeit und auch der Kosten.

Abstract

The present work deals with the measurement und calculation of residual stress in steel strips. The aim was on the one hand to analyse the residual stress state of cold rolled steel strips with the hole drilling method and on the other hand to investigate a new possibility to measure residual stress with the optical measuring system Aramis[®] and to compare the results with the holedrilling method.

After analyzing the residual stress in the cold rolled steel strips so called cutting lines were investigated concerning the residual stress. These cutting lines are commonly used as cutting tools in the paper industry. First of all the sabre was measured in the different manufacturing stages with the optical measuring system Aramis[®]. Afterwards the measured sabres were calculated with the simulation software Deform and compared with the results of Aramis[®].

In the last step the applicability of the optical measuring system Aramis[®] for the direct measuring of strain relaxation was considered. For that purpose residual stress of cutting lines were exposed by cutting the lines cross to the rolling direction. In conjunction with a numerical analysis the residual stress state was analysed cross to the rolling direction. Afterwards the results were compared with the results of the x-ray method.

The work shows a comparison of different residual stress measurement methods concerning the applicability, precision and costs.

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Danksagung	II
Kurzfassung	III
Abstract	III
Inhaltsverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	IX
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufgabenstellung	1
1.3 Gewählte Vorgangsweise	2
I Theorie	3
2 Grundlagen der Eigenspannungen	3
2.1 Definition der Eigenspannungen	3
2.2 Beispiele für Eigenspannungen I., II. und III. Art	5
2.2.1 Eigenspannungen I. Art - Thermische Eigenspannungen	5
2.2.2 Eigenspannungen II. Art	6
2.2.3 Eigenspannungen III. Art - Eigenspannungen durch Versetzungen .	10
2.3 Die Grundgleichungen der Elastizitätstheorie	11
2.3.1 Elastizitätsgesetz	11
2.3.2 Feldgleichungen, Rand- und Anfangsbedingungen	12
2.3.3 Verschiebungs- und Spannungsdifferentialgleichungen	14
2.3.4 Ebene Probleme	15
2.4 Ursachen von Eigenspannungen	19
2.4.1 Plastische Deformationen	20

2.4.2	Temperaturfelder	22
2.4.3	Dilatation	24
2.4.4	Umwandlungsplastizität (TRIP)	26
2.5	Abbau von Eigenspannungen	28
3	Methoden zur Messung von Eigenspannungen	31
3.1	Zerlegeverfahren	32
3.2	Crack-Compliance-Methode	34
3.3	Bohrlochmethode	35
3.3.1	Grundlagen	36
3.3.2	Messung am Durchgangsloch	36
3.3.3	Anwendung auf die DMS-Rosette	40
3.3.4	Sackloch, allgemeiner Spannungszustand	44
3.3.5	Versuchsaufbau Bohrlochmethode	45
3.4	Ringkernverfahren	47
3.5	Randbedingungen und Einsatzgrenzen der Bohrlochmethode und des Ringkernverfahrens	48
3.6	Zerstörungsfreie Messmethoden	49
3.6.1	Röntgenmethode	49
3.6.2	Neutronenbeugung	54
3.6.3	Ultraschallmessung	54
3.6.4	Barkhausenrauschen - Analyse	55
3.6.5	3MA - Verfahren	55
3.6.6	Optische Messmethoden	56
3.7	Das optische Messsystem Aramis®	57
3.7.1	Grundlagen	57
3.7.2	Prinzip der Verformungsmessung	59
4	Herstellung von Kaltband	63
4.1	Verfahrensbeschreibung	63
4.2	Bandplanheit	64
4.2.1	Formabweichungen	66
4.2.2	Planheitsmesssysteme	71

4.2.3	Einflussfaktoren auf die Planheit	76
4.3	Bewertung der Unplanheiten und der Maßabweichungen	79
II	Praktische Untersuchungen	80
5	Verwendung von Aramis[®] zur Messung von Eigenspannungen	80
6	Untersuchungen an kaltgewalzten Bändern	84
6.1	Herstellung der kaltgewalzten Bänder	84
6.2	Angewandte Messverfahren	85
7	Untersuchungen an Schneidlinien	86
7.1	Eigenspannungen in Schneidlinien	86
7.2	Verwendete Messmethoden	90
8	Messungen und Berechnungen	92
8.1	Messungen an kaltgewalzten Bändern	92
8.1.1	Messungen nach der Bohrlochmethode	92
8.1.2	Messungen mit Aramis [®]	93
8.2	Untersuchung von Schneidlinien	98
8.2.1	Messung und Berechnung der Säbeligkeit	98
8.2.2	Röntgenverfahren	110
8.2.3	Bohrlochverfahren	111
8.2.4	Zerlegeverfahren	112
9	Ergebnisse	116
9.1	Messung der Eigenspannungen an kaltgewalzten Bändern	116
9.1.1	Messungen nach der Bohrlochmethode	116
9.1.2	Messungen mit Aramis [®]	117
9.2	Untersuchung von Schneidlinien	119
9.2.1	Messung und Berechnung der Säbeligkeit	119
9.2.2	Röntgenverfahren	124
9.2.3	Bohrlochverfahren	126
9.2.4	Zerlegeverfahren	126

9.2.5	Vergleich der Aramis [®] - mit den Röntgenmessungen	131
10	Diskussion	133
10.1	Messung der Eigenspannungen in kaltgewalzten Bändern	133
10.2	Messung der Säbeligkeit	134
10.3	Röntgenverfahren	135
10.4	Bohrlochverfahren	135
10.5	Zerlegeverfahren	135
10.6	Vergleich der optischen Dehnungsmessung mit der Röntgen-Messung	136
10.7	Gesamtbetrachtung	136
11	Zusammenfassung	138
12	Ausblick und Empfehlungen	140
	Abbildungsverzeichnis	141
	Tabellenverzeichnis	145
	Literaturverzeichnis	146

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

z.B.	zum Beispiel
d.h.	das heißt
u.a.	unter anderem
o.dgl	oder dergleichen
bzw.	beziehungsweise
etc.	et cetera
DMS	Dehnmessstreifen
kfz	kubisch flächenzentriert
krz	kubisch raumzentriert

Kleine griechische Buchstaben

α	$\left[\frac{1}{K}\right]$	linearer Wärmeausdehnungskoeffizient
$\delta_{i,j}$	$[-]$	KRONECKER-Symbol, Einheitstensor
δ_{tot}^t		totale Volumsdehnung
δ^t		bis zum jeweiligen Zeitschritt entstandenen teilweisen Betrag
$\Delta\delta^t$		Inkrement der umwandlungsbedingten Volumsdehnung
β		Proportionalitätsfaktor
$\epsilon, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z$	$[-]$	Dehnungen
$\epsilon_{i,j}$	$[-]$	Verzerrungstensor
λ, μ	$[GPa]$	LAMÉsche Konstanten
ν	$[-]$	Querkontraktionszahl
σ	$[MPa]$	Normalspannung
$\sigma_{i,j}$	$[MPa]$	Spannungstensor
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	$[MPa]$	Hauptnormalspannungen nach ihrer Größe sortiert
$\sigma^I, \sigma^{II}, \sigma^{III}$	$[MPa]$	Eigenstressen, I., II. und III. Art
σ_F	$[MPa]$	Fließgrenze
τ	$[MPa]$	Schubspannung

Kleine lateinische Buchstaben

u,v,w	$[m]$	Verschiebungen in x-, y- und z-Richtung
u_i	$[m]$	Verschiebungsvektor
u,v,w	$[m]$	Verschiebungen in x-, y- und z-Richtung

Große lateinische Buchstaben

\bar{A}, \bar{B}		DMS-Konstanten
E	$[GPa]$	Elastizitätsmodul
E_{ijkl}	$[GPa]$	Elastizitätstensor
ESZ		Ebener Spannungszustand
EVZ		Ebener Verzerrungszustand
$\text{Ink}(\epsilon_{i,j})$		Kompatibilitätsbedingung, linearer Differentialoperator 2.Stufe
S_{ij}		deviatorischen Spannungskomponenten
X_j		Volumenkräfte
G	$[GPa]$	Schubmodul
J_2	$[GPa]^2$	Zweite Invariante des Spannungstensors
T, T_0	$[^\circ\text{C}, \text{K}]$	Temperatur, Ausgangstemperatur
ΔV		Volumenänderung

Indizes

i,j,k,...	Tensorindizes mit den Werten 1,2,3
x,y,z,...	Koordinatenrichtungen im (x,y,z)-Koordinatensystem
$\alpha, \beta, \gamma, \dots$	Tensorindizes mit den Werten 1,2
1,2,3	Zählindex bei Eigenwerten und Invarianten
max	Maximalwert
q	Eigenspannungsquelle, tief- oder hochgestellt
0	Referenzzustand
th	thermisch
'	im transformierten Koordinatensystem

Ableitungen

$\frac{\partial()}{\partial x_i} = ()_{,i}$	Partielle Ableitung bei Funktionen mehrerer Veränderlicher x_i
---	--

1 Einleitung

1.1 Motivation

In zahlreichen Beanspruchungsfällen der Praxis spielen innere Spannungen, die sich den belastungsbedingten äußeren Spannungen überlagern, für die Versagensgrenzen von Bauteilen sowie Bauteilpaarungen unter mechanischen oder komplexen Beanspruchungen eine Rolle. Durch die Überlagerung von Eigenspannungen mit Lastspannungen bei Temperaturen unterhalb der Rekristallisationstemperatur der verwendeten Werkstoffe können sowohl negative als auch positive Veränderungen der statischen und dynamischen Festigkeitseigenschaften auftreten [1].

Neben einer Beeinflussung der Festigkeitseigenschaften sind Eigenspannungen auch für verschiedene Oberflächeneigenschaften bei mechanisch-chemischer sowie tribologischer Beanspruchung von großem Einfluß, da in zahlreichen Fällen Eigenspannungen und Lastspannungen im oberflächennahen Bereich Maximalwerte annehmen und einen ausgeprägten Gradienteneinfluß aufweisen [1].

Die beachtliche Entwicklung der experimentellen Eigenspannungs-Messverfahren während der letzten Jahre sowie die Anwendungsmöglichkeiten der Finite-Element-Methode zur numerischen Behandlung räumlicher Spannungszustände im elastischen und elastisch-plastischen Gebiet haben einerseits die Chancen einer quantitativen Bewertung von Eigenspannungszuständen bei der Formulierung von Versagenskriterien erhöht, andererseits zwingen die Leistungsmöglichkeiten und -grenzen der mechanischen und röntgenographischen experimentellen Eigenspannungs-Messmethoden zu einer vereinheitlichten Sprachregelung einer zweckmäßigen Definition von Eigenspannungen, die dem Aufbau technischer Werkstoffe in ausreichendem Maße gerecht wird [1].

Aufgrund des Herstellungsprozesses können Eigenspannungen in nahezu allen Komponenten gefunden werden. Diese Eigenspannungen können sich, abhängig von der Größe und Richtung, sowohl negativ als auch positiv auf das Verhalten des Bauteils auswirken. Als Beispiel für positive Eigenspannungen sei hier das Kugelstrahlen genannt. Dabei wird durch das gezielte Einbringen von Druckeigenspannungen eine Rissinitierung an der Oberfläche verhindert. Als negatives Beispiel für Eigenspannungen können thermisch bedingte Spannungen, die sich als Verzug äussern, genannt werden. Sie verändern die Maßhaltigkeit eines Bauteils grawierend.

Man kann somit festhalten, dass keine eigenspannungsfreie Werkstoffe und Bauteile existieren. Die werkstoff-, fertigungs- und beanspruchungsbedingten Entstehungsursachen der Eigenspannungen erstrecken sich auf makroskopische, mikroskopische und submikroskopische Bereiche und weisen in der Regel einen hohen Räumlichkeitsgrad auf [1].

1.2 Aufgabenstellung

In dieser Arbeit wurden zuerst kaltgewalzte schmale (Breite ca. 400mm) Blechbänder untersucht. Die Aufgabe bestand darin den Eigenspannungszustand in unterschiedlichen

Herstellungstufen nach der Bohrlochmethode zu analysieren und erste Versuche mit dem optischen Messsystem Aramis[®] durchzuführen.

Eine Anwendung für diese kaltgewalzten Bänder sind Schneidlinien. Sie werden für das Stanzen von Kartonagen in großen Pressen eingebaut. Durch das Erodieren von Ausnehmungen auf der Rückseite der Schneide, kann es zu Verzug der gesamten Schneidlinie kommen. Es bildet sich ein Säbel. Dieser Säbel verhindert einen exakten Einbau in die Presse, wodurch es beim Rüsten der Anlage zu längeren Stillstandzeiten und erhöhten Herstellkosten kommt.

Eine weitere Aufgabe in dieser Arbeit war es, eine Möglichkeit zu finden, den Eigenspannungszustand, der diesen Verzug verursacht, zu beschreiben und einer oder mehreren Produktionsstufen zuzuordnen. Dazu wurde das optische Messsystem Aramis[®], die Bohrloch- und die Röntgenmethode zur Messung von Eigenspannungen verwendet. Darauf aufbauend bestand die Aufgabe darin, die unterschiedlichen Messmethoden hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit, Genauigkeit und der Kosten zu vergleichen.

Weiters sollte das Messsystem Aramis[®] dazu verwendet werden, Dehnungsrelaxationen, die aufgrund des Freilegens von Eigenspannungen nach dem Zerlegeverfahren entstehen, zu messen und durch die gewonnenen Daten mit Hilfe einer numerischen Berechnung, die ursprünglich vorherrschenden Eigenspannungen zu berechnen.

1.3 Gewählte Vorgangsweise

Um die in Kapitel 1.2 beschriebene Aufgabenstellung abzuarbeiten wurde folgende Vorgehensweise festgelegt:

1. Bestimmung von Eigenspannungen nach dem Bohrlochverfahren in kaltgewalzten Bändern und Vergleich der Ergebnisse mit Messungen des optischen Messsystems Aramis[®].
2. Untersuchung der Anwendbarkeit des optischen Messsystems Aramis[®] zur Messung von Verzug bzw. Säbelbildung an Schneidlinien.
3. Analyse der Prozessschritte bei der Herstellung von Schneidlinien, die als kritisch in Bezug auf die Initiierung von Eigenspannungen angesehen werden müssen.
4. Verwendung des optischen Messsystems Aramis[®] und des Zerlegeverfahrens zur Messung von Relaxationen im Material an der Schnittfront, um in weiterer Folge mit Hilfe einer numerischen Berechnung die Eigenspannungen quer zur Walzrichtung zu berechnen.
5. Vergleich der berechneten Eigenspannungen mit Messungen nach dem Röntgenverfahren.

Teil I

Theorie

2 Grundlagen der Eigenspannungen

2.1 Definition der Eigenspannungen

G. Masing [2] beschrieb 1925 erstmals drei Arten von Eigenspannungen und bezeichnete sie mit römischen Ziffern als Eigenspannungen I., II. und III. Art. Im deutschen Sprachgebrauch lassen sich eine Vielzahl von Begriffen wie Eigenspannungen, Restspannungen, Innere Spannungen, Makro eigenspannungen und Mikro eigenspannungen finden. Auch in der englischen Literatur sieht es ähnlich aus. Diese Vielfalt an Begriffen führt natürlich auch zu Missverständnissen. So einigte man sich Ende der 70er Jahre auf die Definition der Eigenspannungen gemäß G. Masing und unterschied Eigenspannungen I., II. und III. Art, die wie folgt definiert wurden [3] [4]:

1. Eigenspannungen I. Art sind über größere Werkstoffbereiche (mehrere Körner) nahezu homogen. Die mit den Eigenspannungen I. Art verbundenen inneren Kräfte sind bezüglich jeden Schnittes durch den ganzen Körper im Gleichgewicht. Ebenso verschwinden die mit ihnen verbundenen inneren Momente bezüglich jeder Achse. Bei Eingriffen in das Kräfte- und Momentengleichgewicht von Körpern, in denen Eigenspannungen I. Art vorliegen, treten immer makroskopische Maßänderungen auf.
2. Eigenspannungen II. Art sind über kleine Werkstoffbereiche (ein Korn oder Kornbereiche) nahezu homogen. Die mit Eigenspannungen II. Art verbundenen inneren Kräfte und Momente sind über hinreichend viele Körner im Gleichgewicht. Bei Eingriffen in dieses Gleichgewicht können makroskopische Maßänderungen auftreten.
3. Eigenspannungen III. Art sind über kleinste Werkstoffbereiche (mehrere Atomabstände) inhomogen. Die mit Eigenspannungen III. Art verbundenen inneren Kräfte und Momente sind in kleinen Bereichen (Teile eines Kornes) im Gleichgewicht. Bei Eingriffen in dieses Gleichgewicht treten keine makroskopischen Maßänderungen auf.

In [3] und [5] wird gezeigt, daß diese Definitionen ausreichend sind, um in stofflich zusammenhängenden technischen Bauteilen, bei denen mechanische Auswirkungen von nicht mechanischen Vorgängen fehlen, alle auftretenden Eigenspannungszustände beschreiben zu können. Spannungszustände von Schraub-, Niet- und Schrumpfverbindungen sind also ebensowenig in die Eigenspannungsdefinitionen einbezogen, wie Spannungszustände als Folge von lokalen Temperaturunterschieden. Abb. 1 zeigt schematisch die lokal mögliche

Überlagerung von Eigenspannungen I., II. und III. Art am Beispiel des Verlaufs der y-Komponente eines Gesamteigenspannungszustandes, für die sich quantitativ ergibt:

$$\sigma_y(x, y) = \sigma^I(x, y) + \sigma^{II}(x, y) + \sigma^{III}(x, y) \quad (1)$$

mit

$$\sigma^I = \left(\frac{\int \sigma dA}{\int dA} \right) \text{ mehrere Körner} \quad (2)$$

und

$$\sigma^{II} = \left(\frac{\int \sigma dA}{\int dA} \right) \text{ ein Korn} - \sigma^I \quad (3)$$

sowie

$$\sigma^{III} = (\sigma_y - \sigma^I - \sigma^{II}) \text{ an einem Punkt } x, y \quad (4)$$

Die Definitionen sind bei Überlagerung von Eigenspannungen anwendbar, wie sie in technischen Werkstoffen meistens vorliegen.

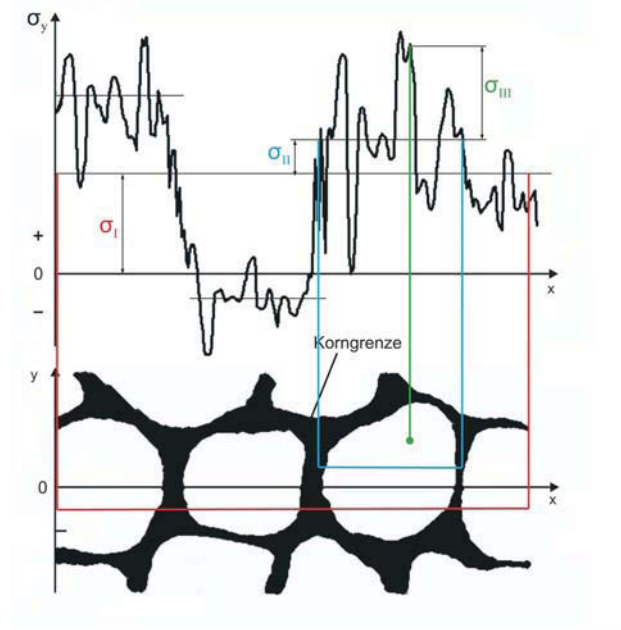


Abbildung 1: Überlagerung von Eigenspannungen I., II. und III. Art [3].

Der homogene Spannungsanteil über hinreichend viele Körner liefert die Eigenspannungen I. Art. Die Schwankungen der mittleren Eigenspannungen der Körner um die Eigenspannung I. Art, also die homogenen Spannungsanteile der Körner, sind die Eigenspannungen

II. Art. Die Abweichungen der lokalen Eigenspannungen von der Summe aus Eigenspannungen I. und II. Art liefern die Eigenspannungen III. Art. Man hat sich geeinigt, Eigenspannungen I. Art auch als Makro eigenspannungen, Eigenspannungen II. und III. Art zusammenfassend als Mikro eigenspannungen zu bezeichnen [3] [6].

Im Wesentlichen können die Spannungen über ihre charakteristische Länge l_0 definiert werden. Dies ist die Länge über die die Spannungen ausgeglichen werden. Die Eigenspannungen I. Art haben dabei ein l_0 im makroskopischen Bereich. Solche Eigenspannungen können durch kontinuierliche Modelle, die die Mehrphasigkeit des Materials ignorieren, bestimmt werden, oft unter Verwendung der finiten Elemente. Die Eigenspannungen II. Art haben meist eine Ausdehnung über einige Körner ($l_{0,II} \approx 3-10 \times$ Korngröße). Die Eigenspannungen III. Art sind schließlich nur im Bereich einiger Atome wirksam ($l_{0,III} <$ Korngröße), verursacht z.B. durch Fehlstellen oder Zwischengitteratome [7] [8].

2.2 Beispiele für Eigenspannungen I., II. und III. Art

Im Folgenden werden die reinen Eigenspannungszustände I., II. und III. Art behandelt. Sie kommen allerdings in der Realität selten für sich alleine vor.

2.2.1 Eigenspannungen I. Art - Thermische Eigenspannungen

Als Beispiel betrachtet man einen elastisch isotropen, homogenen und umwandlungsfreien Zylinder, der von höherer Temperatur vom Zylindermantel auf Raumtemperatur gekühlt wird. Es lassen sich aufgrund der Temperaturverläufe Eigenspannungen für den Kern und den Mantel nach dem Auskühlen berechnen. Wegen der Temperaturdifferenz ergeben sich in Kern und Mantel unterschiedliche Wärmedehnungen, die sich aber aufgrund des stofflichen Zusammenhangs des Probenzylinders gegenseitig behindern. Daraus folgend ergeben sich im Rand Zug- und im Kern Druckspannungen [3].

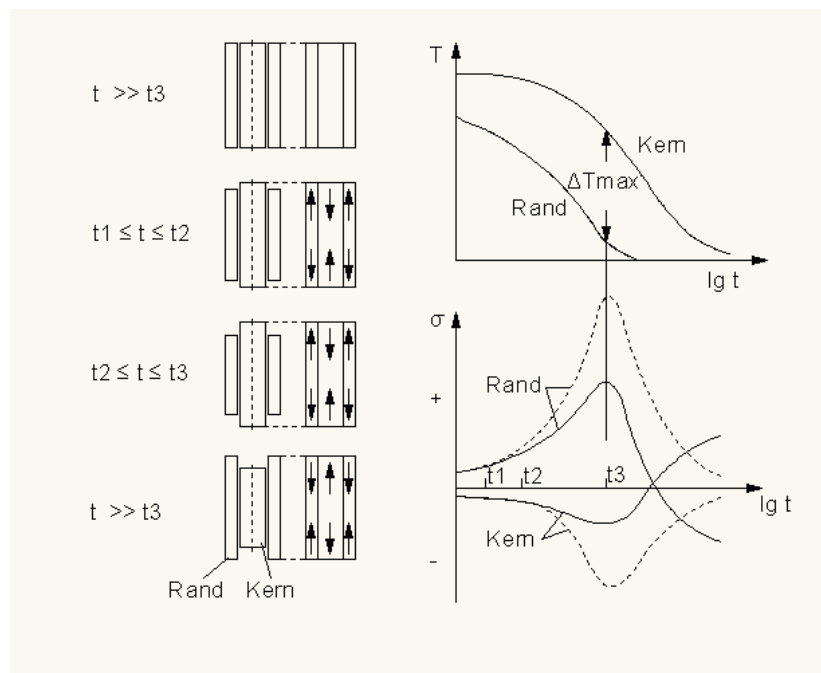


Abbildung 2: Ausbildung thermischer Eigenspannungen I. Art in einem Zylinderkörper [3].

Die gestrichelten Kurven in Abbildung 2, stellen die Spannungsverläufe für den Rand und den Kern dar, wenn die Vorgänge rein elastisch ablaufen. Kommt es jedoch zu einem Überschreiten der Fließgrenze, dann folgen die Spannungsverläufe den ausgezogenen Linien. Nach dem Erreichen der maximalen Temperaturdifferenz ΔT_{max} sind die plastischen Verformungen zu Ende. Durch den Temperatenausgleich kommt es zu einer Spannungsumkehr und die Zugspannungen im Rand werden zu Druckeigenspannungen und die Druckeigenspannungen im Kern zu Zugeigenspannungen I. Art. Bei hoher Anfangstemperatur und starker Abkühlung kann während der Ausgleichsphase die Streckgrenze erneut überschritten werden und der Körper am Rand zusätzlich kaltverformen [3].

Die Eigenspannungen in zylindrischen Proben sind umso höher, je höher die Temperaturdifferenz zwischen dem Rand- und dem Kernbereich ist, und umso niedriger, je größer die elastisch aufgenommenen Spannungen (bei hoher Warmstreckgrenze) des verwendeten Materials sind [1].

2.2.2 Eigenspannungen II. Art

Eigenspannungen II. Art entstehen, wenn bei der Vielkristallverformung von Korn zu Korn unterschiedliche Streckgrenzen auftreten. Dieser Unterschied in der Streckgrenze ist so zu erklären, dass die Körner, relativ zur Beanspruchungsrichtung, unterschiedlich orientiert sind und dadurch unterschiedliche Fließgrenzen in Bezug auf ein vorgegebenes äußeres System aufweisen. Man spricht von Streckgrenzen - Anisotropie.

Die Streckgrenze R_P bezeichnet den Beginn der plastischen Verformung. Sie ist verschieden für unterschiedliche Werkstoffe, aber auch für dasselbe Material kann sie sich von Probe zu Probe unterscheiden, wenn Einkristalle verschiedener Orientierung betrachtet werden. Weiters wird die Größe der Streckgrenze auch noch durch die Temperatur beeinflusst [9].

Der Beginn des plastischen Fließens bedeutet nichts anderes als den Beginn der Versetzungsbewegung. Eine Versetzung bewegt sich aufgrund einer Kraft, die in einer Gleitebene in Richtung des Burgers-Vektors (Gleitrichtung) auf sie wirkt. Daher ist nicht die aufgebrachte Zugspannung, sondern die resultierende Schubspannung im Gleitsystem für die Bewegung der Versetzungen entscheidend [9].

Das Schmid'sche Schubspannungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen der an die Probe anliegenden Zugspannung σ und der daraus im Gleitsystem resultierenden Schubspannung τ [10]:

$$\tau = \sigma \cdot \cos\kappa \cos\lambda \quad (5)$$

wobei κ bzw. λ die Winkel zwischen der Zugachse und der Gleitebenennormale bzw. Gleitrichtung bezeichnen.

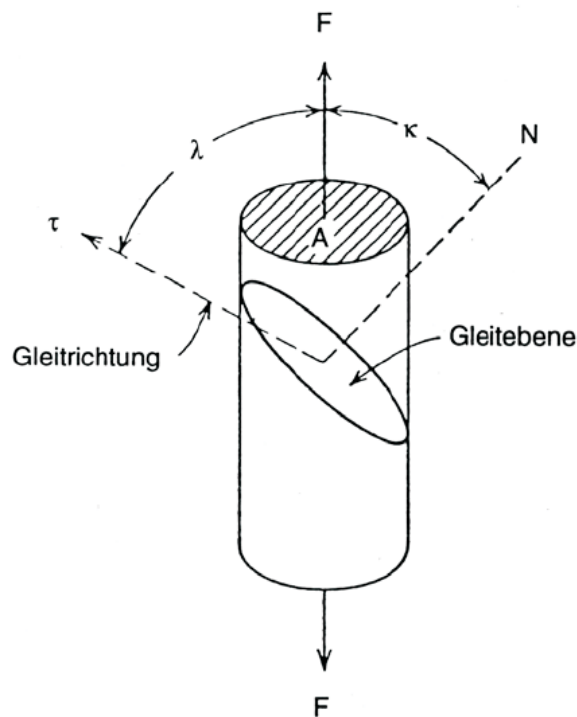


Abbildung 3: Schmid'sches Schubspannungsgesetz [10].

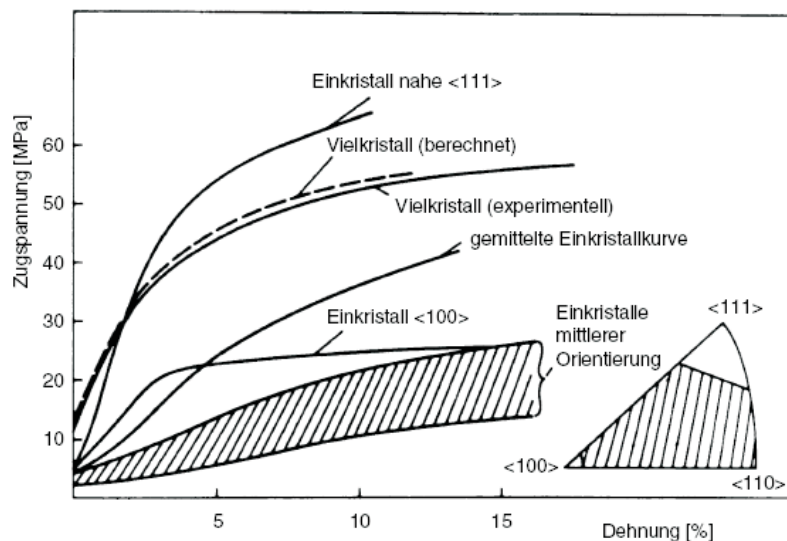


Abbildung 5: Einkristall-Verfestigungskurven von Al im Vergleich zur gemessenen und berechneten Vielkristall-Verfestigungskurve [9].

Deutlich zu erkennen ist, dass das Verfestigungsverhalten stark von der Kristallorientierung abhängt und deshalb manche Richtungen wesentlich früher plastifizieren. Dieses Verhalten wird als Kristallplastizität bezeichnet und spielt auch bei der Bildung von Eigenspannungen II. Art eine große Rolle.

Weiters weisen alle mehrphasigen Werkstoffe, deren Phasen unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten besitzen, bei Raumtemperatur Eigenspannungen II. Art auf. Das Ergebnis einer entsprechenden systematischen Untersuchung der zweiphasigen Legierung WC-Co ist in Abb. 6 wiedergegeben. Die Eigenspannungen in beiden Phasen sind als Funktion des Kobaltgehaltes aufgezeichnet. WC hat einen Ausdehnungskoeffizienten $\alpha_{WC} = 5,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, Co dagegen $\alpha_{Co} = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Dementsprechend bilden sich bei Abkühlung von höheren Temperaturen auf Raumtemperatur in den Wolframkarbidkörnern Druck- und in den Kobaltkörnern Zugeigenspannungen aus. Die Kreuze belegen, dass das Gleichgewicht der Korneigenspannungen in guter Näherung durch eine einfache Mischungsregel beschrieben werden kann. Innerhalb der Phasen und an den Phasengrenzen treten zusätzliche Eigenspannungen III. Art auf [12].

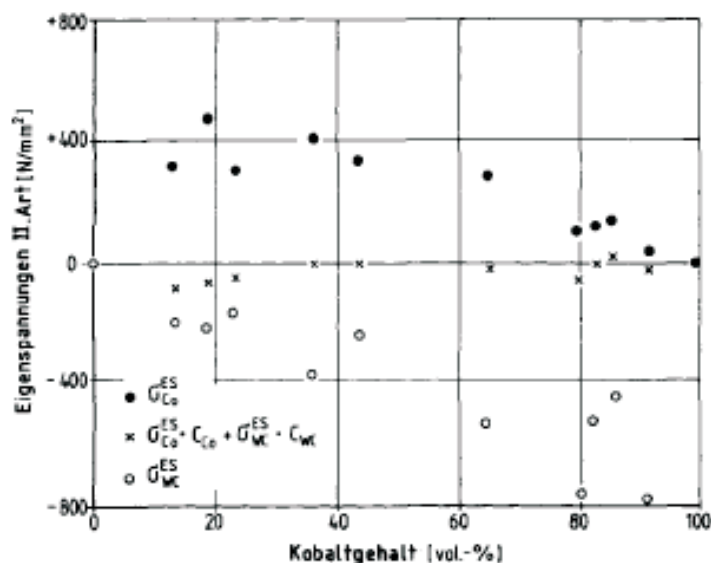


Abbildung 6: Eigenspannungen II. Art in heterogenen WC-Co-Legierungen unterschiedlicher Zusammensetzung [12].

Die Eigenspannungen II. Art in polykristallinen Werkstoffen werden durch Spannungs- und Dehnungsunverträglichkeit zwischen Körnern mit unterschiedlicher Orientierung während der mechanischen oder thermomechanischen Umformung verursacht. Daher ermöglicht eine Untersuchung der Abhängigkeit der Eigenspannungen von der Kornorientierung nicht nur eine eindeutige Abschätzung der Makroeigenspannungen, sondern hilft auch grundlegende Fragen, wie z.B. das Zusammenspiel unterschiedlicher Körner in polykristallinen Materialien während und nach der Umformung, zu beantworten. Des Weiteren liefern Untersuchungen der Abhängigkeit von der Kornorientierung Informationen über die thermo-mechanische Behandlung der Materialien [6].

2.2.3 Eigenspannungen III. Art - Eigenspannungen durch Versetzungen

Typische Beispiele für Eigenspannungen III. Art sind Verspannungen, die durch Versetzungen in den Körnern vielkristalliner Werkstoffe auftreten. Versetzungen sind linienförmige Gitterstörungen. Sie liegen in den Werkstoffen mit einer Kristallstruktur meist in hoher Dichte vor. Um diese Versetzungen treten charakteristische Gitterverzerrungen und mit dem Reziprokwert der Entfernung von der Versetzungslinie abfallende Eigenspannungen III. Art auf. Abb. 7 zeigt eine gemischte Versetzung in einem Kristallgitter. Die Versetzungslinie stellt an der Vorderseite des Kristallgitters eine Stufenversetzung, an der linken Seite eine Schraubenversetzung dar. Die Stufenversetzung ist die einfachste linienförmige Gitterstörung. Sie entstehen durch die Einführung einer überschüssigen Gitterhalbebene in ein sonst störungsfreies Gitter. Im Gegensatz zu den Stufenversetzungen bewirken Schraubenversetzungen ein zur Versetzungslinie rotationssymmetrisches Eigenspannungsfeld III. Art [11].

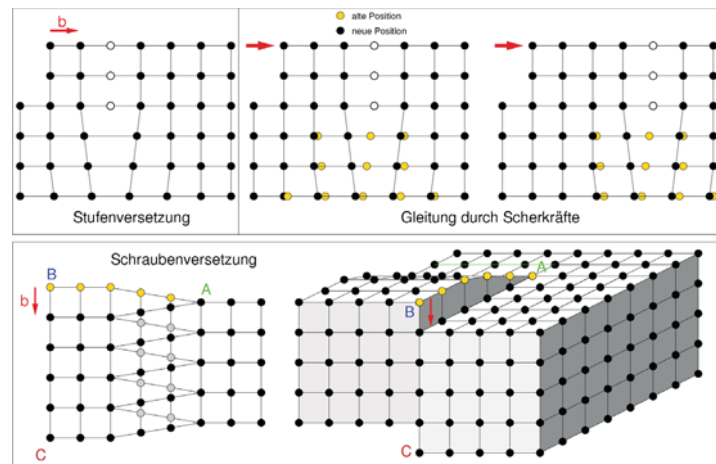


Abbildung 7: Stufen- und Schraubenversetzungen [13].

Im folgenden Kapitel wird nun auf die Grundgleichungen der Elastizitätstheorie, die zur Beschreibung der Eigenspannungproblematik notwendig sind, näher eingegangen.

2.3 Die Grundgleichungen der Elastizitätstheorie

Zur Beschreibung des allgemeinen räumlichen Eigenspannungsproblems bei einem gegebenen $\epsilon_{ij}^q(x_i)$ -Feld gilt es die Grundgleichungen der Elastizitätstheorie zu formulieren [14].

2.3.1 Elastizitätsgesetz

Das Elastizitätsgesetz verknüpft die Spannungen mit den Verzerrungen über den Elastizitätstensor (siehe Gl. 7). Im allgemeinen Fall enthält der Elastizitätstensor 21 unabhängige Komponenten, deren Anzahl durch Kristallsymmetrien weiter eingeschränkt werden kann. Isotropes Material enthält lediglich zwei Materialparameter (Elastizitätsmodul E und Querkontraktionszahl ν). Für ebene Probleme kann eine spezielle Formulierung angegeben werden [15].

Im Rahmen der linearen Elastizitätstheorie beschränkt man sich auf Materialien, die sich linear elastisch verhalten. Zwischen Spannungen und Dehnungen besteht ein linearer Zusammenhang, der im eindimensionalen Fall als Hooksches Gesetz bekannt ist [15]:

$$\sigma = E\epsilon \quad (6)$$

Für die Verallgemeinerung auf dreidimensionale Probleme wird eine lineare Abbildung zwischen zwei Tensoren zweiter Stufe, dem Spannungstensor σ_{ij} und dem Verzerrungstensor ϵ_{kl} benötigt. Dies leistet ein Tensor vierter Stufe [15].

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}\epsilon_{kl} \quad (7)$$

Die Komponenten E_{ijkl} des Elastizitätstensors nennt man Elastizitätskonstanten. Sie dürfen nicht von ϵ_{kl} abhängen, können aber (bei inhomogenen Materialien) explizit vom Ort x_m abhängen, müssen also keine Konstanten sein [15].

2.3.2 Feldgleichungen, Rand- und Anfangsbedingungen

Die wichtigsten Grundgleichungen der linearen statischen Elastizitätstheorie setzen sich aus den Gleichgewichtsbedingungen, der Kinematik und dem Elastizitätsgesetz zusammen. Diese Grundgleichungen stellen Feldgleichungen dar, da durch sie der Verlauf der Feldgrößen u_i , ϵ_{ij} und σ_{ij} (Verschiebungen, Verzerrungen und Spannungen) im Körper bestimmt wird [16].

Es werden kleine Verschiebungen $u_i(x_i)$ vorausgesetzt. Dann gelten für den Zusammenhang zwischen Dehnungstensor ϵ_{ij} und Verschiebungsvektor u_i die Gleichungen der linearen Kinematik. Die Gleichgewichtsbedingungen im Inneren des Kontinuums (Statik) werden am unverformten Volumenelement aufgestellt. Es werden Homogenität, Isotropie und physikalische Linearität des elastischen Körpers angenommen. Dann gilt für die Kopplung zwischen Dehnungen ϵ_{ij} und Lastspannungen σ_{ij} das entsprechende Stoffgesetz nach Hooke. Die Grundgleichungen lauten somit [14]:

$$\text{Kinematik} \quad \epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (8)$$

$$\text{Statik} \quad \sigma_{ij,i} + X_j = 0 \quad (9)$$

$$\text{Stoffgesetz} \quad \epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}(\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\delta_{ij}\sigma_{kk}) \quad (10)$$

X_j ...Volumenkräfte¹

$$\sigma_{ij,i} = \frac{\partial \sigma_{1j}}{\partial x_1} + \frac{\partial \sigma_{2j}}{\partial x_2} + \frac{\partial \sigma_{3j}}{\partial x_3}$$

Damit stehen 15 Gleichungen für die 15 unbekanntenen Feldgrößen² u_i , ϵ_{ij} , σ_{ij} zur Verfügung (3 Verschiebungen und je 6 Dehnungen und Spannungen), mit Hilfe derer die Feldgrößen bestimmt werden können. Zur eindeutigen Lösung eines gegebenen Problems sind außerdem Randbedingungen erforderlich [16].

Bei den entsprechenden Randwertproblemen unterscheidet man drei Fälle: Das 1. Randwertproblem liegt vor, wenn auf der gesamten Körperoberfläche Spannungsrandbedingungen in Form von Belastungen vorgegeben sind. Das sogenannte 2. Randwertproblem ergibt sich, wenn auf der gesamten Körperoberfläche Verschiebungsrandbedingungen u_i vorgeschrieben sind. Vom sogenannten 3. Randwertproblem spricht man bei gemischten

¹Die Volumenkraft ist eine Kraft, die im gesamten Volumen eines Körpers an jedem Massepunkt eines Körpers angreift (z.B. Schwerkraft).

²Eine Feldgröße ist eine physikalische Größe, die zur Beschreibung des Zustandes eines physikalischen Feldes dient.

Randbedingungen, d.h. wenn auf einem Teil Spannungsrandbedingungen und auf dem anderen Teil Verschiebungsrandbedingungen vorgegeben sind [16].

Neben den Grundgleichungen stehen zur Lösung entsprechender Randwertprobleme außerdem die Kompatibilitätsbedingungen (siehe Gl. 14) zur Verfügung.

Die Gleichungen (9) sind die drei Kräftegleichgewichtsbedingungen. Die drei Momentengleichgewichtsbedingungen werden durch die Symmetrie des Lastspannungstensors σ_{ij} erfüllt. Die Symmetrie des Dehnungstensors ϵ_{ij} folgt aus den Gleichungen (8). Eliminiert man die Verschiebungen u_i aus den Gleichungen (8), erhält man die Kompatibilitätsbedingung. Das Gleichungssystem (8) bis (10) lautet dann [14]:

$$\text{Komp. Bed.} \quad \epsilon_{ij,kl} + \epsilon_{kl,ij} - \epsilon_{ij,ik} - \epsilon_{jl,ik} = 0 \quad (11)$$

$$\text{Statik} \quad \sigma_{ij,i} + X_j = 0 \quad (12)$$

$$\text{Stoffgesetz} \quad \epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}(\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu}\delta_{ij}\sigma_{kk}) \quad (13)$$

Schreibt man die Gleichungen (11) für alle möglichen Indizes i,j,k,l aus, ergeben sich $3^4 = 81$ Gleichungen. Diese Anzahl reduziert sich auf sechs Gleichungen, da die restlichen Gleichungen wegen der Symmetrie von ϵ_{ij} entweder identisch erfüllt sind oder es sich um Wiederholungen handelt. Die sechs Kompatibilitätsbedingungen nach den Gleichungen (11) lauten [14]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \epsilon_{11}}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{22}}{\partial x_1^2} - 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{12}}{\partial x_1 \partial x_2} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \epsilon_{22}}{\partial x_3^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{33}}{\partial x_2^2} - 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{23}}{\partial x_2 \partial x_3} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \epsilon_{33}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \epsilon_{11}}{\partial x_3^2} - 2 \frac{\partial^2 \epsilon_{13}}{\partial x_1 \partial x_3} &= 0 \\ \frac{\partial^2 \epsilon_{11}}{\partial x_2 \partial x_3} - \frac{\partial}{\partial x_1} \left(-\frac{\partial \epsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \epsilon_{13}}{\partial x_2} + \frac{\partial \epsilon_{12}}{\partial x_3} \right) &= 0 \\ \frac{\partial^2 \epsilon_{22}}{\partial x_1 \partial x_3} - \frac{\partial}{\partial x_2} \left(-\frac{\partial \epsilon_{13}}{\partial x_2} + \frac{\partial \epsilon_{12}}{\partial x_3} + \frac{\partial \epsilon_{23}}{\partial x_1} \right) &= 0 \\ \frac{\partial^2 \epsilon_{33}}{\partial x_1 \partial x_2} - \frac{\partial}{\partial x_3} \left(-\frac{\partial \epsilon_{12}}{\partial x_3} + \frac{\partial \epsilon_{23}}{\partial x_1} + \frac{\partial \epsilon_{13}}{\partial x_2} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Die Gleichungen (14) sind die Kompatibilitätsbedingungen des allgemein räumlichen Verzerrungszustandes. Die sechs Gleichungen sind nicht unabhängig voneinander.

Danach bleiben für die Bilanz von Gleichungen und Unbekannten aus den Kompatibilitätsbedingungen (14) drei Gleichungen über. Zur Vereinfachung kann man Gleichung (14) abkürzen mit:

$$\text{Ink}(\epsilon_{ij}) = 0 \quad (15)$$

mit Ink als linearen Differentialoperator zweiter Ordnung, der die Differentiationsprozeduren nach den Gl. (14) auf ϵ_{ij} anwendet. Mit der Schreibweise nach Gl. (15) schreibt sich das Gleichungssystem (11) bis (13) in der Form:

$$\text{Ink}(\epsilon_{ij}) = 0 \quad (16)$$

$$\sigma_{ij,i} + X_j = 0 \quad (17)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \left(\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1 + \nu} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right) \quad (18)$$

Das Gleichungssystem (16) bis (18) gilt für Lastspannungen. Daher erfüllen die im Stoffgesetz Gl. (18) mit den Lastspannungen gekoppelten spannungswirksamen Dehnungen die Kompatibilitätsbedingung nach Gl. (16).

Die Bilanz zwischen den zur Verfügung stehenden Gleichungen und den auftretenden Unbekannten ist ausgeglichen. Es stehen immer gleich viele Unbekannte wie Gleichungen zur Verfügung.

Die das elastische Kontinuum beschreibenden Differentialgleichungen mit den zugehörigen Randbedingungen bezeichnet man als allgemeines Integrationsproblem oder als Randwertproblem der Elastizitätstheorie. Das Auffinden von analytischen Lösungen für den allgemeinen räumlichen Fall unter Einhaltung der Randbedingungen ist nur in wenigen Fällen möglich [14].

2.3.3 Verschiebungs- und Spannungsdifferentialgleichungen

In manchen Fällen ist es zweckmäßig, in den Gleichungen alle Unbekannten auf die Verschiebungen und Verschiebungsableitungen zurückzuführen. Dazu setzt man die kinematischen Beziehungen ins Hookesche Gesetz ein. Durch weiteres Einsetzen in die Gleichgewichtsbedingungen erhält man [16]:

$$(\lambda + \mu)u_{k,ki} + \mu u_{i,kk} + X_i = 0 \quad (19)$$

mit λ und μ als Lamésche Konstanten. Sie sind folgendermaßen definiert:

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}, \mu = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (20)$$

Diese Verschiebungsdifferentialgleichungen 2. Ordnung sind die Lamé-Navierschen Gleichungen. Es sind drei gekoppelte Differentialgleichungen für die drei unbekanntenen Verschiebungen u_i [16].

Mit Hilfe der Grundgleichungen ist es auch möglich die Verschiebungen und Verzerrungen zu eliminieren und damit auf reine Spannungsdifferentialgleichungen zu kommen. Dazu

braucht man die Gleichgewichtsbedingungen, das Hookesche Gesetz und die Kompatibilitätsbedingungen, in denen die Verschiebungen bereits eliminiert sind. Man geht von folgenden Feldgleichungen aus [16]:

$$\epsilon_{ij,kl} + \epsilon_{kl,ij} - \epsilon_{ij,kl} - \epsilon_{jl,ik} = 0 \quad (21)$$

$$\sigma_{ij,i} + X_j = 0 \quad (22)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \left(\sigma_{ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \delta_{ij} \sigma_{kk} \right) \quad \text{bzw.} \quad \sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\epsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \delta_{ij} \epsilon_{kk} \right) \quad (23)$$

Setzt man die zweite in die erste Beziehung ein, dann erhält man unter Berücksichtigung der dritten Beziehung nach Umformungen:

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu} \sigma_{kk,ij} - \frac{\nu}{1+\nu} \sigma_{kk,ll} \delta_{ij} + X_{i,j} + X_{j,i} = 0 \quad (24)$$

Diese Spannungsdifferentialgleichungen 2. Ordnung sind die Beltrami-Michellschen Gleichungen. Es sind sechs gekoppelte Differentialgleichungen für die sechs unbekanntten Spannungen σ_{ij} . Im Sonderfall verschwindender Volumenkräfte X_i kann man zeigen, dass auch $\sigma_{kk,ll}$ verschwindet und sich die Gleichungen somit vereinfachen zu [16]:

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu} \sigma_{kk,ij} = 0 \quad (25)$$

Die Lösung eines statischen Randwertproblems ist innerhalb der linearen Elastizitätstheorie eindeutig. Im nichtlinearen Fall kann es unter Umständen mehrere Lösungen geben [16].

2.3.4 Ebene Probleme

Viele technische Probleme sind von der Geometrie, der Belastung und den Randbedingungen her im wesentlichen nur zweidimensional. Dies gilt im speziellen für ebene Bauteile, die nur durch Kräfte innerhalb ihrer Ebene belastet sind. Dann reduziert sich die Zahl der Unbekannten sowie der Satz der Grundgleichungen auf zweidimensionale Differentialgleichungen und Beziehungen. Dementsprechend lassen sich solche Probleme einfacher behandeln und oft ist es möglich, Lösungen mit vergleichsweise geringem Aufwand zu finden [16].

2.3.4.1 Ebener Verzerrungszustand

Man spricht von einem ebenen Verzerrungszustand (EVZ), wenn bei einem linear elastischen Randwertproblem die Verschiebungskomponenten u_3 verschwindet und die beiden anderen Verschiebungskomponenten von der Koordinate x_3 unabhängig sind [16]:

$$\begin{aligned}
u_3 &= w = 0 \\
u_1 &= u = u(x, y) \\
u_2 &= v = v(x, y)
\end{aligned} \tag{26}$$

In diesem Fall verschwinden sämtliche Verzerrungskomponenten in x_3 -Richtung. Es verbleiben folgende Verzerrungen [16]:

$$\epsilon_{11} = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \epsilon_{22} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \epsilon_{12} = \gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \tag{27}$$

Der ebene Verzerrungszustand tritt in Bauteilen auf, deren Form und Belastung sich in z -Richtung nicht ändert und bei denen die Verschiebung w durch eine entsprechende Lagerung verhindert ist [16].

Der Verzerrungstensor ϵ_{ij} lässt sich in der reduzierten Form $\epsilon_{\alpha\beta}$ schreiben [15]:

$$\epsilon_{ij} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & 0 \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \epsilon_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} \end{bmatrix} \tag{28}$$

Aus dem dreidimensionalen Stoffgesetz folgt dann [15]:

$$\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \tag{29}$$

Damit kann σ_{33} in die Gleichungen für ϵ_{11} und ϵ_{22} eliminiert werden und man erhält [15]:

$$\begin{aligned}
\epsilon_{11} &= \frac{1}{E} \left[\sigma_{11} - \nu\sigma_{22} - \nu^2(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right] = \frac{1 - \nu^2}{E} \left(\sigma_{11} - \frac{\nu}{1 - \nu}\sigma_{22} \right) \\
\epsilon_{22} &= \frac{1}{E} \left[\sigma_{22} - \nu\sigma_{11} - \nu^2(\sigma_{11} + \sigma_{22}) \right] = \frac{1 - \nu^2}{E} \left(\sigma_{22} - \frac{\nu}{1 - \nu}\sigma_{11} \right)
\end{aligned} \tag{30}$$

Für die Schubverzerrung ϵ_{12} gilt [15]:

$$\epsilon_{12} = \frac{1}{2G}\sigma_{12} = \frac{1 + \nu}{E}\sigma_{12} \tag{31}$$

und wegen $\epsilon_{33} = \epsilon_{13} = \epsilon_{23} = 0$ folgt [15],

$$\sigma_{13} = \sigma_{23} = 0. \tag{32}$$

Die allgemeine Darstellung für $\epsilon_{\alpha\beta}$ lautet dann [15]:

$$\epsilon_{\alpha\beta} = \frac{1 + \nu}{E} (\sigma_{\beta} - \nu \sigma_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta}) \quad (33)$$

Die Umkehrung der Gleichungen erhält man entweder direkt aus den dreidimensionalen Gleichungen mit $\epsilon_{i3} = 0$ oder aus der Inversion der Gleichungen (29)-(32) [15]:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [(1 - \nu)\epsilon_{11} + \nu\epsilon_{22}], & \sigma_{12} &= \frac{E}{1 + \nu} \epsilon_{12}, \\ \sigma_{22} &= \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [\nu\epsilon_{11} + (1 - \nu)\epsilon_{22}], & \sigma_{23} &= 0, \\ \sigma_{33} &= \frac{\nu E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} (\epsilon_{11} + \epsilon_{22}), & \sigma_{13} &= 0. \end{aligned} \quad (34)$$

Somit zeigt sich, dass der ebene Verzerrungszustand zu einem nicht-ebenen Spannungszustand führt, da die Spannung σ_{33} im Allgemeinen ungleich Null ist. Das Problem bleibt aber insofern ein ebenes, als σ_{33} nicht von x_3 abhängt. Eine allgemeine Darstellung für $\sigma_{\alpha\beta}$ ist [15]:

$$\sigma_{\alpha\beta} = \frac{E}{1 + \nu} \left(\epsilon_{\alpha\beta} + \frac{\nu}{1 - 2\nu} \epsilon_{\gamma\gamma} \delta_{\alpha\beta} \right) \quad (35)$$

2.3.4.2 Ebener Spannungszustand

Der ebene Spannungszustand (ESZ) tritt in guter Näherung in Scheiben auf. Unter einer Scheibe versteht man ein ebenes Flächenbauteil, dessen Dicke t klein zu den übrigen relevanten Abmessungen ist und das nur durch Kräfte in seiner Ebene belastet wird (siehe Abb. 8) [16].

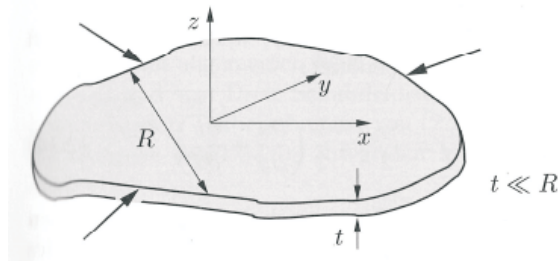


Abbildung 8: Scheibenproblem [16].

An den unbelasteten Deckflächen gilt $\sigma_{33} = \sigma_{23} = \sigma_{13} = 0$. Aufgrund der geringen Dicke sind dann diese Spannungskomponenten auch im Scheibeninneren in guter Näherung vernachlässigbar [16].

Es bleiben als nichtverschwindende Spannungskomponenten nur die ebenen Spannungen $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \sigma_{12}$. Ausserdem wird angenommen, dass alle Spannungen über die Scheibendicke t konstant sind und damit nur von den Koordinaten x und y abhängen [16].

Für den ebenen Spannungszustand kann man den reduzierten Spannungstensor $\sigma_{\alpha\beta}$ einführen [15].

$$\sigma_{ij} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & 0 \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \sigma_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} \end{bmatrix} \quad (36)$$

Die Voraussetzung $\sigma_{i3} = 0$ kann man direkt in die Gleichung (23) einsetzen und man erhält im Einzelnen [15]:

$$\begin{aligned} \epsilon_{11} &= \frac{1}{E}(\sigma_{11} - \nu\sigma_{22}), & \epsilon_{12} &= \frac{1+\nu}{E}\sigma_{12}, \\ \epsilon_{22} &= \frac{1}{E}(\sigma_{22} - \nu\sigma_{11}), & \epsilon_{23} &= 0, \\ \epsilon_{33} &= -\frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22}), & \epsilon_{13} &= 0. \end{aligned} \quad (37)$$

Der ebene Spannungszustand ruft also einen dreidimensionalen Verzerrungszustand hervor. Für die Umkehrung dieser Gleichungen gibt es wieder zwei Möglichkeiten. Entweder man invertiert (37) direkt oder man ermittelt die Dehnung ϵ_{33} aus der Forderung [15]

$$\begin{aligned} \sigma_{33} &= \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\nu(\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) + (1-\nu)\epsilon_{33}) = 0 \\ \Rightarrow \epsilon_{33} &= -\frac{\nu}{1-\nu}(\epsilon_{11} + \epsilon_{22}) \end{aligned} \quad (38)$$

und eliminiert anschließend ϵ_{33} in den Gleichungen (23) mit dem Ergebnis [15]:

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_{11} + \nu\epsilon_{22}), & \sigma_{12} &= \frac{E}{1+\nu}\epsilon_{12}, \\ \sigma_{22} &= \frac{E}{1-\nu^2}(\nu\epsilon_{11} + \epsilon_{22}), & \sigma_{33} &= \sigma_{23} = \sigma_{13} = 0. \end{aligned} \quad (39)$$

Die Grundgleichungen des ESZ lassen sich dann in kompakter Form, wie folgt darstellen [16]:

$$\begin{array}{ll}
\text{Elastizitätsgesetz} & \epsilon_{\alpha\beta} = -\frac{\nu}{E}\sigma_{\gamma\gamma}\delta_{\alpha\beta} + \frac{1+\nu}{E}\sigma_{\alpha\beta} \\
\text{Kinematik} & \epsilon_{\alpha\beta} = \frac{1}{2}(u_{\alpha\beta} + u_{\beta\alpha}) \\
\text{Statik} & \sigma_{\alpha\beta,\beta} + X_{\alpha} = 0 \\
\text{Kompatibilität} & \epsilon_{11,22} + \epsilon_{22,11} - 2\epsilon_{12,12} = 0
\end{array} \tag{40}$$

Zur vollständigen Beschreibung eines Randwertproblems kommen zu diesen Gleichungen noch die entsprechenden Randbedingungen hinzu.

Vergleicht man die Grundgleichungen des EVZ mit denen des ESZ, so stellt man bis auf die Konstanten im Elastizitätsgesetz eine völlige Übereinstimmung fest. Dementsprechend kann man aus der Lösung eines Problems des ESZ die Lösung für das entsprechende Problem im EVZ erhalten, indem man E durch E' und ν durch ν' ersetzt. E' und ν' sind wie folgt definiert [16]:

$$E' = \frac{E}{1 - \nu^2}, \quad \nu' = \frac{\nu}{1 - \nu} \tag{41}$$

Wichtig ist darauf hinzuweisen, dass der ebene Spannungszustand einen dreidimensionalen Verzerrungszustand hervorruft, während der ebene Verzerrungszustand einen dreidimensionalen Spannungszustand bewirkt [15].

2.4 Ursachen von Eigenspannungen

Bei fast allen technischen Werkstoffen, Fertigungsverfahren und Belastungsbedingungen treten die Eigenspannungen I., II. und III. Art überlagert auf. Erfasst man die maßgebenden Eigenspannungs-Entstehungsursachen, kann man zeigen, dass beinahe alle Eigenspannungen auf Wechselwirkungen zwischen den thermischen, mechanischen und metallurgischen Zuständen metallischer Werkstoffe beruhen. Durch die dargestellten Einzelvorgänge wird die gegenseitige Verkettung der Eigenspannungsursachen deutlich. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 9 dargestellt [1].

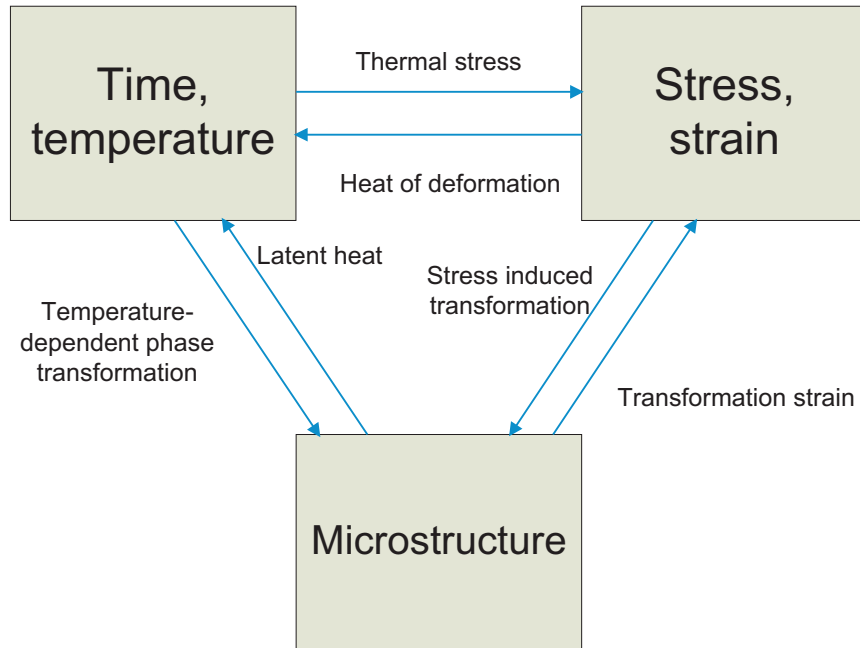


Abbildung 9: Eigenspannungs-Entstehungsursachen als Wechselwirkung zwischen dem thermischen, metallurgischen und mechanischen Zustand [1].

Das gesamte Verzerrungszinkrement $\Delta\epsilon_{ij}$ kann in seine Komponenten zerlegt werden:

$$\Delta\epsilon_{ij} = \Delta\epsilon_{ij}^{el} + \Delta\epsilon_{ij}^{pl} + \Delta\epsilon_{ij}^T + \Delta\epsilon_{ij}^q + \Delta\epsilon_{ij}^{TRIP} \quad (42)$$

mit $\Delta\epsilon_{ij}^{el}$, $\Delta\epsilon_{ij}^{pl}$, $\Delta\epsilon_{ij}^T$, $\Delta\epsilon_{ij}^q$ und $\Delta\epsilon_{ij}^{TRIP}$, als den elastischen, plastischen, thermischen, dilatatorischen und den Anteil der Umwandlungsplastizität (TRIP). Die einzelnen Beiträge sind nun im folgenden näher beschrieben.

2.4.1 Plastische Deformationen

Bei der Belastung von Bauteilen und Konstruktionen ist das örtliche Erreichen der Fließgrenze infolge von Spannungskonzentrationen unvermeidlich. Zum anderen kann eine gewollte Ausnutzung des Werkstoffes bis zur Fließgrenze in Teilbereichen des Bauteils der Berechnung zugrunde gelegt sein. In beiden Fällen gewährleistet die verformungsbehindernde Wirkung der die plastischen Zonen umschließenden elastischen Werkstoffbereiche die Tragfähigkeit des Bauteils oder der Konstruktion. Fließen tritt dann auf, wenn im einachsigen Spannungszustand die gültige Streckgrenze erreicht wird. Im mehrachsigen Fall muss örtlich das für den vorliegenden Werkstoff gültige Fließkriterium erfüllt sein. Durch das lokale Fließen werden bleibende ungleichmäßige Dehnungen eingepreßt, die nach Entlastung einen Eigenspannungszustand verursachen [14].

Plastisches Fließen setzt ein, wenn die zweite Invariante J_2 des Deviatoranteils $\sigma_{<ij>}$ des CAUCHY-schen Spannungstensors einen materialspezifischen, positiven Schwellenwert er-

reicht. Der Deviatoranteil, also der spurfreie³ Teil des CAUCHYschen Spannungstensors, ist definiert als [17]:

$$\sigma_{\langle ij \rangle} = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (43)$$

Ob der deviatorische Spannungszustand ein plastisches Fließen des Werkstoffs verursacht, hängt weiterhin von der Fließspannung des Werkstoffs ab. Dies führt dazu, dass im einachsigen Spannungszustand dann plastisches Fließen einsetzt, wenn σ_{11} gleich der Fließspannung k_f ist. Im mehrachsigen Spannungszustand muss anhand des Spannungstensors eine Vergleichsspannung σ_v gebildet werden, um einen Vergleich mit dem einachsigen Spannungszustand zu ermöglichen. Die bekannteste Vergleichsspannung, die nachweislich bei den meisten metallischen Werkstoffen angewandt werden kann, ist die Gestaltänderungsenergiehypothese nach von Mises [18]:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2] + 3(\sigma_{xy}^2 + \sigma_{yz}^2 + \sigma_{zx}^2)} \quad (44)$$

Die Formänderungen sind daher solange elastisch, wie $\sigma_v < k_f$ ist. Sobald $\sigma_v = k_f$ ist, fängt der Werkstoff lokal zu fließen an. Dabei wird das Formänderungsvermögen des Werkstoffs reduziert und es kann bei weiterer Verformung zum Werkstoffversagen kommen [18].

Abbildung 10 zeigt die Last- und Eigenspannungsverteilung am Beispiel eines zugbelasteten Kerbstabes. Im Kerbquerschnitt wurde die Spannungs- und Dehnungsverteilung bei teilplastischer Belastung sowie nach Entlastung dargestellt, während im Spannungs-Dehnungsschaubild (Bildteil rechts) die $\sigma - \epsilon$ -Werte im Kerbgrund an der höchstbeanspruchten Stelle bei einmaliger Zugbelastung eingetragen wurden. Nach Erreichen der Fließgrenze bleibt die Fließspannung im Kerbgrund konstant bis der Grenzwert ϵ_{max} erreicht ist. Infolge Stützwirkung steigt die Fließkurve des gesamten Kerbstabes (gestrichelte Kurve im $\sigma - \epsilon$ -Schaubild) oberhalb des Fließbeginns weiter an, bis die Maximallast bei Punkt B erreicht ist. Nach Entlastung verläuft die $\sigma - \epsilon$ -Linie parallel zur elastischen Gerade bis zu dem Betrag der bleibenden Stabdehnung ϵ_r , so daß im Randbereich des Kerbstabes Druckeigenspannungen herrschen, die mit Zugeigenspannungen im Kernbereich im Gleichgewicht stehen. Die Tiefenwirkung der teilplastischen Verformung deckt sich in erster Näherung mit dem Umkehrpunkt der Eigenspannungsverteilung. Ein Abbau der Spannungsspitze durch teilplastische Verformungen ergibt sich auch nahe der Risspitze angerissener Proben, so daß aus dem Lastspannungsverlauf die Ausdehnung der kleinplastischen Zone bei bruchmechanischen Untersuchungen bestimmt werden kann [1].

³Die Spur einer Matrix bezeichnet die Summe der Diagonalelemente

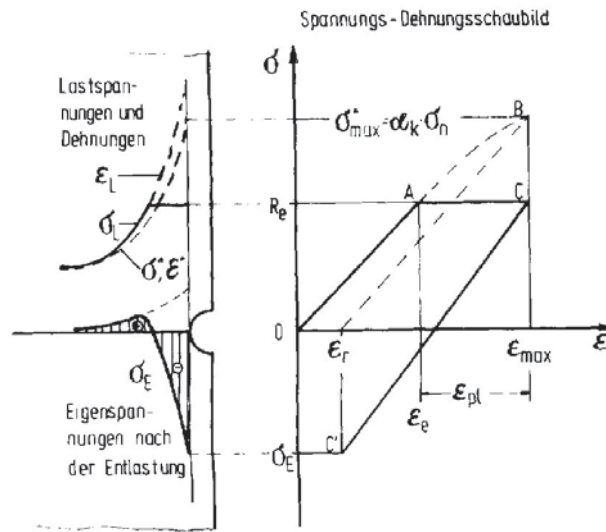


Abbildung 10: Eigenspannungen I. Art durch teilplastische Verformung an Kerbstäben [1].

2.4.2 Temperaturfelder

Materialien erfahren im allgemeinen unter einer Temperaturänderung von einer Ausgangstemperatur T_0 zu einer aktuellen Temperatur T Temperaturdehnungen oder Temperaturverzerrungen ϵ_{ij}^T , die sich bei Abwesenheit von mechanischen Spannungen unmittelbar einstellen. In erster Näherung erweisen sich die Temperaturverzerrungen als proportional zur Temperaturänderung $\Delta T = T - T_0$ [16].

Bei Einwirkung eines Temperaturfeldes mit thermischer Isotropie ergeben sich für die einzelnen Volumenelemente gestalttreue Form- bzw. Volumenänderungen. Es werden keine Gleit- bzw. Scherdeformationen erzeugt: $\epsilon_{12}^a = \epsilon_{23}^a = \epsilon_{13}^a = 0$. Demnach berechnet sich das eingeprägte Feld der Extradehnungen wie folgt [14]:

$$\epsilon_{ij}^T(x_i) = \alpha_{ij} \{T(x_i) - T_0\} \delta_{ij} = \alpha_{ij} \Delta T(x_i) \delta_{ij}, \quad (45)$$

mit δ_{ij} als Einheitstensor (Kronecker-Symbol), α_{ij} als Wärmeausdehnungskoeffizient, T_0 als Bezugstemperatur und ΔT als Temperaturdifferenz. Die durch die eingepprägten Dehnungen nach Gl. 45 erzeugten Eigenspannungen werden auch als Wärmespannungen bezeichnet.

Ein Beispiel für das bewusste Einbringen von Wärmespannungen ist das Flammrichten. Die Erwärmung erfolgt dabei mit kurzer Verweildauer der Flammrichttemperatur im oberflächennahen Bereich oder über die gesamte Werkstückdicke. Diese Flammrichttemperatur ist die höchste während des Flammrichtens auftretende Temperatur im Bauteil, ohne den Werkstoff zu schädigen (bei Stählen ca. 650 bis 700 °C). Die schnelle und örtlich begrenzte Erwärmung bewirkt eine Ausdehnung des Werkstücks, die jedoch durch die umliegenden kalten Bereiche behindert wird. Da bei erhöhter Temperatur die Streckgrenze sinkt, wird

eine plastische Stauchung der erwärmten Zone hervorgerufen. Beim Abkühlen schrumpft die gesamte erwärmte Zone, wobei die gestauchte Zone (mit größerer Wanddicke) kürzer wird als sie vor dem Richtvorgang war (Volumenkonstanz).

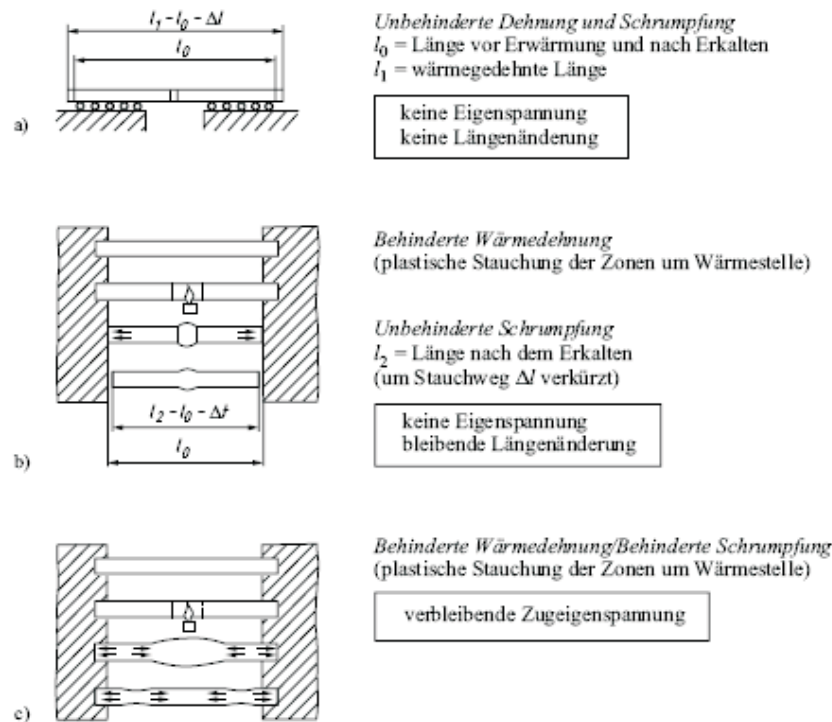


Abbildung 11: Auswirkungen der Wärme bei unbehinderter und behinderter Dehnung [19].

Grundprinzip des Flammrichtens ist also eine örtlich begrenzte Erwärmung mit Dehnungsbehinderung. Die Auswirkungen der Wärme bei unbehinderter und behinderter Dehnung/Schrumpfung sind in Abbildung 11 dargestellt. Bildteil a zeigt die Wärmewirkungen an einem in der Mitte erwärmten Stab ohne und mit Behinderung beim Ausdehnen und Schrumpfen. Bewegt sich der Stab frei, dann stellt sich nach dem Abkühlen wieder die Ursprungslänge ein. Es gibt keine Eigenspannungen und keine Längenänderung. Im Bild b ist der Stab zwischen zwei Spannbacken eingeklemmt. Hier ist durch die Erwärmung die Fließgrenze des Werkstoffs herabgesetzt und durch die Stauchkraft überschritten. Die Ausdehnung des Stabes ist jedoch behindert, sodass der Stab in der erwärmten Zone plastisch gestaucht wird. Beim nachfolgenden Abkühlen kann er ungehindert schrumpfen und ist um den gestauchten Anteil verkürzt (Δl). Im vorliegenden Fall verbleibt keine Eigenspannung im Bauteil. Bild c zeigt eine behinderte Wärmedehnung und Schrumpfung. Die Zone um die Wärmestelle wird plastisch gestaucht und es entstehen Zugeigenspannungen im Bauteil.

2.4.3 Dilatation

Wenn im Werkstoff chemische Reaktionen oder physikalische Vorgänge auftreten, die im Werkstoff eine Volumenänderung erzeugen, so wird die spezifische Volumenänderung bzw. Volumendilatation wie folgt definiert [14]:

$$e_q = \Delta(dV)/dV \quad (46)$$

Dies kann zur Entstehung von Eigenspannungen führen. Im Rahmen der linearen Elastizitätstheorie hängt die Volumendilatation mit den drei eingepprägten Normaldehnungen wie folgt zusammen [14]:

$$e_q = \epsilon_{11}^q + \epsilon_{22}^q + \epsilon_{33}^q, \quad (47)$$

Im Normalfall laufen die chemischen Reaktionen oder die physikalischen Vorgänge, wie beim Einwirken eines Temperaturfeldes, als gestalttreue Volumenänderung ab, wobei keine Raumrichtung bevorzugt wird. Demnach gilt $\epsilon_{11}^q = \epsilon_{22}^q = \epsilon_{33}^q$ und aus Gleichung 47 folgt [14]:

$$e_q = 3\epsilon_{11}^q = \dots \text{bzw.} \epsilon_{11}^q = \frac{1}{3}e_q, \text{ usw.} \quad (48)$$

Nach Gl. 48 berechnet sich das durch Volumendilatation erzeugte Extradehnungsfeld wie folgt [14]:

$$\epsilon_{ij}^q(x_i) = \frac{1}{3}e_q(x_i)\delta_{ij}. \quad (49)$$

Als Beispiel für physikalisch verursachte Volumendilatation kann das Umwandlungsverhalten von Stählen herangezogen werden. Bei Abkühlung mit einer kritischen Abkühlgeschwindigkeit entsteht durch einen Umklappvorgang ein martensitisches Gefüge. Darin ist der Kohlenstoff zwangsgelöst, wodurch eine eingepprägte vom Kohlenstoffgehalt etwa linear abhängige Volumenvergrößerung entsteht [14].

In Abbildung 12 ist eine Dilatationskurve für einen HSLA Stahl mit Aufheiz- und Abkühlkurve dargestellt.

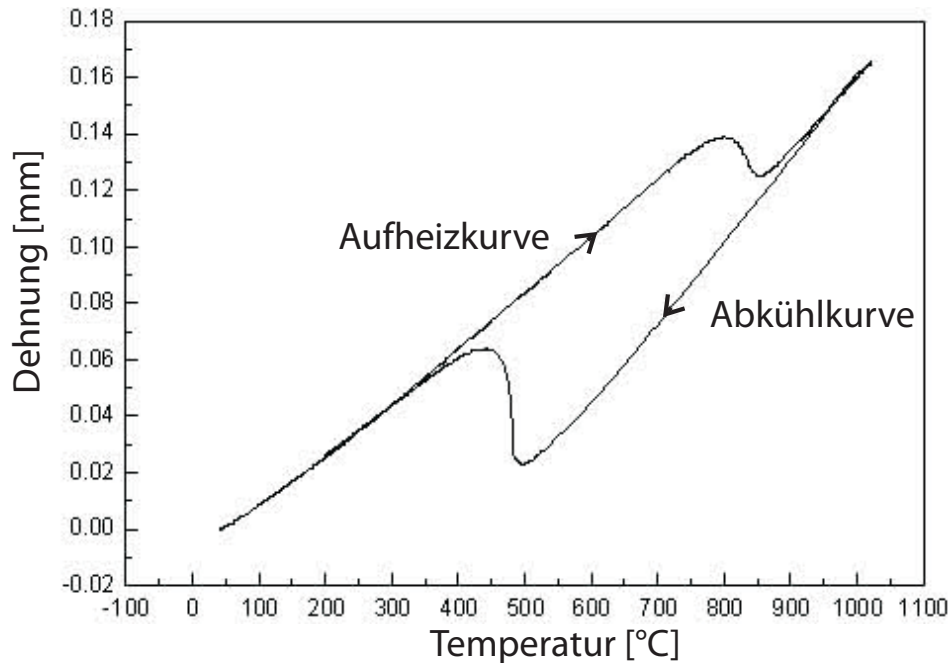


Abbildung 12: Dilatometerkurve eines HSLA Stahls. Aufgeheizt bis 1020°C und abgekühlt mit 30°C/s [20].

Die durch die Martensitbildung entstehende Volumenänderung beträgt für einen mittleren Kohlenstoffgehalt von 0,2% etwa $e_q = 0,01$, so ergeben sich nach Gleichung 49 die drei Extradehnungen in der Größenordnung [14]:

$$\epsilon_{11}^q = \epsilon_{22}^q = \epsilon_{33}^q = 0,003 \quad (50)$$

Zur Beurteilung dieses Wertes kann man die ungefähre Größe der Streckgrenzdehnung eines unlegierten Baustahls berechnen.

$$\epsilon_F = \frac{\sigma_F}{E} = \frac{210}{210000} = 0,001 \quad (51)$$

Der Vergleich von Gl. 50 und 51 zeigt, dass die durch die martensitische Umwandlung erzeugten Eigenspannungen ein Vielfaches der größten möglichen elastischen Dehnungswerte ϵ_F betragen können und daher zu lokalen plastischen Dehnungen und damit zu Eigenspannungen führen [14].

Einen Einfluss auf die Größe der Dilatation hat auch eine von aussen wirkende Zug- bzw. Druckbelastung auf die Probe. Die Verwendung eines Belastungsabschreckdilatometers gestattet es, der Probe während eines Abschreckversuches im Dilatometer, kurz vor Beginn der martensitischen Umwandlung, Zug- bzw. Druckspannungen aufzuprägen. Wie in Abbildung 13 zu sehen, treten durch die äußere Belastung, zusätzlich zu den Dehnungen auf Grund der Umwandlung, plastische Dehnungsanteile auf [21].

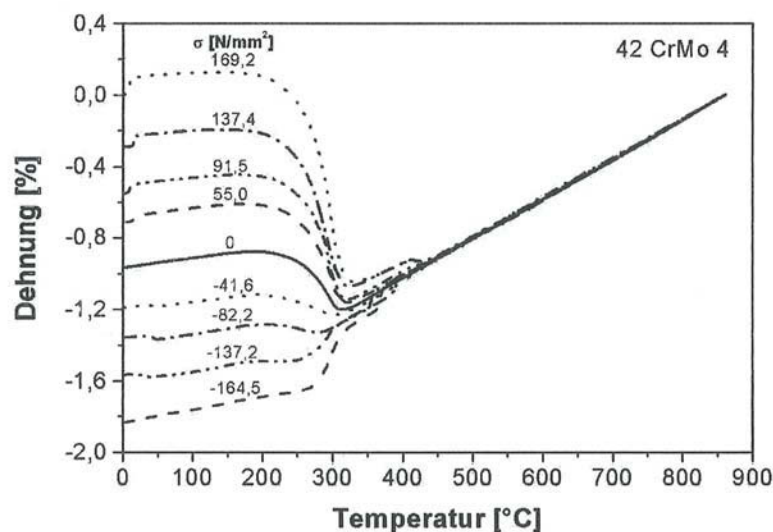


Abbildung 13: Einfluss von Zug- bzw. Druckspannungen auf die Dilatometerkurven von 42Cr-Mo4 [21].

Weiters beschreiben Narazaki [22], Totten [23] und Berns [24] drei wesentliche Einflussgrößen für die Volumsänderung während der Aufheiz- und Abkühlphase.

- Eigenspannungen, die eine Formänderung verursachen, wenn das Material die Streckgrenze überschreitet. Dies tritt ein, wenn beim Aufheizen die Festigkeit abnimmt.
- Spannungen, die durch unterschiedliche Ausdehnungen, aufgrund eines Temperaturgradienten hervorgerufen werden. Diese Spannungen steigen mit dem Gradienten und verursachen plastische Verformung, wenn die Streckgrenze erreicht wird.
- Volumsänderungen aufgrund einer Phasenumwandlung. Die Volumsänderung bleibt als Eigenspannung zurück, bis die Streckgrenze erreicht wird.

2.4.4 Umwandlungsplastizität (TRIP)

Die Umwandlungsplastizität beschreibt die bei Phasenumwandlungen auftretenden plastischen Verformungen, die auch dann zu beobachten sind, wenn die wirkende Spannung, die aufgrund von thermischen und/oder mechanischen Beanspruchungen wirkt, kleiner als die Fließspannung der weicheren Phase ist [25].

Die Ursachen der umwandlungsplastischen Dehnungen liegen in der Volumen- und Formänderung eines Kristalls während der Phasenumwandlung, bei der sich die weichere an der Umwandlung beteiligten Phase an die Umgebung der härteren Phase anpassen muss. Dadurch entstehen in der Umgebung der Umwandlungsfront komplizierte Eigenspannungszustände, die oftmals auch ohne die Wirkung äußerer Spannungen lokal zu plastischen Dehnungen führen können. Durch das Aufbringen einer äußeren Lastspannung wird der

Eigenstresszustand beeinflusst, so dass eine plastische Verformung in Belastungsrichtung entweder initiiert oder verstärkt wird [25].

Die nach einer Wärmebehandlung mit Phasenumwandlung verbleibenden Eigenstressungen I. Art werden nicht nur von Umwandlungsdehnung beeinflusst, sondern auch von der während der Umwandlung in Makrobereichen im allgemeinen auftretenden Erweichung des Materials (Umwandlungsplastizität). Der Einfluss dieser plastischen Anomalie auf die Eigenstressungen ist umso größer, je größer die umwandlungsbedingte Formänderung und je geringer die Fließspannung der Phasen bei der Umwandlungstemperatur sind. Niedrige Umwandlungstemperaturen und hohe Umwandlungsverzerrungen lassen einen starken Einfluss der Umwandlungsplastizität auf die bei Raumtemperatur nach einer Wärmebehandlung vorliegenden Eigenstressungen erwarten und umgekehrt [26].

Die durch die Umwandlungsplastizität erzeugte Verzerrung lässt sich wie folgt definieren:

$$\Delta\epsilon_{ij}^{TRIP} = \beta \frac{\Delta\delta^t}{3} \frac{S_{ij}}{\sigma_F} \left(1 - \frac{\delta^t}{\delta_{tot}^t} \right) \quad (52)$$

darin bedeuten δ_{tot}^t , die mit der Umwandlung verbundene, totale Volumsdehnung und δ^t den dementsprechenden, bis zum jeweiligen Zeitschritt entstandenen teilweisen Betrag. Die S_{ij} stellen die deviatorischen Spannungskomponenten dar, σ_F ist die charakteristische Fließspannung, $\Delta\delta^t$ das Inkrement der umwandlungsbedingten Volumsdehnung und β ein Proportionalitätsfaktor. Der Klammerausdruck auf der rechten Seite berücksichtigt, dass die Umwandlungsplastizität bei Transformationsbeginn besonders groß ist, während am Ende der Umwandlung die Verformung durch den bereits gebildeten Martensit behindert wird [26].

Bhadeshia [27] schreibt, dass die Umwandlung im Stahl eine wesentliche Rolle bei der Bildung von Eigenstressungen spielt. Bei einer diffusionsgesteuerten Umwandlung (z.B. Perlit) ist der Unterschied in der Dichte zwischen dem Ausgangs- und dem Endgefüge der wesentliche Beitrag zur Umwandlungsplastizität. Diese Plastizität kann, aufgrund der Schubbeanspruchung der Gestaltsänderung bei der Bildung dieser Gefüge, für eine displazive Umwandlung (z.B. Widmannstätten Ferrit, Martensit) wesentlich größer sein. Diese komplexen Vorgänge sind in den meisten Eigenstressanalysen nicht berücksichtigt [27].

Jones and Alberry [28] [29] zeigen in ihren Untersuchungen die Wichtigkeit der Umwandlung auf die Entwicklung der Eigenstressungen in Stählen. Dabei untersuchen sie bainitische, martensitische und austenitische Stähle. Es zeigt sich dabei, dass die Umwandlungsplastizität während der Abkühlung unter einachsiger Belastung, aus dem austenitischen Bereich, den Anstieg der thermischen Spannungen mit fallender Temperatur unterstützt. Im Gegensatz dazu zeigt der umwandlungsfreie Austenit einen gleichmäßigen Anstieg der Eigenstressungen mit sinkenden Temperaturen [30].

Wenn der Austenit zu Bainit oder Martensit umwandelte, glich sich die Umwandlungsdehnung mit der Verkürzung, die durch das Kühlen entsteht, aus [30].

Narazaki [22] schreibt, dass die Wärmebehandlung den größten Einfluss auf die Eigenstressungen besitzt. Dabei ist bei den Prozessen der Wärmebehandlung das Abschrecken

jener mit der größten Wirkung. Es wird geschätzt, dass etwa 20% der Probleme durch Eigenspannungen aus der Wärmebehandlung durch das Erwärmen selbst und rund 80% durch das Auskühlen entstehen, weil $\Delta\epsilon$ bei der Martensitbildung wesentlich größer ist.

2.5 Abbau von Eigenspannungen

Alle Verfahren zur Verringerung der Eigenspannungen beruhen auf der Tatsache, dass Fließ- und Kriechvorgänge die inneren Kräfte und Momente im Werkstück herabsetzen. In der Literatur werden verschiedene Verfahren zur Beseitigung von Eigenspannungen I.Art angegeben. Dabei können die Methoden in zwei Gruppen eingeteilt werden, einmal die statischen und andererseits die dynamischen Verfahren [31].

Bei den statischen Verfahren wird der Abbau der Eigenspannungen durch das Anlegen einer äußeren Belastung (z.B. Recken, Nachwalzen) oder durch die Veränderung der Werkstoffeigenschaften mit der Zeit (Auslagern) bzw. durch die Temperatur (Glühen) erreicht [31].

Die dynamischen Methoden basieren auf der Tatsache, daß der Werkstoff durch eine schwingende Beanspruchung zu plastischen Formänderungen angeregt wird.

Beim Glühen von Werkstücken wird der Eigenspannungsabbau durch die mit der Temperaturerhöhung einhergehende Absenkung der Streckgrenze ermöglicht (siehe Abb. 14) [31].

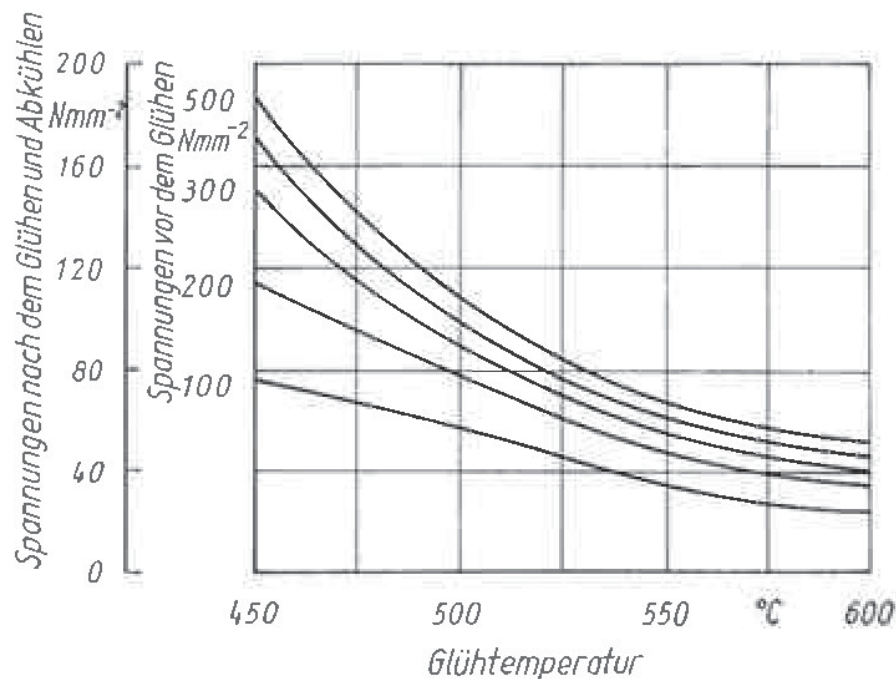


Abbildung 14: Absenken der Eigenspannungen I.Art durch Glühen. Glühdauer: 20h [31].

Als Auslagern werden Eigenschaftsänderungen eines Werkstoffs bezeichnet, die mit der Zeit auftreten. Die Auslagerung kann sowohl bei Gebrauchstemperatur als auch bei erhöhten bzw. verringerten Temperaturen erfolgen. Dieses Verfahren ist allerdings aufgrund des geringen Abbaus von der Eigenspannungen sowie der hohen Lagerzeiten und der dabei auftretenden Korrosion sehr kostenintensiv [31].

Eine weitere Methode zur Verminderung der Eigenspannungen stellt das Recken dar. Es ist hinsichtlich des Grades der abgebauten Eigenspannungen ebenso wirkungsvoll wie das Glühen.

Als Beispiel kann für das Recken ein zylindrischer Stab betrachtet werden, der im Kern Zugeigenspannungen $+\sigma_E^K$, und im Rand Druckeigenspannungen $-\sigma_E^K$ I. Art besitzt. Wird dieser Stab zugbeansprucht, dann nehmen die mittlere Gesamtspannung $\bar{\sigma}$, die Randspannung σ^R und die Kernspannung σ^K , wie in Abb. 15 gezeigt, mit der Gesamtdehnung ϵ_{ges} zu. Der unter Zugeigenspannungen stehende Probenkern erreicht die Streckgrenze bei kleineren Gesamtdehnungen der Probe, als der unter Druckeigenspannungen stehende Probenrand.

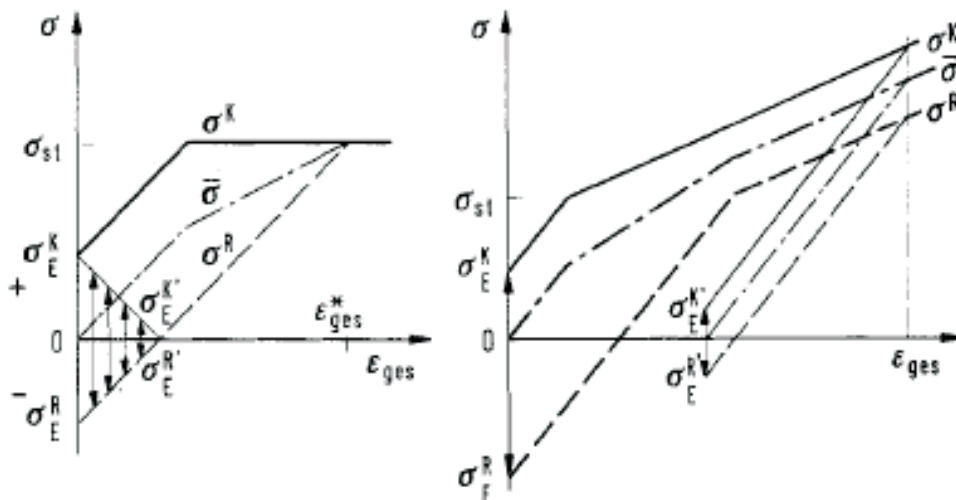


Abbildung 15: Eigenspannungsabbau durch Recken. Links: Spannungs/Dehnungsdiagramm ohne Verfestigung, rechts: mit Verfestigung [3].

Wenn $\epsilon_{ges} = \epsilon_{ges}^*$ erreicht bzw. überschreitet, dann ist der gesamte Probenquerschnitt plastifiziert. Wird nach der Gesamtdehnung $\epsilon_{ges} < \epsilon_{ges}^*$ entlastet, dann bleiben Eigenspannungen zurück. Wird jedoch erst nach $\epsilon_{ges} > \epsilon_{ges}^*$ entlastet, dann verschwinden die Eigenspannungen I. Art in Längsrichtung. Dies gilt immer unter der Voraussetzung von ideal-plastischem Werkstoffverhalten, was aber für technische Werkstoffe nicht zutrifft, da sie nach Erreichen der Streckgrenze verfestigen [3].

In diesem Falle gelten näherungsweise die Verhältnisse des rechten Teilbildes von Abb. 15, in dem ein konstanter Verfestigungsanstieg nach Überschreiten der Streckgrenze angenom-

men wird. ähnliche Überlegungen wie oben zeigen hier, daß, vor allem bei sehr steilem Verfestigungsanstieg, kein vollständiger Eigenspannungsabbau möglich ist. Selbstverständlich werden durch plastische Deformation Eigenspannungen II. Art wegen der Streckgrenzeanisotropie nicht beseitigt und Eigenspannungen III. Art erhöht [3].

Eine weitere Möglichkeit des Abbaus von Eigenspannungen ist durch die schwingende Beanspruchung von Werkstücken aufgrund geringer plastischer Formänderungen gegeben. Bei Beanspruchung der Werkstücke durch einen Pulsator kommt es zu einem Eigenspannungsabbau [31].

Weiters gibt es die Möglichkeit der Verminderung von Eigenspannungen I. Art durch Ultraschall. Die Versuche zeigten, daß ein Abbau von Eigenspannungen I. Art dann erreicht wird, wenn Bereiche des Gefüges zum Fließen gebracht werden. Es muss also in diesem Teil des Gefüges eine Versetzungsbewegung initiiert werden, die sich makroskopisch gesehen als Spannungsabbau auswirkt. Diese Vorgänge zeigen sich allerdings nur bei sehr hohen Schallenergien [31].

3 Methoden zur Messung von Eigenspannungen

Man unterscheidet generell zwischen den „zerstörungsfreien“ und den „zerstörenden“ Messmethoden. Zerstörungsfrei bedeutet dabei, dass die Messung unter der zu messenden Spannung erfolgt. Das Messprinzip der zerstörenden Methoden besteht dagegen darin, die Spannungsänderung infolge eines mechanischen Eingriffs zu messen und daraus die ursprünglichen Eigenspannungen zu berechnen. In diesem Zusammenhang ist allerdings anzumerken, dass aufgrund der engen Platzverhältnisse in den entsprechenden Prüfgeräten und der beschränkten Durchdringungskraft der Röntgen- bzw. Neutronenstrahlen auch die Anwendung zerstörungsfreier Methoden oft die faktische Zerstörung des Bauteils zur Folge hat. Effektiv zerstörungsfrei sind deshalb nur die halb-zerstörenden Verfahren, bei welchen dem Bauteil lediglich ein lokaler, reparierbarer Schaden (Bohrloch, Oberflächenschnitt, Härteeindruck) beigelegt wird.

Wenn zur Messung ein vorgängiges Zerschneiden des Bauteils notwendig ist, sind die dadurch bewirkten Spannungsänderungen unbedingt zu berücksichtigen.

In Abb. 16 ist ein Überblick über die wichtigsten Messmethoden dargestellt.

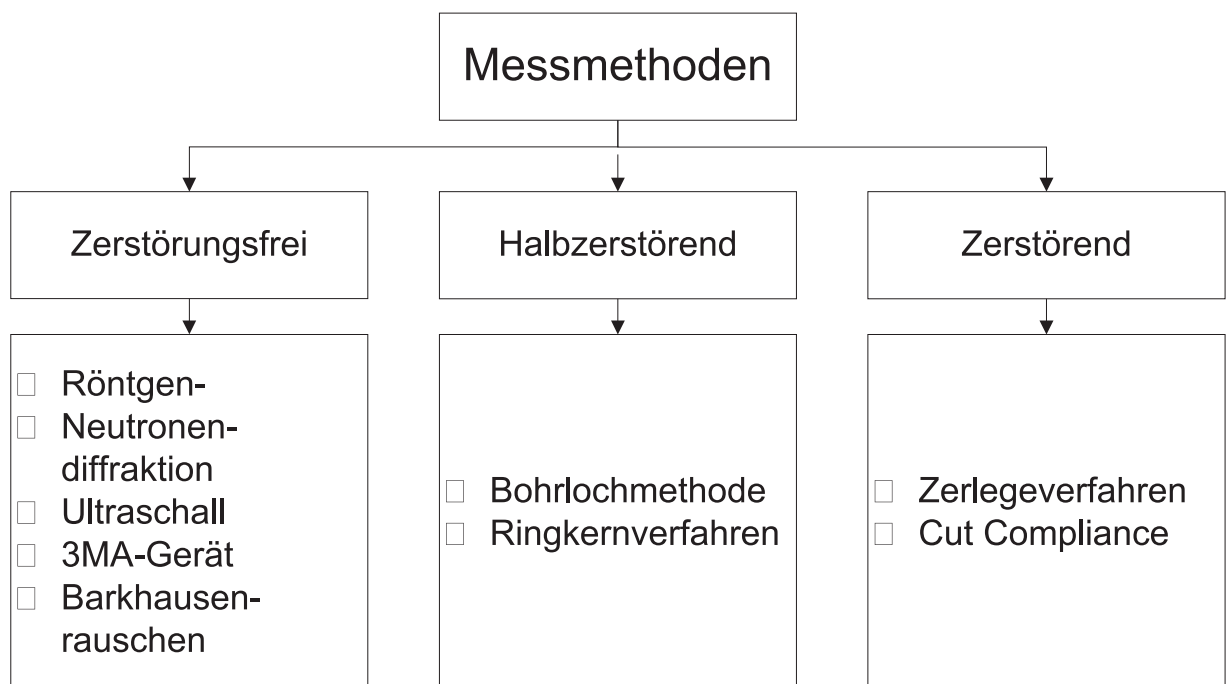


Abbildung 16: Einteilung der Methoden zur Messung von Eigenspannungen.

Alle aufgeführten Methoden haben ihre spezifischen Vor- und Nachteile und entsprechend ihre zweckmäßigen Einsatzgebiete. Ein wichtiges Kriterium ist dabei die zu messende Tiefe und der erlaubte Zerstörungsgrad. Mit den international normierten Methoden (Bohrlochmethode und Röntgendiffraktion) lassen sich Eigenspannungen nur an der Oberfläche

messen. Die Ermittlung eines Tiefenprofils ist mit diesen Methoden äußerst aufwendig und relativ ungenau.

Bezüglich Genauigkeit und Aussagekraft hinsichtlich des mechanischen Bauteilverhaltens sind die mechanischen (zerstörenden bzw. halbzerstörenden) Methoden den anderen oft überlegen. Dies gilt insbesondere für die neueste der mechanischen Methoden, die Cut-Compliance Methode (auch Crack Compliance Methode genannt).

Die folgenden Methoden werden in dieser Arbeit näher beschrieben:

- Zerlegeverfahren
- Crack Compliance
- Bohrlochmethode
- Ringkernverfahren
- Zerstörungsfreie Verfahren

3.1 Zerlegeverfahren

Das Zerlegeverfahren ist die direkteste und universellste Art der Eigenspannungsmessung. Das Prinzip besteht einfach darin, eine zu untersuchende Stelle, die vorher mit DMS versehen wurde, durch Schnitte soweit vom übrigen Körper zu isolieren, dass die wesentlichen Anteile der Eigenspannungen gelöst werden. Aus den Signalen der DMS lassen sich direkt die entlang dieser Schnitte vorhanden gewesenen Eigenspannungen mit Hilfe des Hooke'schen Gesetzes bestimmen. Um alle drei Komponenten des ebenen Spannungszustandes zu erhalten, muss die Messung durch eine sogenannte DMS-Rosette, die Messungen in drei Richtungen erlaubt, erfolgen. Die Methode ist mit einem großen Mess- und Schneidaufwand verbunden. Die Genauigkeit der Methode hängt von der Größe der ausgeschnittenen Stücke, der Art der Schnitte und der Größe der Spannungsgradienten ab [32].

Zerlegeverfahren sind grundsätzlich Spannungs-Relaxations-Methoden. Die Information über die Spannungen wird dabei durch das Zerlegen des Bauteils in Elemente bestimmter Größe und dem darauf folgenden Messen der resultierenden Dehnung gewonnen. Wenn bei der Messung der Dehnungen Fehler gemacht werden, dann vergrößern sich diese Fehler beim Zurückrechnen auf die Eigenspannungen unter Verwendung des Elastizitätsgesetzes [33].

Die Berechnung der Eigenspannungen kann eine große Herausforderung darstellen, weil sich die Geometrie der Probe ändert, nachdem Teile abgetrennt oder herausgeschnitten wurden.

Wurde das Zerlegeverfahren zur Messung der Eigenspannungen gewählt, dann werden folgende Schritte durchgeführt [34]:

1. **Beschreibung des Spannungsfeldes:** Zuerst muss das Problem, für das der Eigenspannungszustand ermittelt wird, analysiert werden. Dies ergibt sich oft in der Anwendung des Bauteils. Die Form des Bauteils muss ebenfalls in Betracht gezogen werden. Diese Überlegungen müssen für die Prozesskette bzw. für den Prozess, bei dem die Eigenspannungen eingebracht werden, analysiert werden. Die Begründung für Vereinfachungen bzgl. des Spannungsfeldes können aus diesen Überlegungen abgeleitet werden, z.B. die Axialsymmetrie für zylindrische Körper. Diese Annahmen und Überlegungen führen zu Methoden, die es mit Hilfe von Gleichungen ermöglichen, das Spannungsfeld aufgrund der gemessenen Dehnungen zu rekonstruieren.
2. **Auswahl der Dehnungsmessmethode:** Mit dem Zugang zur Berechnung des Spannungsfeldes, kann in weiterer Folge die Messmethode ausgewählt werden. Die Messmethode beeinflusst sehr stark die Auflösung der Dehnungsmessung, da jede Methode eine unterschiedliche Genauigkeit besitzt. Bei den Zerlegeverfahren gibt es eine Vielzahl unterschiedlicher Messmethoden. Dazu zählen mechanische Messuhren, die mit einer speziellen Einspannvorrichtung gekoppelt sind, als auch spannungsoptische Beschichtungen und natürlich die Widerstands-Dehnmessstreifen (DMS). Diese haben sich schlussendlich auch durchgesetzt und werden aufgrund der Genauigkeit und der Vielzahl an unterschiedlichen DMS am häufigsten verwendet. Aber auch die Messung mit Röntgenstrahlen wird beim Zerlegeverfahren eingesetzt.
3. **Vorbereitung zur Dehnungsmessung:** Nachdem die Methode zur Dehnungsmessung ausgewählt ist, muss man die Position der Messung festlegen und die Stelle für die Messung vorbereiten, z.B. die DMS aufkleben. Anschließend wird der Vorspannungs-Zustand gemessen, bevor das Bauteil zerlegt wird.
4. **Trennung des Elements:** Wenn die Messung vorbereitet ist, kann das ausgewählte Element vom restlichen Bauteil getrennt werden. Dabei muss man das Verfahren, mit dem man das Bauteil trennt, sorgfältig auswählen, da das Trennverfahren selbst Eigenspannungen einbringen kann, die im Bereich der Streckgrenze des Materials liegen.
5. **Messung der Dehnung nach dem Trennen:** Nachdem das ausgewählte Element vom restlichen Bauteil getrennt wurde und die Spannungen relaxiert sind, wird die Dehnungsmessung wiederholt und die Messergebnisse werden von den Messwerten der Ausgangsmessung vor dem Trennen abgezogen, um die Änderung der Dehnung zu erhalten. Mit den Ergebnissen ist es dann möglich den ursprünglichen Spannungszustand zu berechnen.

Durch Vereinfachungen kann die Berechnung des Eigenspannungsfeldes mit Hilfe der zerstörenden Messmethoden erleichtert werden. So kann man ein-, zwei- oder dreiaxiale Spannungsfelder annehmen [34].

Den einachsigen Spannungszustand kann man bei Messungen von Drähten, Zylindern und Rohren anwenden, da sie axialsymmetrisch sind. Diese Methode wurde von Heyn [35] näher beschrieben. In seiner Arbeit setzt er die Spannungen als axialsymmetrisch voraus,

sodass nur die Längsspannungen von Interesse sind. Daher wurde nur die Längenänderung des axialsymmetrischen Bauteils, nach Entfernen einer Scheibe, gemessen [34].

Bei einem zweiachsigen Spannungszustand gibt es für axialsymmetrische Bauteile die Mesnager-Sachs-Methode [36] zur Berechnung des Eigenspannungsfeldes. Diese Methode ist anwendbar, um das Spannungsfeld zylindrischer Bauteile mit einer axialsymmetrischen Verteilung der Eigenspannungen zu berechnen. Dabei wird die Dehnung in Längsrichtung und im Durchmesser gemessen. Die Dehnung entsteht durch das Bohren eines Loches in Längsrichtung. Die Aussenseite muss dabei mit entsprechenden DMS versehen werden. Über mathematische Beziehungen ist es wieder möglich den Eigenspannungszustand zu berechnen. Eine weitere Möglichkeit um ein Eigenspannungsfeld zu berechnen, das auch auf komplexere Bauteile angewendet werden kann, wurde von Rosenthal und Norton [37] vorgeschlagen. Dieses Verfahren ist auch auf Bleche und geschweißte Bleche anwendbar [34].

In der Realität werden meist dreiachsige Spannungszustände aufgrund des Herstellungsprozesses in die Bauteile implementiert. Daher wurden einige zerstörende Messmethoden und Annahmen für das Spannungsfeld entwickelt, um dreidimensionale Spannungszustände zu messen [34]. Ein Ansatz war dabei die Weiterentwicklung der Lösungen von Rosenthal und Norton [37]. Zur genauen Beschreibung dieser Methoden sei hier auf die Literatur verwiesen [34] [37].

3.2 Crack-Compliance-Methode

Bei der von Cheng und Finnie [38] [39] entwickelten Crack-Compliance-Methode (CC-Methode) erfolgt die Entspannung durch einen Schnitt entlang der Linie, auf der die Eigenspannungen zu bestimmen sind (siehe Abb. 17). Der Schnitt wird kontinuierlich oder in kleinen Schritten verlängert. Die daraus resultierende Umlagerung der Eigenspannungen wird an einer beliebigen Messstelle an der Oberfläche des Körpers mit einem Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen. Aus dem mathematischen Zusammenhang zwischen der durch den Schnitt freigesetzten Spannung und der Dehnungsänderung im Messpunkt M1, der für die jeweilige Bauteilgeometrie und Messanordnung bekannt sein muss, lässt sich aus dem Verlauf der Messwerte als Funktion der Schnitttiefe die ursprüngliche Spannungsverteilung entlang der Schnittlinie berechnen [32].

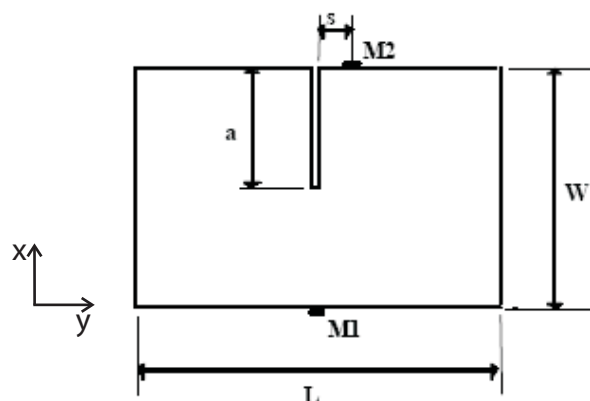


Abbildung 17: Prinzip der Crack Compliance Methode: Schnitt entlang der x-Achse, Dehnungsmessung im Punkt M (a...Schnittlänge, s...Abstand Messpunkt-Schnittlinie) [32].

Die Wahl eines Schnittes zur Entspannung der Eigenspannungen sowie die relativ weit davon entfernte Messstelle haben verschiedene Vorteile: Erstens stellt der schmale, vorzugsweise durch Draht-Elektroerosion erzeugte Schnitt, was die Verletzung des Materials und die Gefahr der Einbringung zusätzlicher Eigenspannungen betrifft, den kleinsten mechanischen Eingriff mit der größten Entspannungswirkung dar. Zweitens ermöglicht sie, da der Schnitt hinsichtlich des globalen elastischen Spannungsfelds einem Riss ähnlich ist, zur Berechnung der ursprünglichen Spannungen aus der Dehnungsänderung im Messpunkt den Rückgriff auf die theoretischen Grundlagen der linear-elastischen Bruchmechanik und damit eine bedeutende Vereinfachung der Berechnungsmodelle. Drittens erhält man damit direkt die Spannungsintensitätsfaktoren an einem realen oder hypothetischen Riss, der im betrachteten Eigenspannungsfeld liegt [32].

3.3 Bohrlochmethode

Das Bohrlochverfahren ist eine der meist verwendeten Methoden zur Messung von Eigenspannungen. Die erste Beschreibung dieses Verfahrens stammt aus dem Jahr 1932. J. Mathar [40] beschreibt darin, wie in ein Prüfstück ein kleines Loch gebohrt und die dadurch entstehenden Formänderungen in der Umgebung des Loches gemessen werden. Heutzutage ist der genaue Versuchsablauf in der Norm ASTM E 837 [41] geregelt.

Das Bohrlochverfahren und auch das Ringkernverfahren (siehe Kap. 3.4) gehören zu den sogenannten halbzerstörenden Verfahren. Die Methode ist sehr gebräuchlich, da sie einfach zu handhaben ist, schnelle Ergebnisse liefert, nur einen sehr geringen Schaden am Werkstück erzeugt und kostengünstig ist. Das Verfahren hat die folgenden Anwendungsbereiche [42]:

- **Art der gemessenen Spannungen:** Mit der Methode ist es möglich Makro-eigen-spannungen zu messen. Die meisten der Auswertungs-Algorithmen bieten Lösungen,

um einen elastischen ebene Spannungszustand zu bestimmen. Um jedoch lokales plastisches Fließen aufgrund der Spannungskonzentration am Bohrloch zu vermeiden, sollten die gemessenen Eigenspannungen nicht oberhalb von 60-70% der lokalen Fließspannung liegen.

- **Material Eigenschaften:** Die Bohrlochmethode ist grundsätzlich für alle Materialien anwendbar. Wichtig ist, dass das Material isotrop ist und die elastischen Kennwerte bekannt sind und weiters muss es möglich sein, das Material zu bearbeiten d.h. das Fräsen des Loches darf die gemessenen Dehnungen nicht beeinträchtigen.
- **Auflösung:** Die lokale Auflösung ist abhängig von der verwendeten Apparatur. Der minimale Vorschub liegt im Bereich einiger μm , wobei die maximale messbare Tiefe des Loches bei 1-2xLochdurchmesser liegt.

3.3.1 Grundlagen

Bei der Bohrlochmethode wird eine spezielle DMS-Rosette verwendet. Sie misst die Dehnungsänderung, die durch das Entfernen des unter Spannung stehenden Materials entsteht. Die Beziehung zwischen der ursprünglichen Eigenspannung und der entstandenen radialen Dehnung um das Bohrloch lässt sich wie folgt ausdrücken [43]:

$$\epsilon = (\sigma_{max} + \sigma_{min})\bar{A} + (\sigma_{max} - \sigma_{min})\bar{B}\cos 2\beta \quad (53)$$

Dabei sind \bar{A} und \bar{B} zwei Konstanten, die von der Bauart der DMS-Rosette, den Materialeigenschaften, dem Lochdurchmesser und der Lochtiefe abhängen.

Bei der Berechnung der Spannungen muss man unterscheiden zwischen einer dünnen und einer dicken Probe. Bei einer dünnen Probe ist es nur möglich, ein sogenanntes Durchgangsloch zu fräsen, während es bei einer dicken Probe auch möglich ist, einen Tiefenverlauf zu messen. Dabei wird laut Norm eine Probe als dünn bezeichnet, deren Dicke unter dem 1,2-fachen des Durchmessers der DMS-Rosette liegt.

Im folgenden wird nun die Berechnung der Spannungen bei einem Durchgangsloch beschrieben.

3.3.2 Messung am Durchgangsloch

Wenn in einem blechförmigen Bauteil ein Membranspannungszustand vorliegt und ein Durchgangsloch gebohrt wird, kann die Versuchsauswertung analytisch erfolgen. Für die Herleitung geht man dabei zunächst von einem einachsigen Spannungszustand σ_x aus und greift auf zwei mechanische Modelle zurück:

1. Vor dem Einbringen des Durchgangslochs liegt ein einachsiger Spannungszustand vor.

2. Das Modell nach Kirsch [44] beschreibt die auftretenden Spannungen in einer (unendlich großen) Scheibe mit Kreisloch unter einachsiger Belastung (im Unendlichen)(siehe Abb. 18). Dieser Zustand liegt nach dem Einbringen des Durchgangslochs vor.

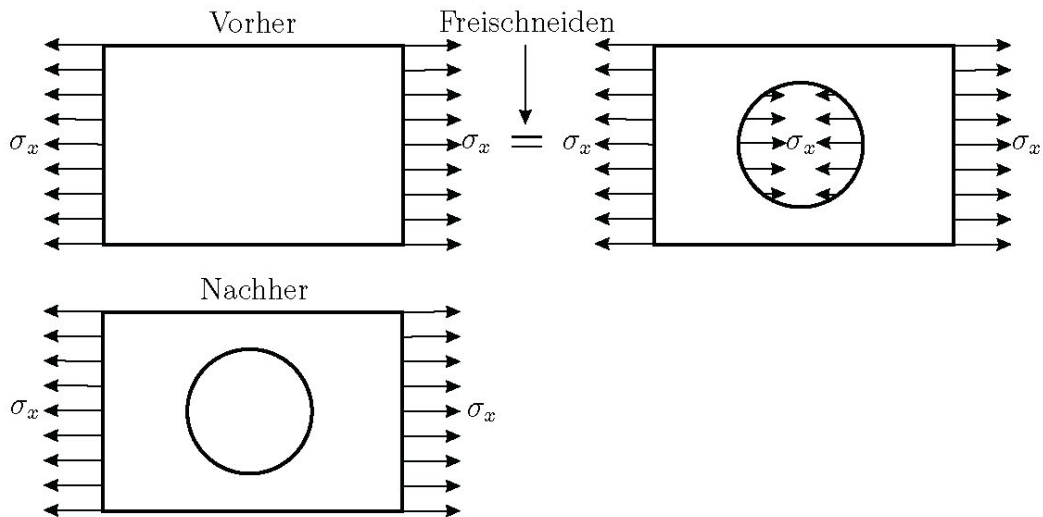


Abbildung 18: Zustände vor und nach dem Einbringen des Durchgangslochs [45].

Um die relaxierten Dehnungen zu berechnen, wird der einachsige Spannungszustand gemäß Abb. 19 von der Kirsch'schen [44] Lösung subtrahiert (Superpositionsprinzip). Superposition darf hier angewendet werden, weil von linear-elastischem Materialverhalten ausgegangen wird.

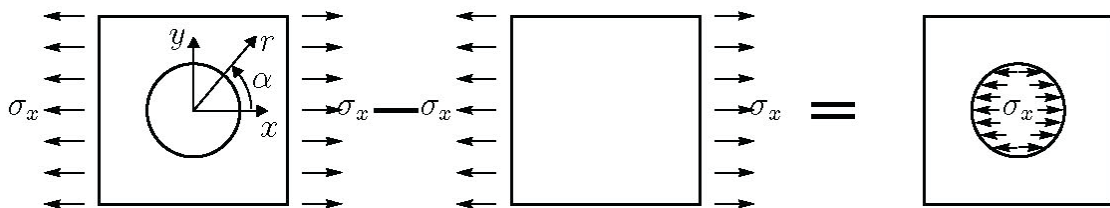


Abbildung 19: Superposition zweier Belastungsfälle um die relaxierte Dehnung zu berechnen [45].

Die Abbildung links veranschaulicht die analytische Lösung für eine unendlich große Scheibe mit Loch nach Kirsch [44]. Die Abbildung in der Mitte entspricht dem vorliegenden Zustand vor dem Bohren des Lochs. Die rechte Abbildung entspricht den beim Bohren auftretenden Relaxationen der Spannungs- und Dehnungsfelder und damit den Messgrößen.

Interpretation: Die relaxierte Dehnung ist gleich der Dehnung, die auftritt, wenn eine (nicht vorgespannte) Scheibe mit Loch am Lochinnenrand mit einer Randlast $-\sigma_x$ beaufschlagt wird (Abb. 19, rechts). Diese Randlast hat also gleichen Betrag und gleiche Richtung aber entgegengesetzte Orientierung wie im (freigeschnittenen) einachsigen Spannungszustand. Der vor dem Bohren vorliegende, einachsige Spannungszustand lässt sich in gedrehten Koordinaten (gemäß Abb. 20, oben) wie folgt anschreiben (Mohr'scher Spannungskreis):

$$\begin{aligned}\sigma_r' &= \frac{\sigma_x}{2}(1 + \cos(2\alpha)) \\ \sigma_\theta' &= \frac{\sigma_x}{2}(1 - \cos(2\alpha)) \\ \sigma_{r\theta}' &= -\frac{\sigma_x}{2}(\sin(2\alpha))\end{aligned}\tag{54}$$

Die Ausdrücke für die Spannungsverteilung nach Kirsch lauten:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{\sigma_x}{2}\left(1 - \frac{1}{r^2} + \frac{\sigma_x}{2}\left(1 + \frac{3}{r^4} - \frac{4}{r^2}\right)\right)\cos(2\alpha) \\ \sigma_\theta &= \frac{\sigma_x}{2}\left(1 + \frac{1}{r^2} - \frac{\sigma_x}{2}\left(1 + \frac{3}{r^4}\right)\right)\cos(2\alpha) \\ \sigma_{r\theta} &= -\frac{\sigma_x}{2}\left(1 - \frac{3}{r^4} + \frac{2}{r^2}\right)\sin(2\alpha)\end{aligned}\tag{55}$$

Überlagert man nun die beiden Zustände 54 und 55 und berücksichtigt das linear elastische Stoffgesetz, so erhält man für die relaxierten Dehnungen

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= \frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E}\left(\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4}\cos(2\alpha) + \frac{4\nu}{r^2(1+\nu)}\cos(2\alpha)\right) \\ \epsilon_\theta &= \frac{\sigma_x(1+\nu)}{2E}\left(-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4}\cos(2\alpha) - \frac{4\nu}{r^2(1+\nu)}\cos(2\alpha)\right)\end{aligned}\tag{56}$$

Die elastischen Konstanten sowie die Abhängigkeit vom Radius r werden üblicherweise wie folgt zusammengefasst:

$$\begin{aligned}A &= -\frac{1+\nu}{2E}\left(\frac{1}{r^2}\right) \\ B &= -\frac{1+\nu}{2E}\left(\left(\frac{4}{1+\nu}\right)\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4}\right) \\ C &= \frac{1+\nu}{2E}\left(-\left(\frac{4}{1+\nu}\right)\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4}\right)\end{aligned}\tag{57}$$

und es ergibt sich:

$$\begin{aligned}\epsilon_r &= \sigma_x(A + B\cos(2\alpha)) \\ \epsilon_\theta &= \sigma_x(-A + C\cos(2\alpha))\end{aligned}\quad (58)$$

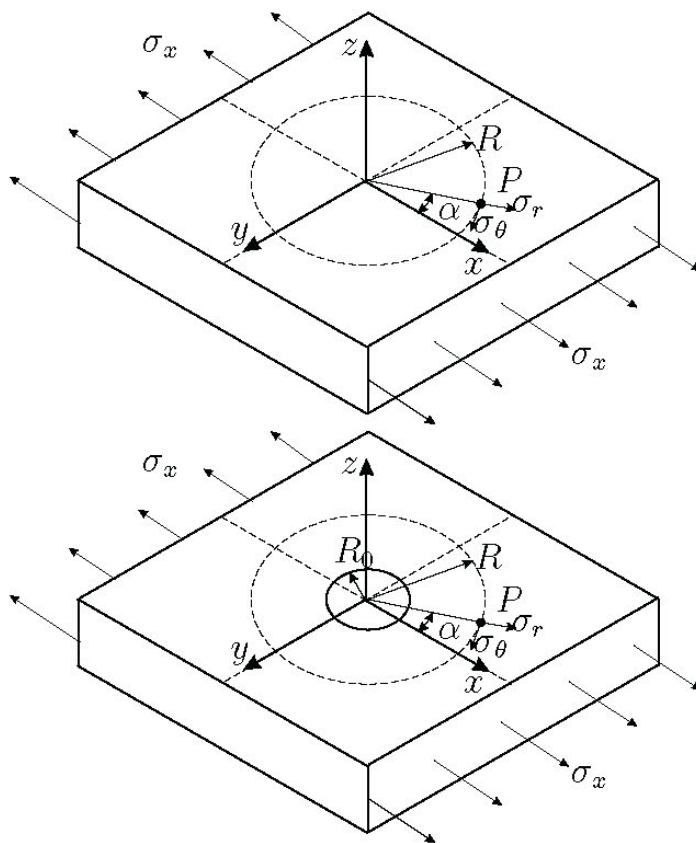


Abbildung 20: Spannungszustände vor und nach dem Bohren eines Lochs [45].

Da die relaxierten radialen Dehnungen wesentlich größer sind als die tangentialen, sind die Messgitter der üblicherweise verwendeten Dehnmessstreifenrosetten radial zum Bohrloch ausgerichtet, und im Weiteren ist nur noch die Gleichung für ϵ_r von Interesse.

Für den einachsigen Spannungszustand ist Gleichung 58 bereits die analytische Lösung. Mit Hilfe der üblicherweise drei gemessenen Dehnungen kann dann auf die Richtung und den Betrag der Spannung geschlossen werden.

Wesentlich häufiger als der einachsige Spannungszustand tritt in der Realität der ebene Spannungszustand auf. Die entsprechende Erweiterung der Lösung ist wiederum mit An-

wendung des Superpositionsprinzips möglich. Gemäß Abb. 21 werden zwei zueinander orthogonale, einachsige Spannungszustände zu einem ebenen Spannungszustand überlagert. Für die gesamte relaxierte Dehnung gilt:

$$\epsilon_{r,gesamt} = \epsilon_r^x + \epsilon_r^y \quad (59)$$

wobei

$$\epsilon_r^x = \sigma_x(A + B\cos(2\alpha)) \quad (60)$$

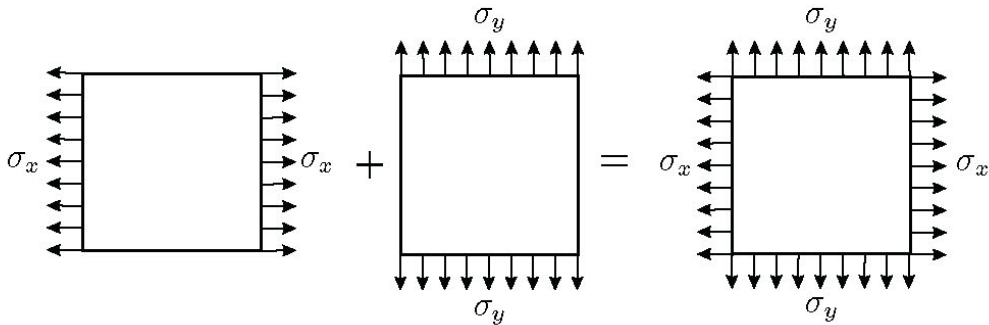


Abbildung 21: Superposition zweier zueinander orthogonaler einachsiger Spannungszustände [45].

Durch Ersetzen von x durch y und α durch $\alpha+90^\circ$ in Gleichung 60 erhält man

$$\epsilon_r^y = \sigma_y(A - B\cos(2\alpha)) \quad (61)$$

Damit ergibt sich die radiale relaxierte Dehnung für einen allgemeinen ebenen Spannungszustand zu:

$$\epsilon_{r,gesamt} = \sigma_x(A + B\cos(2\alpha)) + \sigma_y(A - B\cos(2\alpha)) \quad (62)$$

3.3.3 Anwendung auf die DMS-Rosette

Bei der üblichen Vorgehensweise zur Messung der Eigenspannungen mittels DMS wird eine DMS-Rosette auf die Messstelle installiert. Eine solche Rosette ist in Abb. 22 dargestellt. Die drei DMS sind dabei radial angeordnet. Die Gittermitten liegen auf dem Radius R aus dem Lochzentrum. Die Winkelabstände der drei DMS-Gitter können beliebig, müssen aber bekannt sein. Ein Winkelabstand von 45° führt zu den einfachsten analytischen Gleichungen. Daher ist diese Anordnung zur Standardform für DMS-Bohrlochrosetten geworden.

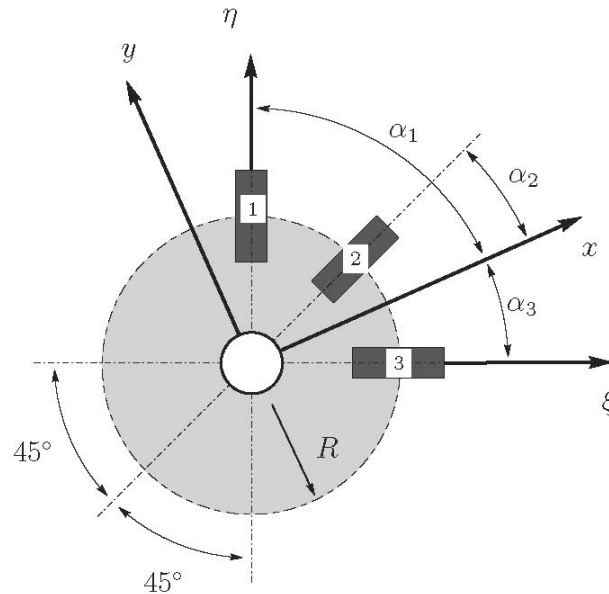


Abbildung 22: Koordinatensysteme der DMS-Rosette [45].

$R = \text{const.}$	Abstand vom DMS-Messgitter zum Lochmittelpunkt
$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$	Winkel zwischen Hauptspannungsrichtung und den DMS Messpunkten
x, y	Hauptachsensystem
η, ξ	Koordinatensystem der DMS-Rosette

Wie in Abb. 22 dargestellt, ist α_1 der spitze Winkel zwischen der nächstliegenden Hauptspannungsachse und DMS-Gitter 1. Während $\alpha_2 = 45^\circ - \alpha_3$ und $\alpha_3 = 90^\circ - \alpha_1$ ist (mit positiven Winkeln in Richtung der DMS-Gitternummerierung).

In Abbildung 23 ist eine schematische Bohrlochrosette mit ihren Abmessungen dargestellt.

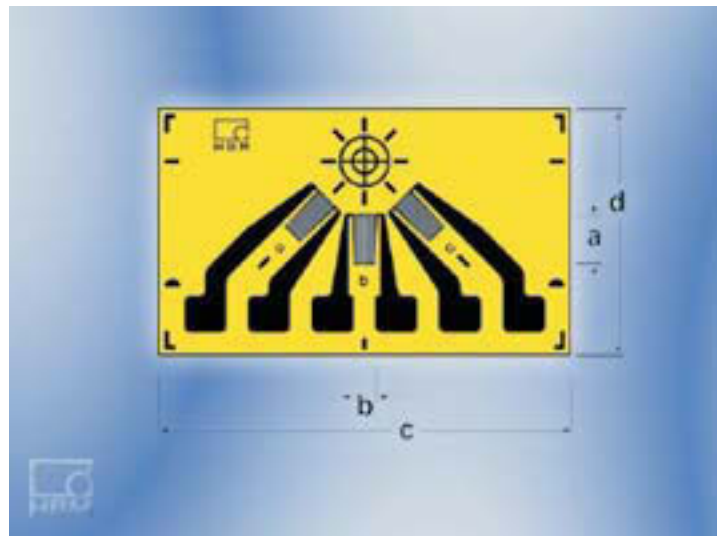


Abbildung 23: Bohrloch-Rosette zur Eigenspannungsanalyse nach dem Bohrlochverfahren.

Messgitter Länge a [mm]	1,5
Messgitter Breite b [mm]	0,7
Messgitterträger c [mm]	8
Messgitterträger d [mm]	13,5
Temperaturanpassung ferr. Stahl Widerstand [Ohm]	120
Max. Brückenspeisespannung [V]	2

Die Dehnung kann jetzt dreimal geschrieben werden, einmal für jedes Rosettengitter:

$$\begin{aligned}
 \epsilon_1 &= A (\sigma_x + \sigma_y) - B (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\phi \\
 \epsilon_2 &= A (\sigma_x + \sigma_y) + B (\sigma_x - \sigma_y) \sin 2\phi \\
 \epsilon_3 &= A (\sigma_x + \sigma_y) + B (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\phi
 \end{aligned} \tag{63}$$

Mit diesen Gleichungen lassen sich aus den gemessenen Dehnungen ϵ_1 , ϵ_2 und ϵ_3 die Hauptspannungen σ_x , σ_y , sowie die Lage der Hauptachsen bestimmen.

Werden die Gleichungen (63) zur Bestimmung der Hauptspannungen und ihrer Richtung gelöst, können die Resultate in folgender Form ausgedrückt werden:

$$\begin{aligned}
\sigma_{max} &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} - \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2^2)} \\
\sigma_{min} &= \frac{\epsilon_1 + \epsilon_3}{4A} + \frac{1}{4B} \sqrt{(\epsilon_3 - \epsilon_1)^2 + (\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2^2)} \\
\tan 2\alpha &= \frac{\epsilon_1 - 2\epsilon_2 + \epsilon_3}{\epsilon_1 - \epsilon_3}
\end{aligned} \tag{64}$$

wobei α den Winkel zwischen der nächsten Hauptspannungsachse und dem Gitter 1 bezeichnet (ist er positiv, dann in Richtung der Gitternummerierung; ist er negativ, dann in entgegengesetzter Richtung).

Im folgenden werden die Gleichungen zur direkten Bestimmung der Spannungskomponenten im η, ξ Koordinatensystem hergeleitet. Die allgemeinen Transformationsgleichungen für die Komponenten des Spannungstensors lauten:

$$\begin{aligned}
\sigma_\xi &= \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\varphi + \tau_{xy} \sin(2\varphi) \\
\sigma_\eta &= \frac{1}{2} (\sigma_x + \sigma_y) - \frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\varphi - \tau_{xy} \sin(2\varphi) \\
\tau_{\eta\xi} &= -\frac{1}{2} (\sigma_x - \sigma_y) \sin(2\varphi) + \tau_{xy} \cos(2\varphi)
\end{aligned} \tag{65}$$

wobei der Winkel φ den Drehwinkel bezeichnet, der die x-Achse in die ξ -Achse dreht. In unserem Fall gilt $\varphi = -\phi$ und x, y bilden ein Hauptachsensystem, folglich gilt $\tau_{xy} = 0$.

Damit erhält man:

$$\sigma_\xi + \sigma_\eta = \sigma_x + \sigma_y \tag{66}$$

$$\sigma_\xi - \sigma_\eta = -(\sigma_x - \sigma_y) \cos(2\phi) \tag{67}$$

und mit (63) erhält man:

$$\begin{aligned}
\epsilon_1 &= A (\sigma_\eta + \sigma_\xi) + B (\sigma_\xi - \sigma_\eta) \\
\epsilon_2 &= A (\sigma_\eta + \sigma_\xi) - 2B \tau_{\eta\xi} \\
\epsilon_3 &= A (\sigma_\eta + \sigma_\xi) - B (\sigma_\xi - \sigma_\eta)
\end{aligned} \tag{68}$$

Oder in Matrixschreibweise:

$$\begin{pmatrix} A+B & 0 & A-B \\ A & -2B & A \\ A-B & 0 & A+B \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \sigma_\xi \\ \tau_{\eta\xi} \\ \sigma_\eta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \end{pmatrix} \tag{69}$$

Unter Verwendung der Transformation der Spannungskordinaten

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{2}(\sigma_\eta + \sigma_\xi) \\ Q &= \frac{1}{2}(\sigma_\eta - \sigma_\xi) \\ T &= \tau_{\xi\eta} \end{aligned} \quad (70)$$

und den Dehnungskordinaten

$$\begin{aligned} p &= \frac{1}{2}(\epsilon_3 + \epsilon_1) \\ q &= \frac{1}{2}(\epsilon_3 - \epsilon_1) \\ t &= \frac{1}{2}(\epsilon_3 + \epsilon_1 - 2\epsilon_2) \end{aligned} \quad (71)$$

erhält man das entkoppelte Gleichungssystem

$$\begin{aligned} AP &= p \\ BQ &= q \\ BT &= t \end{aligned} \quad (72)$$

Die Spannung P stellt dabei den hydrostatischen Spannungsanteil dar, die Spannungen Q und T verkörpern reine Schubanteile in der x,y-Ebene.

3.3.4 Sackloch, allgemeiner Spannungszustand

Wird ein Sackloch gebohrt oder existiert eine in Tiefenrichtung ungleichförmige Spannungsverteilung, so lässt sich von den aufgezeichneten relaxierten Dehnungen nicht mehr analytisch auf den Spannungszustand zurückschließen. Nach Render und Vigness [46] liegt zwar auch hier ein ähnlicher Dehnungsverlauf wie in Gleichung (62) vor, allerdings sind die Koeffizienten nicht mehr konstant, sondern variieren mit der Bohrungstiefe. Zur Abschätzung des Tiefenverlaufs der Spannungsverteilung aus den Messwerten wurden verschiedene Verfahren ausgearbeitet.

Die bekanntesten sind die „Incremental Strain Method“, die „Average Stress Method“, die „Potenzreihenmethode“ sowie die „Integralmethode“ [43] [47] [48]. Dabei basiert die Anwendung der Potenzreihenmethode und der Integralmethode auf numerisch erzeugten Koeffizienten. Unter ihnen ist die Integralmethode das Verfahren, aus dem die anderen durch entsprechende Vereinfachungen abgeleitet werden können. Sie ist bei Spannungsverteilungen vorzuziehen, die sich in Tiefenrichtung abrupt ändern. Sind dagegen glatte Spannungsverläufe zu erwarten, so ist die Potenzreihenmethode die bessere Wahl, da bereits die zufälligen Messfehler gemittelt werden.

3.3.5 Versuchsaufbau Bohrlochmethode

Das Bohrlochverfahren ist eine sehr einfache und im Vergleich kostengünstige Methode zur Bestimmung der Eigenspannungen. Zur Messung der Eigenspannungen nach dem Bohrlochverfahren benötigt man eine Hochgeschwindigkeitsfräse, einen Messverstärker und DMS-Rosetten (siehe Abb. 24).

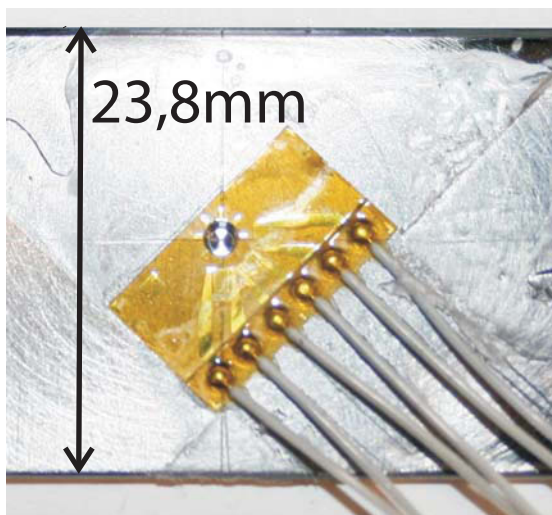


Abbildung 24: DMS-Rosette für das Bohrlochverfahren.

In Abb. 25 ist die Hochgeschwindigkeitsfräse, wie sie am Lehrstuhl für Umformtechnik verwendet wird, dargestellt. Es handelt sich dabei um eine Fräse der Marke SINT Technology. Die Fräse erreicht eine Umdrehungszahl von max. 400.000 1/min und hat eine Vorschubgeschwindigkeit von 0,1 mm/min bis zu 0,25 mm/min. Durch eine hohe Drehzahl bei einer geringen Vorschubgeschwindigkeit kann sichergestellt werden, dass keine weiteren Veränderungen des Spannungsfeldes durch die spanende Bearbeitung herbeigeführt werden.



Abbildung 25: Hochgeschwindigkeitsfräse für die Bohrlochmethode.

Im folgenden sind Punkte aufgelistet, die dem Bohrlochverfahren gewisse Grenzen setzen:

- Flächen mit hohen Spannungsgradienten sollten vermieden werden, da angenommen werden muss, dass die Spannungen konstant über den Lochdurchmesser sind.
- Gebiete, die eine Eigenspannung größer als ein Drittel der Streckgrenze aufweisen, verursachen oft fehlerhafte Resultate aufgrund lokaler plastischer Verformung während des Bohrens.
- Es kann zur Erwärmung des Materials während des Bohrvorgangs kommen.
- Der Bereich der Messung muss zugänglich sein, damit die Fräse positioniert werden kann.
- In der Nähe des Bohrlochs kann es zur Kaltverfestigung kommen.
- Die Dicke des Materials muss mindestens dem Vierfachen des Lochdurchmessers entsprechen, um einen Tiefenverlauf messen zu können.
- Der Abstand der einzelnen Bohrlöcher muss mindestens dem Achtfachen des Lochdurchmessers entsprechen.

3.4 Ringkernverfahren

Das Ringkernverfahren wurde als eine einfache Methode zur Ermittlung von Oberflächeneigenstressungen als integraler Wert von der Oberfläche bis zur maximalen Ringnuttiefe konzipiert. Es wurde davon ausgegangen, daß sich der beim Freischneiden entstehende zylindrische Kern vollständig entspannt. Die auf der Oberfläche gemessenen Dehnungen wurden über die bekannten Beziehungen des Hooke'schen Gesetzes in Spannungen umgerechnet [49].

Das Ringkernverfahren ist der Bohrlochmethode sehr ähnlich. Es wird dazu eine Fräse und ein DMS benötigt. Beim Ringkernverfahren wird senkrecht zur Oberfläche in den zu analysierenden Bauteil eine kreisförmige Nut eingebracht. Dabei wird der im Zentrum stehenbleibende Kern vom restlichen Bauteil abgetrennt und dieser entspannt durch das Auslösen der im abgetragenen Volumen enthaltenen Eigenstressungen [49].

Die mit der Entspannung verbundenen Verformungen werden auf der Oberfläche des Kerns mit einer Spezialrosette mit drei Messgittern, die jeweils um 45° gegeneinander verdreht sind und vor dem Materialabtrag aufgeklebt worden sind, gemessen [49].

Zur Ermittlung der Tiefenverteilung der Eigenstressungen wird die Ringnut schrittweise eingebracht und die Dehnungen nach jedem Tiefeninkrement Δz aufgezeichnet. Um die Einflüsse der Nuttiefe, der Form des Nutgrunds und der Rosettengeometrie zu erfassen, wird beim Ringkernverfahren eine Kalibrierung bei einem bekannten, meist homogenen Spannungszustand vorgenommen [49].

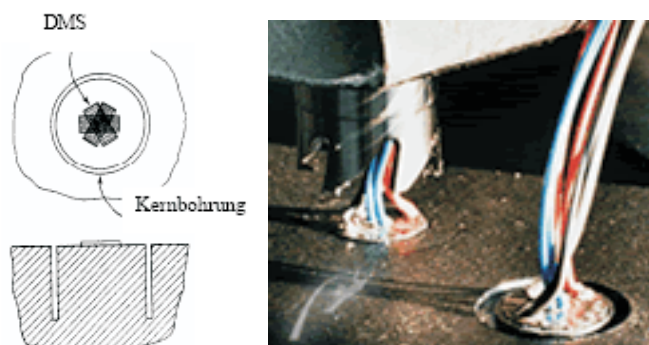


Abbildung 26: Messanordnung beim Ringkernverfahren [49].

Da im Vergleich zur Bohrlochmethode die Änderungen der relaxierten Dehnungen beim Ringkernverfahren wesentlich größer sind, werden an das Verfahren zum Materialabtrag geringere Anforderungen gestellt. Praktische Probleme ergeben sich durch Ausbrechen einzelner Zähne der Kronenfräasers während des Materialabtrags. Weiters ist der Einsatz auf weiche, mechanisch gut bearbeitbare Werkstoffe beschränkt [49].

Die Vorteile gegenüber der Bohrlochmethode liegen darin, dass der Eingriff in den Werkstoff geringer ist und es praktisch zu einer vollständigen Entspannung des Materials

kommt. Der Nachteil zeigt sich in der komplizierteren Bohrung und Messung, da hier Spezialwerkzeuge notwendig sind.

3.5 Randbedingungen und Einsatzgrenzen der Bohrlochmethode und des Ringkernverfahrens

Um Meßfehler und die damit verbundene Fehlinterpretation der aus den verfälschten Dehnungssignalen errechneten Eigenspannungen zu vermeiden, müssen einige Randbedingungen, vor allem bezüglich der Bauteilgröße, der Oberflächenkrümmung, des Abstands benachbarter Messstellen sowie des Messstellenabstands von der Bauteilberandung eingehalten werden. Geringe Ergebnisungenauigkeiten sind zu erwarten, wenn die in der nachfolgenden Tabelle aufgelisteten Werte eingehalten werden [49].

	Bohrlochmethode	Ringkernverfahren
Mindestbauteilbreite [mm]	10-20 x D_0	4-6 x D_0
Mindestbauteildicke [mm]	3 x D_0	1 x D_0
Minimaler Messstellenabstand von der Bauteilberandung [mm]	5-10 x D_0	2-3 x D_a^3
Minimaler Messstellenabstand benachbarter Messstellen [mm]	5 x D_0	3 x D_a^3
Minimaler Oberflächenkrümmungsradius [mm]	3 x D_0	5 x D_0

Tabelle 1: Randbedingungen der Bohrlochmethode und des Ringkernverfahrens

Preckel [50] führte Untersuchungen an 2mm dicken Blechen mit unterschiedlichen Spannungszuständen durch. Er definierte daraus den minimalen Abstand vom Lochrand zum Rand des Bauteils mit $D_a = 5 \cdot d_0$. Abstände über $D_a = 5 \geq d_0$ führen zu einem maximalen relativen Fehler von weniger als 10%, wie in Abbildung 27 dargestellt[42].

⁴Aussendurchmesser: $D_a = D_0 + 2b$

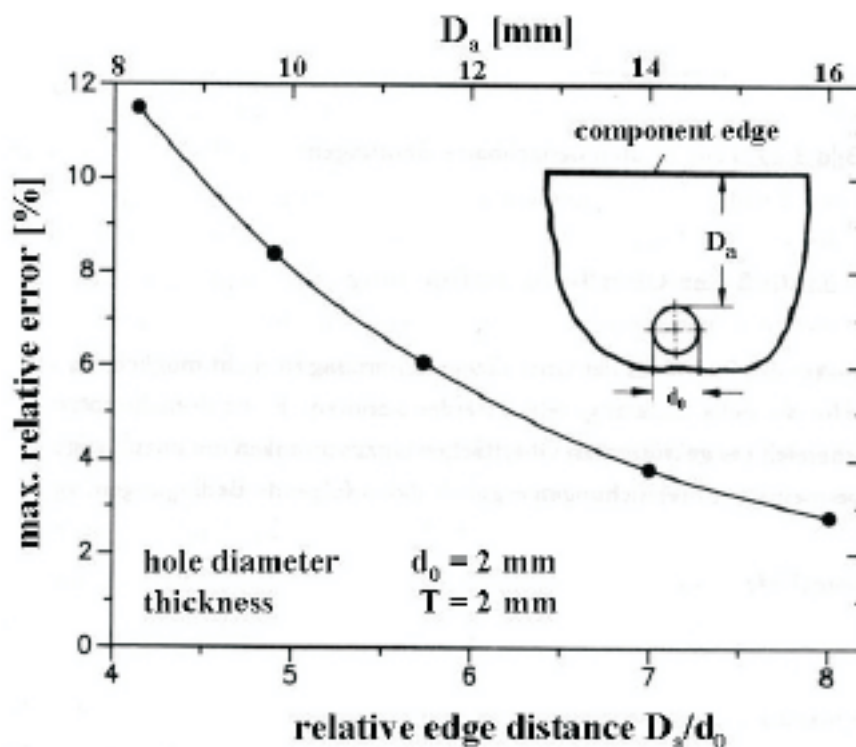


Abbildung 27: Maximaler relativer Fehler in Abhängigkeit vom Abstand Bohrloch-Rand [42].

Als dritte Gruppe zur Messung von Eigenspannungen werden im folgenden Kapitel die zerstörungsfreien Messmethoden beschrieben.

3.6 Zerstörungsfreie Messmethoden

Die bisher beschriebenen Methoden messen immer eine Änderung eines Zustandes, z.B. der Dehnung des Bauteils, welche sich durch das Entfernen eines finiten Elementes des unter Spannung stehenden Bauteils ergibt. Wirkt eine Kraft auf ein metallisches Bauteil, die geringer als die Streckgrenze ist, dann verdreht und dehnt sich das Bauteil elastisch. Die elastische Dehnung zeigt sich in einer Änderung der Gitterkonstanten und diese Änderung lässt sich mit den zerstörungsfreien Messmethoden erfassen [34].

Am häufigsten werden dabei die Beugungsverfahren, wie Röntgen- oder Neutronenbeugung (siehe Kap. 3.6.1), verwendet. Weitere Methoden sind die Ultraschallprüfung und die Analyse des Barkhausenrauschens [51].

3.6.1 Röntgenmethode

Die Röntgendiffraktometrie nach EN15305 [52], die auch Röntgenbeugungsverfahren genannt wird, arbeitet mit einer Röntgenquelle, welche die Probe punktuell unter verschiedenen Winkeleinstellungen bestrahlt.

Die Röntgenmethode nutzt dabei den Effekt, dass bei einem unter Spannung stehenden Metall, die daraus resultierende elastische Dehnung, die atomaren Ebenen veranlasst, ihren Abstand zu verändern. Mit dem Röntgenverfahren ist es möglich direkt den Atomabstand zu messen. Aufgrund dieser Größe kann die Gesamtspannung im Material bestimmt werden [34].

Wenn ein Polykristall, wie ein Metall, unter Spannung gesetzt wird, entstehen elastische Dehnungen im Kristallgitter der einzelnen Kristallite. Anders ausgedrückt, eine extern aufgebrachte Spannung oder eine im Material vorhandene innere Spannung, die unter der Streckgrenze liegt, wird durch interatomare Dehnung aufgenommen. Mit der Röntgenmethode können die interatomaren Abstände gemessen werden, die in einem Zusammenhang mit der elastischen Dehnung in der Probe stehen [34].

Die Spannungswerte können durch die elastischen Dehnungen im Kristallgitter berechnet werden, weil die elastischen röntgenographischen Konstanten des Materials bekannt sind und aufgrund der Annahme, dass die Spannung proportional zur Dehnung ist. Diese Annahme ist für die meisten metallischen Werkstoffe üblich [34].

Grundsätzlich gibt es drei Arten zur Messung der Eigenspannungen mit Hilfe der Röntgenmethode.

- Die Zweiwinkel Technik (DET - Double Exposure Technique),
- die Einwinkel Technik (SET - Single Exposure Technique) und
- die Mehrfachwinkel Technik.

Bei jeder dieser Messtechniken werden Strahlen bevorzugt, die im hinteren Rückstrahlungsbereich liegen, also einen Bragg-Winkel nahe bei 90° aufweisen, da sie den größten Effekt bei der Messung vorhandener Eigenspannung aufweisen. Dies wird auch in der folgenden Formel verdeutlicht [34]:

$$\sigma_\Phi = (2\theta_1 - 2\theta_2) \frac{\cot\theta_1}{2} \left[\frac{E}{1 + \nu} \right] \frac{1}{\sin^2\psi} \left[\frac{\pi}{180} \right] \quad (73)$$

Mit θ_1 als dem Bragg-Winkel der Ebenen, die sich unter dem Einfallswinkel ψ_1 beugen und θ_2 für die Ebenen, die unter dem Einfallswinkel ψ_2 beugen (siehe Abb. 28).

Um eine Eigenspannungsmessung durchzuführen, müssen unterschiedliche Brechungswinkel von interatomaren Ebenen von mindestens zwei unterschiedlichen Winkeln ψ , bezogen auf die Oberflächennormale, gemessen werden. Diese Ebenen sind kristallographisch gleich, d.h. sie haben den gleichen Miller Indizes und im entspannten Zustand des Metalls ist der Atomabstand ebenfalls gleich, wie in Abb. 28 für die Ebenen 1 und 2 dargestellt [34].

In einem unter Spannung stehenden Material haben die gebeugten Ebenen eine unterschiedliche Orientierung, also unterschiedliche Winkel ψ in Bezug auf die Flächennormale. In Abhängigkeit von diesem Winkel zum Spannungsvektor, steigt oder fällt der interplanare Atomabstand [34].

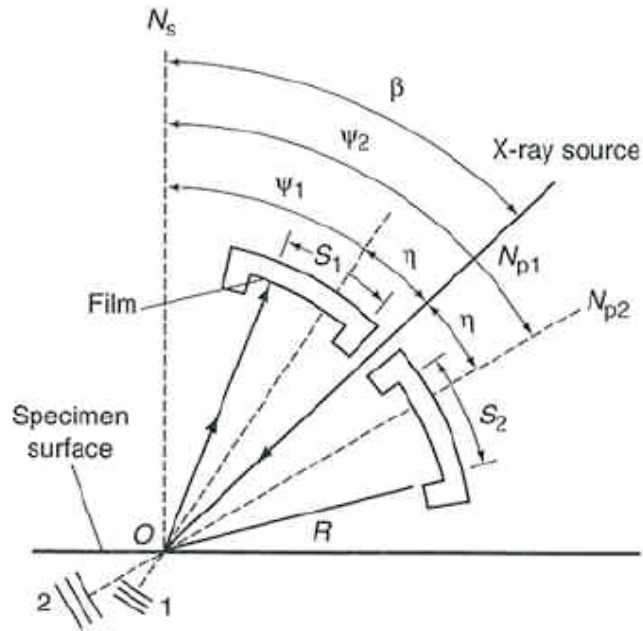


Abbildung 28: Schematischer Aufbau bei der SET Technik [34].

Zur Auswertung wird am häufigsten auf das $\sin^2\psi$ -Verfahren zurückgegriffen. Es geht von zweiachsigen, oberflächenparallelen Spannungszuständen in den röntgenographisch erfassten Werkstoffbereichen aus. Diese Voraussetzung ist an freien Werkstoffoberflächen erfüllt. Wegen der i.a. sehr kleinen Eindringtiefen, der für Gitterdehnungsbestimmungen bei metallischen und nichtmetallischen Werkstoffen verwendeten Röntgenstrahlungen, kann sie in sehr vielen Fällen auch für die röntgenographisch vermessenen Oberflächenschichten als gültig angesehen werden. Mit $\sigma_{33}=0$ ergibt sich für die oberflächenparallele Normalspannung σ_ϕ im Azimut ϕ unabhängig von Betrag und Richtung der Hauptnormalspannungen [5]

$$\epsilon_{\phi,\psi}^G = \frac{1}{2} s_2^{\{hkl\}} \sigma_\phi \sin^2\psi + s_1^{\{hkl\}} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \quad (74)$$

mit

$$\sigma_\phi = \sigma_{11} \cos^2\phi + \sigma_{12} \sin(2\phi) + \sigma_{22} \sin^2\phi \quad (75)$$

In jedem Azimut ϕ liegt also ein linearer Zusammenhang zwischen $\epsilon_{\phi,\psi}^G$ und $\sin^2\psi$ vor. Werden für $\phi = \text{const.}$ Gitterdehnungen $\epsilon_{\phi,\psi}^G$ in verschiedenen Richtungen ψ gemessen

und über $\sin^2\psi$ aufgetragen, so liefert, wie in Abb. 29 dargestellt, die Steigung der Ausgleichsgeraden durch die Messpunkte

$$\frac{\partial \epsilon_{\phi,\psi}^G}{\partial \sin^2\psi} = \frac{1}{2} s_2^{\{hkl\}} \sigma_{\phi} \quad (76)$$

und der Ordinatenabschnitt der Ausgleichsgeraden

$$\epsilon_{\phi,\psi=0}^G = s_1^{\{hkl\}} \sigma_{11} + \sigma_{22}. \quad (77)$$

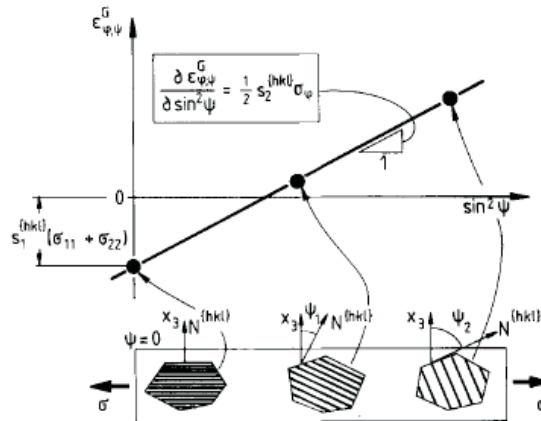


Abbildung 29: Spannungsermittlung nach dem $\sin^2\psi$ -Verfahren (schematisch) [5].

Aus der Steigung der Geraden kann daher die Spannungskomponente σ_{ϕ} und aus dem Ordinatenabschnitt die Normalspannungssumme ($\sigma_{11} + \sigma_{22}$) bestimmen werden. Letztere ist eine Invariante des Spannungstensors, so daß sich für den zweiachsigen Oberflächenspannungszustand ergibt

$$(\sigma_{11} + \sigma_{22}) = (\sigma_1 + \sigma_2). \quad (78)$$

Eine Drehung des Koordinatensystems um den Winkel

$$\phi_0 = \frac{1}{2} \arctan \frac{2\sigma_{12}}{\sigma_{11} - \sigma_{22}} \quad (79)$$

um die x_3 -Achse bewirkt den Übergang in das Hauptnormalspannungssystem, so daß σ'_{11} mit der 1.Hauptspannung σ_1 gleich wird.

Die praktische Bedeutung des $\sin^2\psi$ -Verfahrens für die röntgenographische Spannungsanalyse beruht darauf,

- daß in vielen Fällen hinreichend homogene, oberflächenparallele, ebene Spannungszustände vorliegen,
- daß unabhängig vom vorliegenden Oberflächenspannungszustand einzelne Oberflächenspannungskomponenten relativ einfach bestimmbar sind,
- daß kein großer mathematischer Aufwand bei der Auswertung der Messungen erforderlich und eine einfache Beurteilung der Streuung der Gitterdehnungswerte um die Ausgleichsgerade möglich ist, und
- daß bei der Auswertung der Messungen die Differentiation nach Gl. 76 die Beziehung

$$\frac{\partial \epsilon_{\phi,\psi}^G}{\partial \sin^2\psi} = -\frac{1}{2\tan\theta_0} \frac{\partial 2\theta_{\phi,\psi} - \partial 2\theta_0}{\partial \sin^2\psi} = -\frac{1}{2\tan\theta_0} \frac{\partial 2\theta_{\phi,\psi}}{\partial \sin^2\psi} \quad (80)$$

liefert, bei der $2\theta_0$ im Zähler wegfällt, so daß mögliche Fehler bei der Verwendung eines Literaturwertes von θ_0 als Argument des Tangens sehr klein bleiben.

Somit sind bei der röntgenographischen Ermittlung von Spannungskomponenten σ_ϕ keine Messungen absoluter Linienlagen erforderlich, sondern es genügt, Linienlagenverschiebungen in Abhängigkeit von ψ bzw. $\sin^2\psi$ zu bestimmen. Das ist mit geringem Aufwand sehr genau möglich. Bezüglich der Auswerteprozedur ist noch darauf hinzuweisen, daß aufgrund von Gl. 80 die Auftragung der Gitterdehnungen $\epsilon_{\phi,\psi}^G$ über $\sin^2\psi$ der Auftragung der Linienlagen $2\theta_{\phi,\psi}$ über $\sin^2\psi$ vollkommen gleichwertig ist. Da zudem zwischen dem Abstand D von Gitterebenen des Typs $\{hkl\}$ und der Gitterkonstanten a bei kubisch kristallisierenden Werkstoffen der lineare Zusammenhang

$$D = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (81)$$

besteht, gilt auch

$$\frac{\partial \epsilon_{\phi,\psi}^G}{\partial \sin^2\psi} = \frac{1}{D_0} \frac{\partial D_{\phi,\psi}}{\partial \sin^2\psi} = \frac{1}{a_0} \frac{\partial a_{\phi,\psi}}{\partial \sin^2\psi}. \quad (82)$$

Deshalb können bei der Auswertung von Gitterdehnungsmessungen anstelle von $\epsilon_{\phi,\psi}^G$ oder $2\theta_{\phi,\psi}$ auch $D_{\phi,\psi}$ oder $a_{\phi,\psi}$ über $\sin^2\psi$ aufgetragen werden. Die Auftragung von $a_{\phi,\psi}$ über $\sin^2\psi$ erlaubt dabei einen direkten Vergleich von Messungen an verschiedenen Gitterebenen $\{hkl\}$ [5].

3.6.2 Neutronenbeugung

Die Neutronenbeugung ist dazu geeignet elastische Dehnungen, die durch Eigenspannungen im gesamten Volumen von Bauteilen induziert werden, zu messen mit einer räumlichen Auflösung im Bereich von 1 mm^3 . Grundsätzlich misst man bei der Neutronenbeugung, ebenso wie bei der Röntgenbeugung, den Abstand zwischen Gitterebenen, der durch Eigenspannungen verändert wird. Die elastische Dehnung ϵ , die senkrecht auf die gebeugte kristallographische Richtung steht, ist abhängig von d , durch folgende Beziehung [34]:

$$\epsilon = \frac{d - d_0}{d_0} = \frac{\sin\theta_0}{\sin\theta - \sin\theta_0} \quad (83)$$

Wobei d_0 der Abstand zwischen den entspannten Gitterebenen und θ_0 der Winkel zwischen dem einfallenden und dem gebeugten Neutronenstrahl ist. Wenn die Orientierung der Hauptspannungen bekannt ist, können die Spannungen in jeder beliebigen Richtung berechnet werden:

$$\sigma_1 = \frac{E}{(1 + \nu)} \cdot \left[\epsilon_1 + \frac{\nu}{(1 - 2\nu)} (\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3) \right] \quad (84)$$

Dabei sind σ_1 , σ_2 und σ_3 die Hauptspannungen, ϵ_1 , ϵ_2 und ϵ_3 die Dehnungen, die in den entsprechenden Richtungen gemessen wurden, E der E-Modul und ν die Querkontraktionszahl. Wenn die Richtung der Hauptspannungen nicht bekannt ist, müssen die Dehnungen in mindestens sechs Richtungen gemessen werden, um die Eigenspannungen, die im analysierten Abschnitt des Bauteils wirken, zu messen [34].

3.6.3 Ultraschallmessung

Das zugrundeliegende Prinzip bei der Messung der Eigenspannungen mit Ultraschall ist das Phänomen, dass sich die Geschwindigkeit der Schallwellen direkt proportional mit der induzierten Spannung ändert. Die Spannung wird dabei gemessen, indem man eine Schallwelle mit einer Frequenz von mehreren Megahertz in die Probe schickt und dann die Ausbreitungsgeschwindigkeit misst [34].

Die spannungsakustischen Koeffizienten, die zur Analyse notwendig sind, werden üblicherweise durch eine Kalibrierung ermittelt. Die größte Empfindlichkeit erreicht man, wenn die Welle in die gleiche Richtung wie die Spannung läuft. Die Methode ermöglicht eine Messung von Makrospannungen über ein großes Volumen des Bauteils. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Messeinrichtung leicht transportiert werden kann und die Messung kostengünstig ist [7].

Das große Interesse an der Ultraschalltechnik stammt durch die Möglichkeit, damit dreidimensionale, nichtzerstörende Messungen im Material durchzuführen [34] [53].

3.6.4 Barkhausenrauschen - Analyse

Die Barkhausenrauschen Analyse (BNA), genannt auch magnetoelastische oder mikromagnetische Methode, beruht auf dem Prinzip von induktiven Messungen eines rauschartigen Signals, das generiert wird, wenn ein Magnetfeld an einem ferromagnetischen Teil angewandt wird [54].

Ferromagnetische Materialien bestehen aus kleinen magnetischen Bereichen, die sich an Magnetstäben ähneln und Domänen genannt werden. Jede Domäne wird entlang einer bestimmten kristallographischen Vorzugsrichtung magnetisiert. Die Domänen werden voneinander durch Grenzen getrennt, die als Domänenwände bekannt sind. Durch AC-Magnetfelder bewegen sich die Domänenwände hin und her. Damit sich eine Domänenwand bewegen kann, soll sich die Domäne an einer Seite der Wand vergrößern, während die Domäne an der Gegenseite schrumpft. Das Ergebnis ist eine Änderung der allgemeinen Magnetisierung des Teils [54].

Wenn eine Spule von leitfähigem Draht in die Nähe des Teils gestellt wird, während die Domänenwand sich bewegt, erzeugt die entstehende Magnetisierung einen elektrischen Impuls in der Spule. Erstmals wurden die elektrischen Betrachtungen der Bewegung der Domänenwand von Professor Heinrich Barkhausen im Jahre 1919 gemacht. Er hat bewiesen, dass der Magnetisierungsprozess, der durch eine Hysteresekurve charakterisiert wird, eigentlich nicht ununterbrochen ist, sondern aus kleinen, schrägen Schritten besteht, die entstehen, wenn sich die magnetischen Domänen unter dem angewandten Magnetfeld bewegen. Wenn alle elektrischen Impulse, die durch alle Domänenbewegungen entstehen, addiert werden, wird ein rauschartiges Signal oder das Barkhausenrauschen erzeugt [54].

Das Barkhausenrauschen verfügt über ein Leistungsspektrum, das bei der Magnetisierungsfrequenz anfängt und bei den meisten Materialien über 2 MHz ansteigt. Es wird exponentiell gedämpft als eine Funktion des Abstands, um welchen es sich im Material bewegt hat. Dies wird vor allem durch die Wirbelstromdämpfung verursacht, die durch die sich vermehrenden elektromagnetischen Felder entsteht, die durch die Domänenwände erzeugt werden. Das Ausmaß der Dämpfung legt die Tiefe fest, in der Informationen erfasst werden können (Messtiefe). Die Hauptfaktoren, die diese Tiefe beeinflussen, sind [54]:

1. der Frequenzbereich des analysierten Barkhausenrauschens sowie
2. die Leitfähigkeit und Durchlässigkeit des Prüfmaterials.

Die Messtiefen für praktische Anwendungen befinden sich zwischen 0,01 und 1,5 mm.

Das Messverfahren des Barkhausenrauschens ist dadurch begrenzt, dass das Material ferromagnetisch sein muss und die Eindringtiefe gering ist [34].

3.6.5 3MA - Verfahren

3MA steht für „Micromagnetic-, Multiparameter-, Microstructure-, and stress-Analysis“. Das System wurde am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfung entwickelt. Der

Grund das 3MA-System in den späten 1970er Jahren zu entwickeln war, ein zerstörungsfreies Messverfahren zu finden, das auch das Gefüge berücksichtigt, um damit z.B. die Qualität einer Wärmebehandlung zu analysieren.

Beim 3MA-Prüfverfahren wird durch Anlegen eines magnetischen Wechselfeldes die magnetische Domänenstruktur geändert. Daher bewegen sich die Bloch-Wände, welche die einzelnen magnetischen Domänen voneinander trennen und die eigentlichen Sensoren im Material sind und treten dabei in Wechselwirkung mit der Mikrostruktur, wie z.B. Versetzungen, Leerstellen und Cu-Ausscheidungen. Dadurch wird die Bloch-Wandbewegung behindert, was sich wiederum auf das Ummagnetisierungsverhalten auswirkt [55].

Zur Erfassung des Ummagnetisierungsverhaltens werden in dem vom Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) entwickelten 3MA-Prüfverfahren folgende 4 Prüfmethode zur Analyse verwendet [55]:

- Barkhausen-Rauschen
- Überlagerungspermeabilität
- Zeitsignal von tangentialer Magnetfeldstärke
- Mehrfrequenz-Wirbelstrom

Alle Prüfmethode können mit einem Sensor in Aufsatztechnik im zeitlichen Multiplex verwendet werden. Aus den gemessenen Signalen der 4 Prüfmethode werden Prüfgrößen abgeleitet, welche mit den Werkstoffeigenschaften korrelieren. Zur quantitativen Bestimmung von Werkstoffeigenschaften kann eine Kalibrierung entweder durch Regressionsanalyse oder Mustererkennung durchgeführt werden. Voraussetzung dafür ist ein Kalibrierprobensatz mit abgestuften und bekannten Werkstoffeigenschaften. Bei der Kalibrierung mittels Regressionsanalyse wird der Zusammenhang zwischen den gemessenen Prüfgrößen und den anwendungsspezifischen Zielgrößen ermittelt. Bei der Kalibrierung mittels der Mustererkennung wird eine Ähnlichkeitsbetrachtung von gemessenen Prüfgrößen mit den Prüfgrößenmustern der Kalibrierproben mit bekannten Eigenschaften durchgeführt. Nach einer abgeschlossenen Kalibrierung ist es dem Anwender möglich, eine quantitative Bestimmung der entsprechenden Werkstoffeigenschaft durchzuführen. Durch den Einsatz mehrerer Prüfgrößen gelingt es, Störgrößen von Zielgrößen zu separieren [55].

3.6.6 Optische Messmethoden

In den letzten Jahren wurden auch optische Messmethoden entwickelt, die immer häufiger Anwendung finden. Dabei werden Muster erzeugt, mit denen lokale Verschiebungen in der Umgebung des Bohrlochs berechnet werden können. Die Firma Stresstech Group untersuchte die Möglichkeit und Anwendbarkeit der Kombination von „Digital Speckle Pattern Interferometrie (DSPI)“ und der Bohrlochmethode. Dabei wurde das System PRISM[®] entwickelt [56].

PRISM[®] basiert auf dem Zusammenhang zwischen Speckle Interferogrammen, die von einem Laser erzeugt werden und der Bohrlochmethode (siehe Kap. 3.3). Die Vorteile liegen nicht nur in der berührungslosen Messung, sondern auch in der Geschwindigkeit, in der eine Messung durchgeführt werden kann [56].

In dieser Arbeit wurde eine weitere Möglichkeit der optischen Messung von Eigenspannungen analysiert. Es wurde dazu das optische Messsystem Aramis[®] von GOM[®] verwendet. Die genaue Beschreibung des Messsystems und die Anwendung zur Messung von Eigenspannungen folgt im nächsten Kapitel.

3.7 Das optische Messsystem Aramis[®]

3.7.1 Grundlagen

Aramis[®] ist ein berührungslos arbeitendes, optisches 3D-Verformungsmesssystem. Aramis[®] analysiert, berechnet und dokumentiert Verformungen.

Aramis[®] erkennt in digitalen Kamerabildern die Oberflächenstruktur der Messprobe und ordnet Bildpixeln Koordinaten zu. Die erste Aufnahme stellt im Messprojekt den unverformten Zustand dar. Nach oder während der Verformung der Messprobe erfolgen weitere Aufnahmen. Aramis[®] vergleicht nun die digitalen Aufnahmen und berechnet die Verschiebung und Verformung der Objektmerkmale. Weist die Messprobe nur wenig Objektmerkmale auf, z. B. bei homogenen Oberflächen, dann ist die Oberfläche mit geeigneten Methoden vorzubehandeln, z. B. mit einem stochastischen Farbsprühmuster.

Aramis[®] eignet sich besonders zur dreidimensionalen Verformungsmessung, unter statischer oder dynamischer Last, um Verformungen und Dehnungen flächenhaft an realen Bauteilen zu analysieren. Die überwiegende Anzahl der Systemfunktionen sind per Software gesteuert. Es stehen Mess-, Auswerte-, Darstellungs- und Druckfunktionen zur Verfügung.

Anwendungsgebiete:

- Materialprüfung
- Festigkeitsbeurteilung
- Bauteildimensionierung
- Untersuchung nicht-linearen Verhaltens
- Charakterisierung von Kriech- und Alterungsprozessen
- Bestimmung von Grenzformänderungskurven (FLC = Forming Limit Curve)
- Verifikation von FE-Modellen
- Ermittlung von Materialkennwerten

- Analyse des Verformungsverhaltens von homogenen und inhomogenen Werkstoffen
- Dehnungsberechnung

Die wesentlichen Hardware- und Software- Komponenten

- Sensor mit zwei Kameras (nur bei 3D-Aufbau)
- Stativ für die sichere und stabile Aufnahme des Sensors
- Sensor-Steuergerät für die Stromversorgung der Kameras und Steuerung der Bildauslösung
- Hochleistungs-PC-System
- Aramis[®]-Anwendersoftware v6.1 und GOM Linux 10 Systemsoftware oder höher

In Abbildung 30 ist das Messsystem mit den einzelnen Komponenten dargestellt.

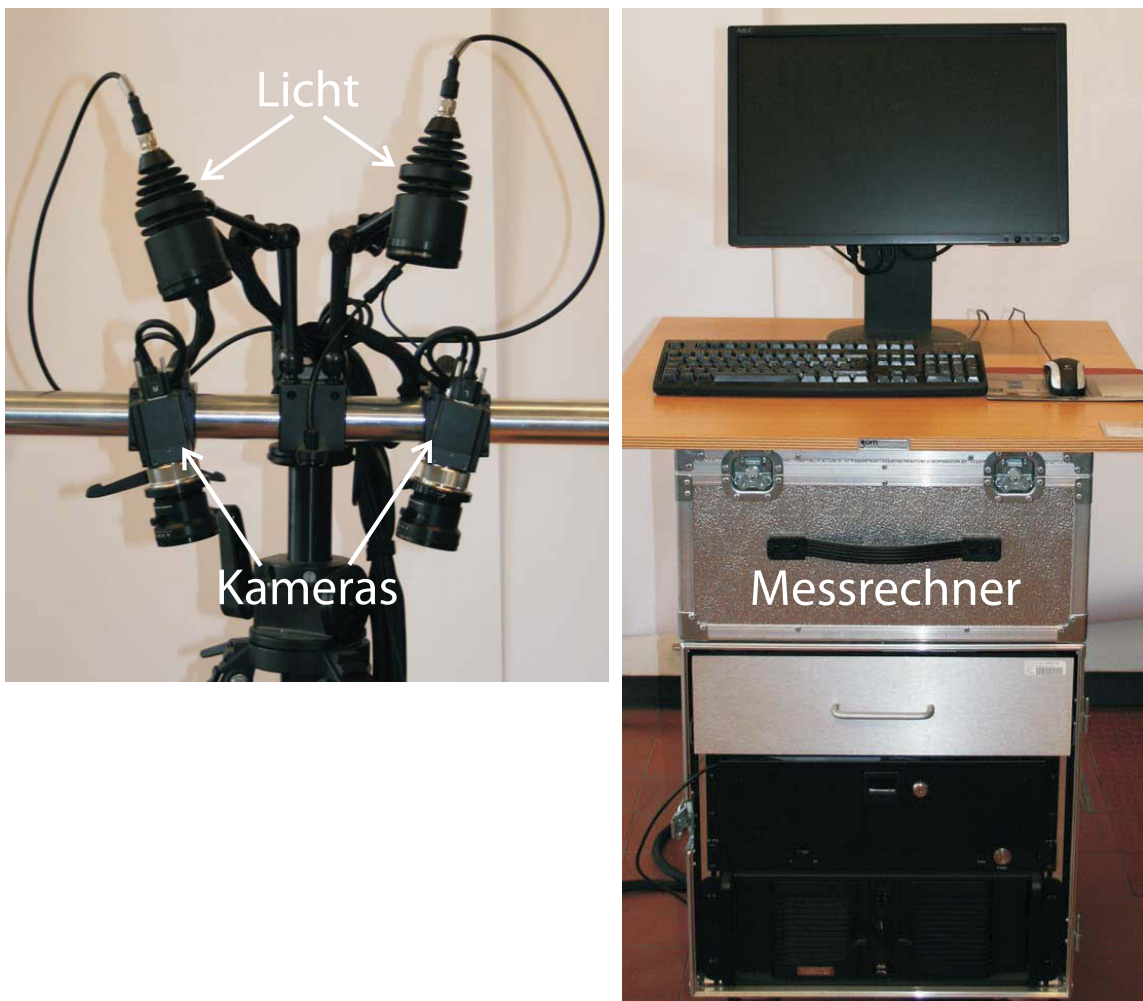


Abbildung 30: Die einzelnen Komponenten des optischen Messsystems Aramis[®].

3.7.2 Prinzip der Verformungsmessung

Die Aramis[®]-Sensoreinheit wird im Regelfall mit einem Stativ betrieben, um die Sensoreinheit optimal zur Messprobe auszurichten. Im Falle eines 3D-Messaufbaus kommen zwei Kameras (Stereoaufbau) zum Einsatz, die vor der Messung kalibriert werden. Die Messprobe muss sich im resultierenden Messvolumen (kalibrierter 3D-Raum) befinden.

Nach Anlegen des Messprojektes in der Software erfolgen die Bildaufnahmen (monochrom, Kamera rechts, Kamera links) in den verschiedenen Laststufen der Messprobe. Nach Definition des auszuwertenden Bereichs (Berechnungsmaske) und dem Anlegen eines Startpunktes erfolgt die Berechnung des Messprojektes. Während der Berechnung beobachtet Aramis[®] die Verformung der Messprobe in den Bildern über eine Vielzahl von quadratischen oder rechteckigen Bildausschnitten (Facetten). Das folgende Bild 31 zeigt 15 x 15 Pixelfacetten mit 2 Pixeln Randüberlappung in Stufe 0.

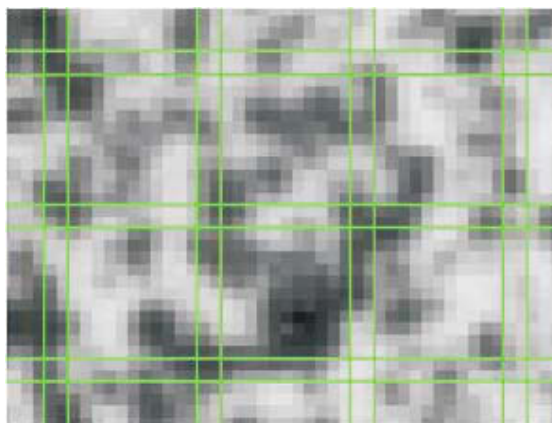


Abbildung 31: 15x15-Facetten mit 2 Pixel Überlappung.

Die Facettengröße ist in der Software in Pixeln einstellbar. Die Facetten werden in den verschiedenen Laststufen über die individuellen Grauwertstrukturen erkannt und verfolgt. In Abbildung 32 ist ein Facettenpaar (15 x 15 Pixel) der rechten und linken Kamera gezeigt, deren Grauwerte in sechs Deformationsstufen (Stufe 0 bis Stufe 5) beobachtet wurde. Die Stufe 0 stellt den unverformten Referenzzustand dar und Stufe 5 den Endzustand der Verformung. Die weiß gestrichelte Linie visualisiert in diesen Bildern den unverformten Zustand, um den Sachzusammenhang von Facetten und Deformation zu verdeutlichen.

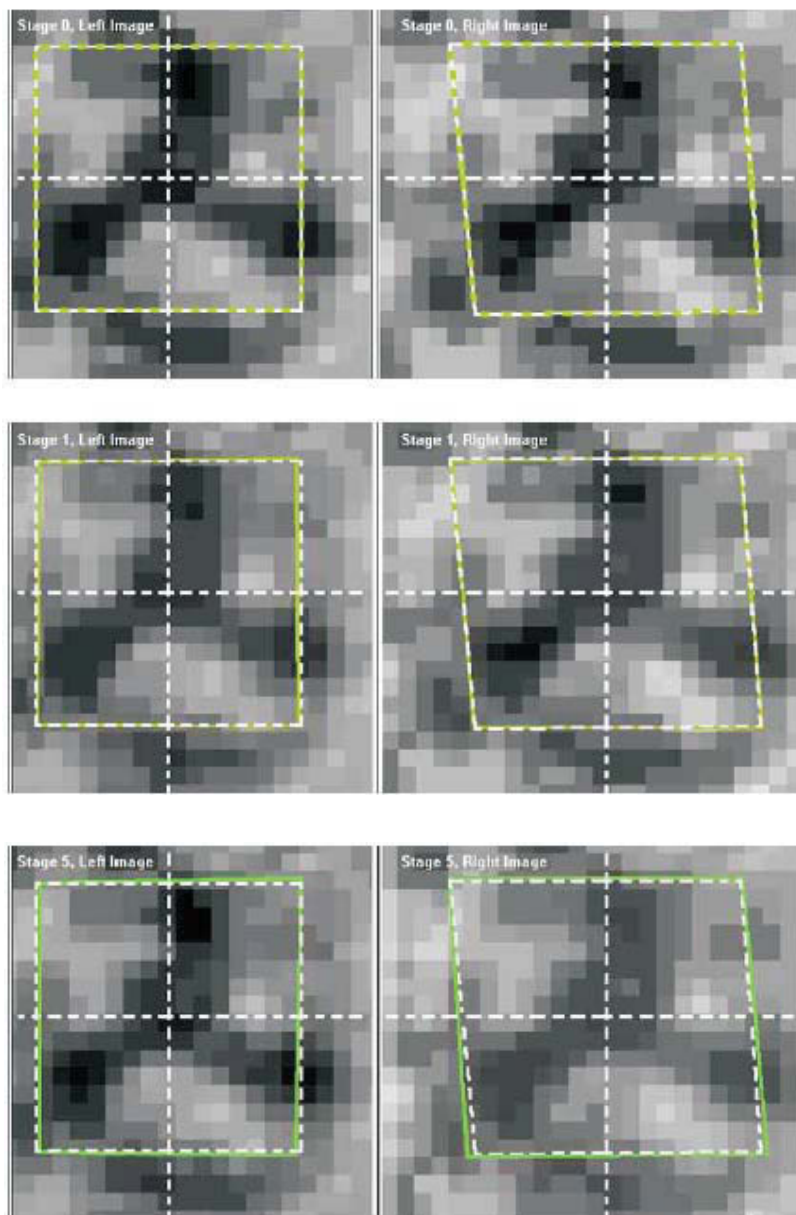


Abbildung 32: Facettenpaar der rechten und linken Kamera in drei unterschiedlichen Verformungsstufen.

Über die Eckpunkte der Facetten und den daraus resultierenden Mittelpunkten werden die 2D-Koordinaten der Facetten bestimmt (siehe Abb. 32). Die 2D-Koordinaten einer Facette, beobachtet von der linken Kamera und die 2D-Koordinaten der gleichen Facette, beobachtet von der rechten Kamera, führen über photogrammetrische Methoden zu einer gemeinsamen 3D-Koordinate. Nach erfolgreicher Berechnung können die Daten noch einem Post- Processing unterzogen werden, um z. B. Messrauschen zu reduzieren oder andere lokale Störeffekte auszublenden. Das Messergebnis steht nun als 3D-Ansicht zur

Verfügung. Alle weiteren Ergebnisdarstellungen, wie z. B. statistische Daten, Schnitte, Reports, sind davon abgeleitet.

Grundsätzlich muss das System zu Beginn jeder Messung kalibriert werden. Dazu wird ein sogenanntes Kalibrierobjekt verwendet. Dies ist notwendig, damit das System die genaue Lage des Messobjektes und die Lage der Kameras zueinander berechnen kann. Dabei ist zu beachten, dass das Kalibrierobjekt in der Größe des zu messenden Bauteils sein muss. Das heißt je kleiner mein Bauteil ist, desto kleiner muss auch das Kalibrierobjekt sein.

In Abbildung 33 sind die beiden Kalibrierobjekte, die in dieser Arbeit verwendet wurden dargestellt.

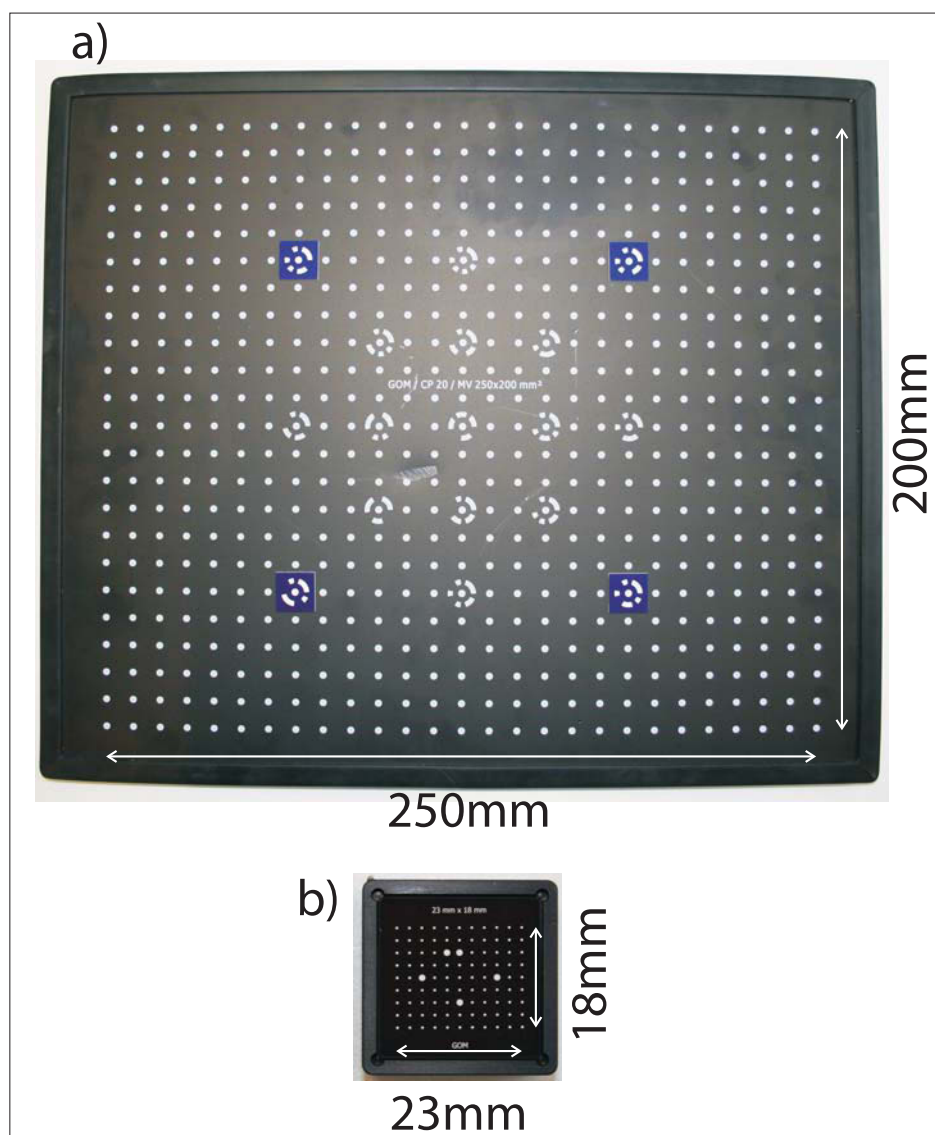


Abbildung 33: Unterschiedliche Kalibrierobjekte. a) zeigt das größte verwendete (250x200mm) und b) das kleinste (23x18mm) verwendete Kalibrierobjekt.

Abschließend sind in der folgenden Tabelle 2, die in dieser Arbeit verwendeten Messverfahren noch einmal gegenübergestellt und bzgl. ihrer Eindringtiefe, Auflösung und Genauigkeit verglichen:

Messmethode	Eindringtiefe	Räumliche Auflösung	Genauigkeit
Bohrlochverfahren	1-2·Lochdurchmesser	50 μ m	\pm 50 MPa
Röntgenverfahren	<50 μ m (Al); <5 μ m (Ti)	1mm lateral; 20 μ m Tiefe	\pm 20 MPa
Aramis [®]	nur flächige Messung möglich	-	0,01%

Tabelle 2: Vergleich der angewandten Messverfahren

4 Herstellung von Kaltband

4.1 Verfahrensbeschreibung

Das Kaltwalzen zur Herstellung von Blechen und Bändern gehört nach DIN 8583, T1, [57] zu den Druckumformverfahren. Beim Kaltwalzen kommt im Gegensatz zum Warmwalzen nur das Längswalzprinzip zum Einsatz. Das Vormaterial aus dem Warmwalzwerk wird nach einer Vorbehandlung zu Feinblech verarbeitet. Nach dem Kaltwalzen erfolgen noch weitere Prozessschritte, wie das Glühen, Nachwalzen oder Beschichten [58].

Nach Euronorm 131-77 [59] ist kaltgewalztes Flachzeug, Material, das ohne vorheriges Erwärmen durch Walzen mit einer Querschnittsverminderung von mindestens 25% hergestellt wird. Nach DIN 1541 [60] umfasst kaltgewalztes Breitband und Blech aus unlegierten Stählen einen Blechdickenbereich zwischen 0,35 und 3,0 mm. In DIN 1623 [61] sind die Gütevorschriften, wie Maße und Maßabweichungen, Sorteneinteilung, Oberflächenbeschaffenheit so wie Prüf- und Auslieferungsbedingungen [58] festgelegt.

Beim Kaltwalzen ist die Einhaltung enger Maßtoleranzen sehr wichtig. Dabei kommt es nicht nur auf die Dickentoleranzen des gewalzten Bandes, sondern vor allem auch auf die Planheit des Walzgutes an [58].

Die technologischen Grundlagen des Kaltwalzens werden in der technischen Literatur ausgiebig und hinreichend beschrieben [62] [63] [64] [65].

Die technologischen Ziele des Kaltwalzens lassen sich in drei Hauptkriterien unterteilen. Diese sind auch in Normen klar geregelt [66]:

- Dickenabnahme,
- Einstellung der Oberflächenstruktur und
- Erreichen einer guten Bandplanheit.

Die Formabweichungen beim Kaltwalzen lassen sich qualitativ einteilen. In Abbildung 34 sind die Formabweichungen entsprechend DIN 50642 gegenübergestellt.

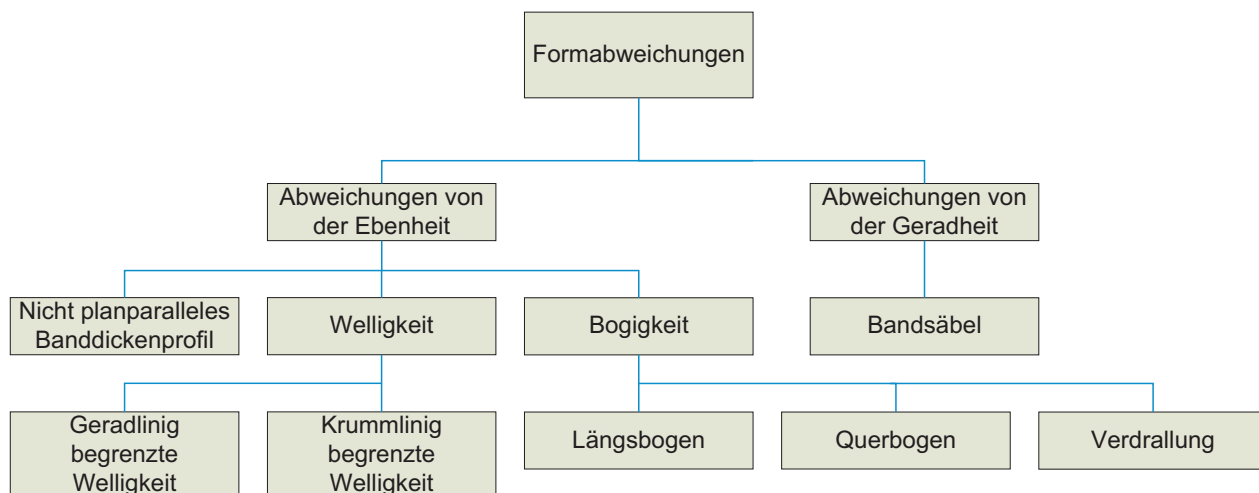


Abbildung 34: Formabweichungen entsprechend DIN 50642 [67].

Das Erreichen einer guten Bandplanheit ist deshalb von großer Bedeutung, da eine gute Weiterverarbeitbarkeit und Qualität des Bandes in den nachfolgenden Prozessen sehr wichtig ist. So können Unregelmäßigkeiten in der Bandplanheit zu Problemen bei den nachgeschalteten Prozessen führen.

Im folgenden Kapitel wird nun näher auf die Bandplanheit eingegangen.

4.2 Bandplanheit

Ein Kaltband wird als plan bezeichnet, wenn seine Mittelfläche eine Ebene darstellt. Dabei ist die Mittelfläche als Symmetrieebene der geometrische Ort aller in Banddickenrichtung gemessenen Höhenmitten. Bei einem ideal planen Band ist das Profil ein Rechteck, während bei der walztechnisch möglichen Planheit unterschiedliche Banddicken über der Bandbreite auftreten. Wenn der Dickenunterschied innerhalb einer vorgegebenen Dickentoleranz liegt, dann gilt das Band als plan [68].

Die Voraussetzung für planes Walzen ist eine gleiche prozentuale Dickenabnahme über der Bandbreite. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, dann kommt es zur Bildung von Eigenspannungen und beim Überschreiten der kritischen Beulspannung zu Wellenbildung [68].

Im Idealzustand ist ein gewalztes Band an allen Kanten exakt gerade, wobei die Kanten jeweils im rechten Winkel aufeinander treffen. Dies setzt voraus, dass das Band eine konstante Dicke und Breite aufweist. Weiters müssen alle Bandzugspannungen konstant sein. Wenn diese Bedingungen erfüllt sind, dann wird das Band als plan bezeichnet [66].

Die Formgebung des Bandes erfolgt hauptsächlich während des Walzprozesses im Walzspalt, wo sie durch unterschiedliche Parameter beeinflusst werden kann (z.B. Anstellung der Walzen, thermische Bombierung, etc.) [66].

Die Ebenheitstoleranzen sind in DIN EN 10131 [69] geregelt.

Die Planheitsfehler zeigen sich im Kaltband in Form von Wellen oder Wölbungen, die durch lokal unterschiedliche Streckungen bzw. Stauchungen im Material hervorgerufen werden. Diese Längendifferenzen führen zu einem Spannungsprofil im Band und in weiterer Folge zu einer Schädigung des Bandes. Diese treten erst nach einem bestimmten Belastungsgrad bzw. dem Erreichen der kritischen Beulspannung auf. Davor kommt es zu Planheitsfehlern, die nicht sichtbar sind. Diese Fehler werden erst sichtbar, wenn alle auf das Band wirkenden Kräfte abfallen und dieses sich dann unterschiedlich krümmt und beult. Ziel ist es daher, eine möglichst konstante Zugspannungsverteilung über die gesamte Bandbreite am Ende des Walzverfahrens zu erzielen. [66]

Es wird zwischen Formabweichungen von der Ebenheit und Abweichungen von der Geradheit der Bänder unterschieden. Die Formabweichungen von der Ebenheit werden darüber hinaus unterteilt nach den Typen Welligkeit und Bogigkeit. Diese sind in der Norm DIN 10202 [70] beschrieben. Die Formabweichungen der Geradheit wird nur durch den Bandsäbel beschrieben [67].

Um für die Planheit eines Bandes ein Qualitätskriterium ohne Maßeinheit zu erhalten, wurden die I-Units eingeführt. Die I-Units sind ein Ebenheitsindex und werden wie folgt definiert [66]:

$$I_E = \frac{\Delta L_E}{L} \cdot 10^5 = \left(\frac{c_1}{h_1} - \frac{c_2}{h_2} \right) \cdot 10^5 \quad (85)$$

I_E	Einheitsindex, I-Unit
ΔL_E	Differenz längste/kürzeste Faser über der Bandbreite
L	Länge der Referenzbandfasern
c_1, c_2	Bandkrümmung vor/nach dem Walzvorgang
h_1, h_2	Banddicke vor/nach dem Walzvorgang

Eine I-Unit steht dabei für eine Faserverlängerung von $10 \mu\text{m}$ pro 1 m Band, wobei die Unplanheit nach dem Kaltwalzen 10 I-Units nicht überschreiten sollte. Das Verhältnis $\Delta L/L$ wird auch als relative Dehnung bezeichnet, deren Verteilung über die Bandbreite ein Maß für die Planheit des Bandes darstellt (siehe Abb. 35).

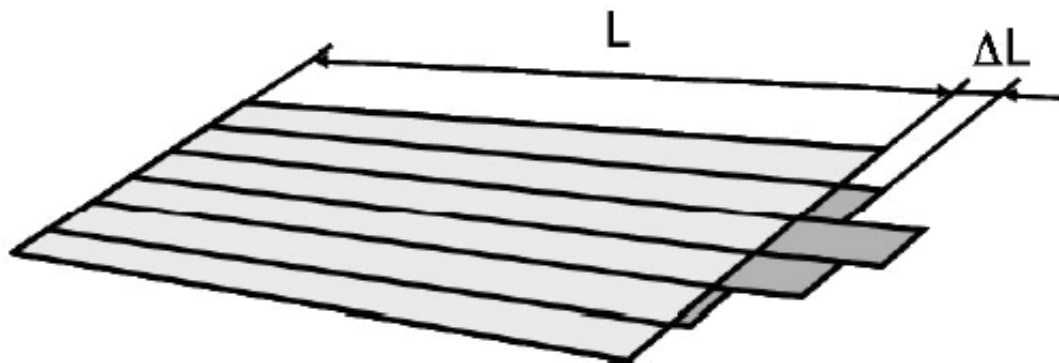


Abbildung 35: Relative Dehnung $\Delta L/L$ über die Bandbreite [67].

Im Folgenden werden nun die Formabweichungen näher beschrieben und definiert.

4.2.1 Formabweichungen

4.2.1.1 Ursachen für Formabweichungen

Formabweichungen können beim Walzen im Walzspalt, beim Umlenken oder Aufwickeln aber auch beim Akühlen vom Band entstehen. Im Walzspalt werden Unplanheiten erzeugt, wenn es nicht gelingt, mit Hilfe mechanischer oder thermischer Stellglieder den Walzspalt an das Dickenprofil des einlaufenden Bandes anzupassen. Beim Walzen können Längsbögen dann auftreten, wenn das Band unsymmetrisch über die Banddicke verformt wird. Im Gegensatz zu den welligen Unplanheiten mit krummliniger Begrenzung lassen sich Längsbögen im Kaltwalzprozess aufgrund der hohen Zugspannungen bisher messtechnisch nicht erfassen [71].

4.2.1.2 Formabweichungen von der Ebenheit

Welligkeit

Die häufigste Formabweichung beim Kaltwalzen ist die Welligkeit. Sie kann mit messbaren Parametern, wie der Wellenhöhe und der Wellenlänge, beschrieben werden. Die Wellenhöhe beschreibt dabei den größten Abstand der Bandunterkante von einer ebenen Unterlage. Die Wellenlänge ist jene Länge auf der das Band von der Unterlage aufhebt [67].

Die Welligkeiten können in unterschiedlichen Formen auftreten. Der erste Welligkeitstyp ist durch gleichmäßige in Walzrichtung ausgerichtete Wellen gekennzeichnet [66]. Diese entstehen, wenn in Längsrichtung über die Banddicke unterschiedliche plastische Stauungen und Streckungen stattfinden. Dadurch werden an der Ober- und Unterseite des Bandes unterschiedliche Längseigenstressungen hervorgerufen. Diese sind über die Bandbreite annähernd konstant. Werden die Bleche mit diesen Ebenheitsdefekten der Länge

nach zerteilt, dann zeigt sich, dass alle Bandstreifen die gleiche Länge haben. Diese Formabweichung lässt sich durch einen einfachen Biegevorgang beseitigen. Man spricht daher von einer abwickelbaren Welligkeit [67].

Ein anderer Typ der Welligkeit wird durch unterschiedlich starke plastische Streckung des Bandes über die Bandbreite verursacht. Hierbei ist die jeweilige plastische Dehnung der Bandlängsfasern über der Banddicke konstant [67]. Die dadurch erzeugten Eigenspannungsdifferenzen in Längs- und Querrichtung führen ab Erreichen der kritischen Beulspannung des Bandes zu lokalen, dauerhaften Bandausbeulungen, die unterschiedliche Formen annehmen können [66].

Die Größe der kritischen Beulspannung σ_k ist vom Elastizitätsmodul E , der Querkontraktionszahl ν , von der Bandbreite b und der Banddicke h sowie dem Verhältnis aus Bandlänge zu Bandbreite α abhängig [67].

$$\sigma_k = k \cdot \sigma_e \quad (86)$$

$$\sigma_e = \underbrace{\frac{Eh^3}{12 \cdot (1 - \nu^2)}}_{\text{Biegesteifigkeit}N} \cdot \frac{\pi^2}{b^2h} = N \cdot \frac{\pi^2}{b^2h} \quad (87)$$

$$k = \left(1 - \frac{\nu^2\alpha}{1 + \alpha}\right) \cdot \frac{1}{\alpha^2} \quad (88)$$

Buchholtz [72] zeigte in seinen Untersuchungen folgende Zusammenhänge über kritische Beulwerte auf die Bildung von Rand- und Mittelwellen:

- Mittenwellen entstehen bei etwas niedrigeren Beulwerten als Randwellen.
- Die Größe des Beulwertes ist mehr von der Größe des mit Druckspannung beaufschlagten Bandbereiches als von der Größe der Spannung selbst abhängig.
- Der Beulwert wird umso größer, je verwickelter die Eigenspannungsverteilung ist.

Dazu sei auf die Arbeit von Fischer [73] et al. verwiesen, die sehr gut die unterschiedlichen Phänomäne des Beulens im Zusammenhang mit Walzen und Richten beschreibt. Dabei werden sowohl analytische, als auch numerische Lösungen verglichen.

In Abbildung 36 ist eine krummlinig begrenzte Welligkeit schematisch dargestellt.



Abbildung 36: Krummlinig begrenzte Welligkeit [71].

Welligkeiten, die sich durch krummlinig Begrenzungen beschreiben lassen, kann man unter dem Begriff der nicht abwickelbaren Welligkeit zusammenfassen. Es ist daher nicht möglich, diesen Fehler durch einen einfachen Biegevorgang auszustrecken. Eine Beseitigung ist nur durch unterschiedliche örtliche plastische Streckungen über der Bandbreite möglich. Dabei muss die kürzeste Faser mindestens auf die Länge der ursprünglich längsten Faser plastisch gedehnt werden [67].

Die nicht abwickelbaren Planheitsdefekte lassen sich in die folgenden Kategorien unterteilen [67]:

- Lange Mitte
- Mittenwellen
- Lange Bandkante
- Randwellen
- Örtliche Wellenbahn
- Seitenwellen
- Heringsmuster

In Abbildung 37 sind die genannten Planheitsdefekte und die jeweilige Längenverteilung der Bandfasern über die Bandbreite dargestellt.

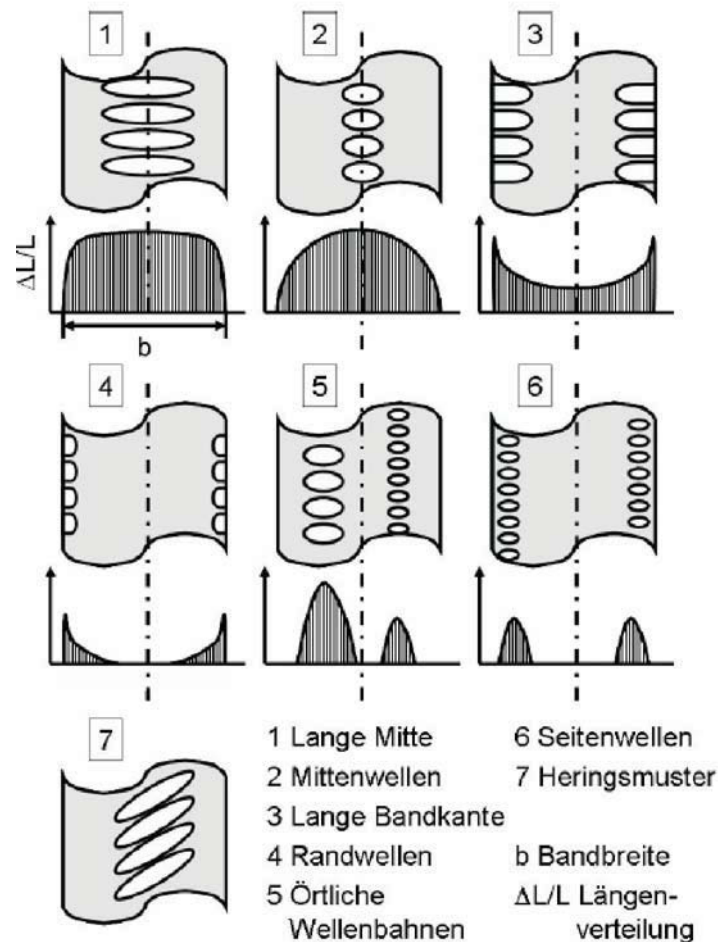


Abbildung 37: Welligkeitsfehler und Längenverteilung $\Delta L/L$ [66].

Bogigkeit

Bei der Formabweichung der Bogigkeit gibt es folgende unterschiedliche Erscheinungsformen [71]:

- Längsbogen,
- Querbogen und
- Verdrallung.

Diese Defekte entstehen durch über die Banddicke unterschiedliche plastische Streckungen in Bandlängsrichtung z.B. durch eine Biegebeanspruchung beim Umlenken des Bandes oder durch stark unterschiedliche Rauigkeiten von Ober- und Unterwalze [66].

Die Längs- und die Querwölbung zählen zu den symmetrischen Beulformen. Längsbogen, Querbogen und Verdrallung lassen sich durch plastische Biegung ohne überlagerten Zug beseitigen. Deshalb zählt man sie auch zu den abwickelbaren Fehlertypen.

Nicht planparalleles Banddickenprofil

Neben der Welligkeit und Bogigkeit gibt es Abweichungen im Banddickenprofil. In Abbildung 38 sind die möglichen Dickenprofile dargestellt.

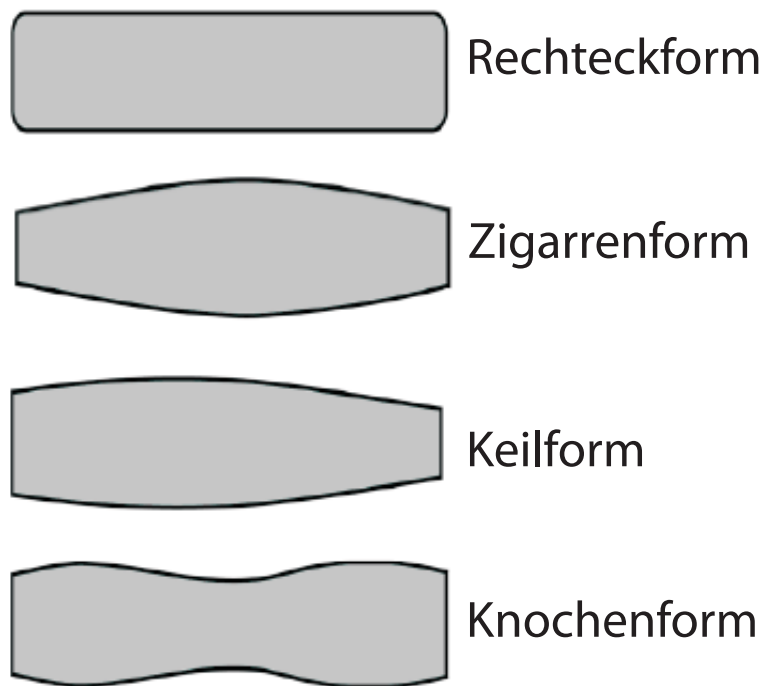


Abbildung 38: Unterschiedliche Dickenprofile [71].

Beim Warmwalzen wird dabei auf die Ausbildung einer Zigarrenform geschaut, um das Banddickenprofil der beim Kaltwalzen konvexen Walzspaltform anzupassen.

Es können bereits kleinste Veränderungen des in den Walzspalt einlaufenden Banddickenprofils zu großen Bandwelligkeiten oder einem Bandsäbel (siehe Kapitel 4.2.1.3) führen [67].

Bemühungen zur Verbesserung der Profilform durch weitere Nachbearbeitung führen meist zu einer Verschlechterung der Bandplanheit [66].

4.2.1.3 Formabweichungen von der Geradheit

Die Formabweichung von der Geradheit wird als Bandsäbel bezeichnet (siehe Abb. 39). Dieser Fehlertyp zählt zu den nicht abwickelbaren Planheitsfehlern. Es handelt sich dabei um eine bogenförmige Abweichung der Bandkanten von ihrer ideal geraden Form in Bandlängsrichtung aufgrund einer über die Bandbreite gleichmäßigen Dehnungszunahme.

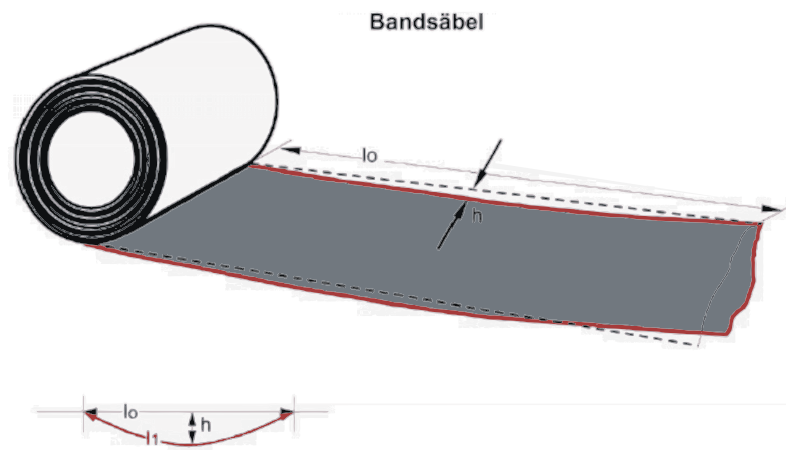


Abbildung 39: Bandsäbel [71].

4.2.2 Planheitsmesssysteme

Infolge der Vielzahl der möglichen Planheitsfehler und der daraus resultierenden negativen Auswirkungen auf die nachgeschalteten Prozesse lässt sich schließen, dass der Erfassung der Bandplanheit eine hohe technische und wirtschaftliche Bedeutung zukommt [66].

Wird ein Band oder Blech beim Umformen in Warm- oder Kaltwalzanlagen unter Längszug gesetzt, wobei auch die längste Faser entlang der Walzrichtung elastisch gestreckt wird, dann können die nicht abwickelbaren Formabweichungen durch Messung der Zugspannungsverteilung über die Bandbreite analysiert werden. Hierbei kann man sich den Effekt zunutze machen, dass die verschiedenen gestreckten Bandfasern unter Zug Spannungen annehmen, die sich nach dem Hook'schen Gesetz proportional zu den Dehnungen verhalten [67].

Somit ermöglicht die Messung der lokalen Verteilung des Bandzuges eine Aussage über die im Band vorhandenen nicht abwickelbaren Formabweichungen [67].

Die abwickelbaren Formabweichungen hingegen lassen sich durch eine Zugspannungsverteilung nicht erfassen. Sie können im zuglosen Zustand mit Abstandsmesssystemen deklariert werden [67].

Folgende Möglichkeiten zur Messung der Bandplanheit sind derzeit im Einsatz:

Messrollen

Das bekannteste und das am weitest verbreitete System zur Messung der Bandplanheit sind die sogenannten Stressometer [74] Planheitsrollen. Diese Messrollen werden dabei als Bandumlenkrollen verwendet. Dabei werden durch ein über die Messrolle umgelenktes, unter Zug stehendes Stahlband auf der planen Rollenoberfläche im Auflagebereich des Bandes Reaktionskräfte ausgelöst, die den lokalen Bandzugspannungen proportional sind und die mit Hilfe von in der Messrolle eingebauten Kraftaufnehmern gemessen werden [66].

Aus den über die Bandbreite aufgenommenen Reaktions- bzw. Radialkräften lassen sich die örtlichen Zugspannungen im Band berechnen, die nach dem Hook'schen Gesetz proportional zur Verteilung der relativen Dehnung $\Delta L/L$ über die Bandbreite sind und somit ein direktes Maß für die Planheit des Bandes darstellen:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta \sigma}{E} = \Delta \epsilon \quad (89)$$

Nach diesem Prinzip arbeiten alle Stressometer Planheitsmessrollen. Die Planheitsmessung beschränkt sich allerdings auf die Messung nicht abwickelbarer Formabweichungen.

Nach dem Prinzip der Umlenkmessrolle arbeitet auch die bekannte BFI-Planheitsmessrolle. Die Messrolle misst Unterschiede in den Bandlängsspannungen, die sich aufgrund von unterschiedlich gelenkten Bandfasern ergeben. Sie wird eingesetzt zur Regelung der Bandplanheit und zur Sicherung der Prozeßstabilität. Zur Aufnahme der Kraftsensoren werden stirnseitig in den Rollenkörper achsparallele Bohrungen eingebracht, in denen die Kraftsensoren unter hoher Vorspannung nahe der Rollenoberfläche eingespannt werden. Die robusten und hochbelastbaren Quarzkraftsensoren und die berührungslose Signalübertragung mittels Licht machen dieses System betriebssicher und nahezu wartungsfrei. In Abbildung 40 ist eine Planheitsmessrolle Typ A abgebildet [75].



Abbildung 40: Planheitsmessrolle von BFI - Typ A [75].

Zur Ermittlung der Unplanheiten im Band und zur Steuerung der Bandrichtanlage werden, wie eben beschrieben, mit Sensoren versehene Messrollen verwendet, bei denen das unter Längszug stehende Band über den Rollenkörper geführt und dabei die Zugspannungsverteilung über der Breite im Band gemessen wird. Im Gegensatz zu den bisher

ausgeführten Planheitsmesssystemen in Form von separaten Messrollen, die in die Prozesslinie installiert werden, bietet sich für die Planheitsmessung in Streckbiegerichtanlagen eine Lösung ohne zusätzliche separate Messrolle an (siehe Abb. 41) [76].

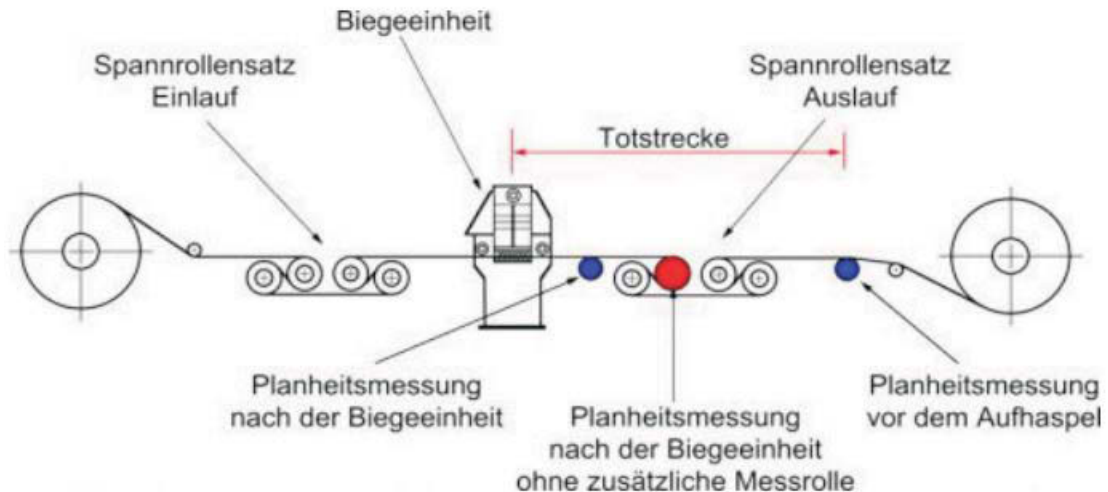


Abbildung 41: Neue Planheitsmesstechnik beim Streckbiegerichten von Bändern [76].

Auf der Basis der BFI-Planheitsmessrolle wurde ein Messsystem entwickelt, bei dem die bisher verwendete Messsensorik in einer am Streckbiegerichtprozess beteiligten Zugrolle eingebaut wurde. Die „Mess-Zugrolle“ ist der Biegeeinheit unmittelbar nachgeschaltet, wodurch sich folgende Vorteile ergeben:

- Minimierung der Totzeit zwischen Richtwerk und Messung (Planheitsmessung unmittelbar hinter der Biegeeinheit)
- Ausnutzung eines großen Rollendurchmessers (keine Einleitung von Bandformfehlern wie Längs- und Querbogen)
- Vermeidung von Fehlmessungen durch geometriebedingte Störspannungen beim konventionellen Einsatz einer Messrolle vor dem Bandaufwickler (z.B. bei Spaltband durch Ausbildung einer ungleichförmigen Wickelgeometrie)
- Keine zusätzliche Messrolle

Berührungslose Messsysteme

Als erste Gruppe der berührungslosen Messsystemen werden die optischen Systeme erwähnt. Dabei kann durch die Phasenverschiebung von Lichtwellen der Höhenunterschied auf dem Band gemessen werden. Von einer Lichtquelle aus wird das nötige Licht teils linienförmig entlang der Walzrichtung auf die Bandoberfläche projiziert und die Reflektion mittels einer oder mehrerer CCD-Kameras aufgenommen.

Als Stellvertreter kann hier das topometrische Mess- und Auswertesystem TopPlan® [77] angeführt werden. In Abbildung 42 ist eine Prinzipskizze des System dargestellt.

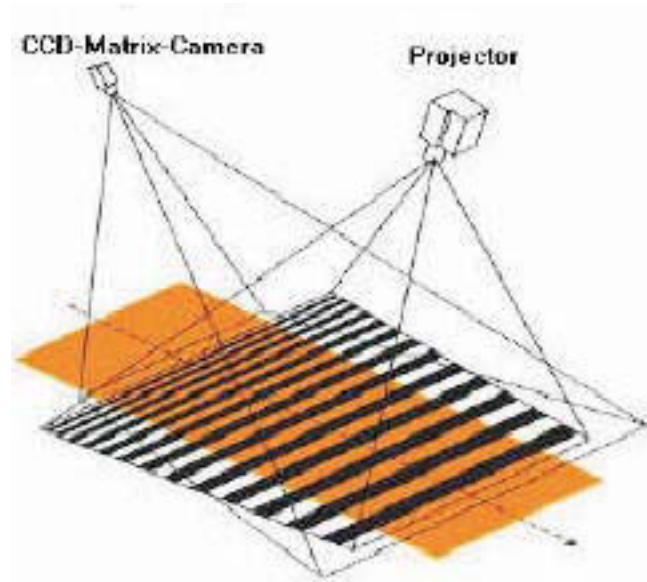


Abbildung 42: Prinzipskizze des Messsystems TopPlan [77].

Hierbei wird nach jeder Kameraaufnahme eines projizierten Streifenbildes, ein Höhenbild des gesamten Messbereichs zur Verfügung gestellt, aus dem die folgenden Kennwerte ermittelt werden können [77]:

- Planheit in Form einer Längsverteilung,
- Skibildung und Form der Enden an Kopf und Fuß des Bandes oder Blechs,
- Breite des Bandes oder Blechs und
- die Querwölbung und Schiefelage.

Neben den optischen Systemen gehören auch noch die radiometrischen Messsysteme erläutert. Sie sind den optischen Systemen ähnlich, wobei hier die Strahlungsintensitäten elektromagnetischer Strahlen gemessen werden. Die Radiometrie misst dabei die Bereiche ultravioletter und infraroter Strahlung als auch der γ -Strahlung [66].

Die radiometrischen Verfahren werden vorzugsweise zur Messung der Banddicke eingesetzt.

Geometrische Planheitsmessung

Die genaueste Möglichkeit Planheitsfehler zu detektieren, besteht darin, das Band nach Ende aller Walzvorgänge im zuglosen und ausgerollten Zustand geometrisch zu vermessen. Es wirken hier keine (außer der Gravitation) störenden Kräfte auf das Band [66].

Die Messung ist allerdings in einer industriellen Produktion nicht umsetzbar und unpraktikabel, da die Messung zeitintensiv ist, und die erhaltenen Daten nicht online in den Walzprozess implementiert werden können [66].

Die geometrische Planheitsmessung eignet sich daher nur zur Verifizierung der vorab beschriebenen Messsysteme und zur abschließenden Qualitätskontrolle [69].

Ein neuartiges Verfahren zur Bestimmung der Bandplanheit ist das von Siemens AG München entwickelte Planheitsmesssystem „SI-Flat“. Ausgangspunkt der SI-Flat-Planheitsmessung ist dabei eine periodische mechanische Erregung des Bandes. Diese wird durch einen periodisch schwankenden Unterdruck zwischen Band und der Sensorplatte, die knapp unter der Passlinie des Gerüsts liegt, erzeugt. Wird der Unterdruck moduliert, erreicht man eine periodische Auslenkung des Bandes (siehe Abb. 43) [78].

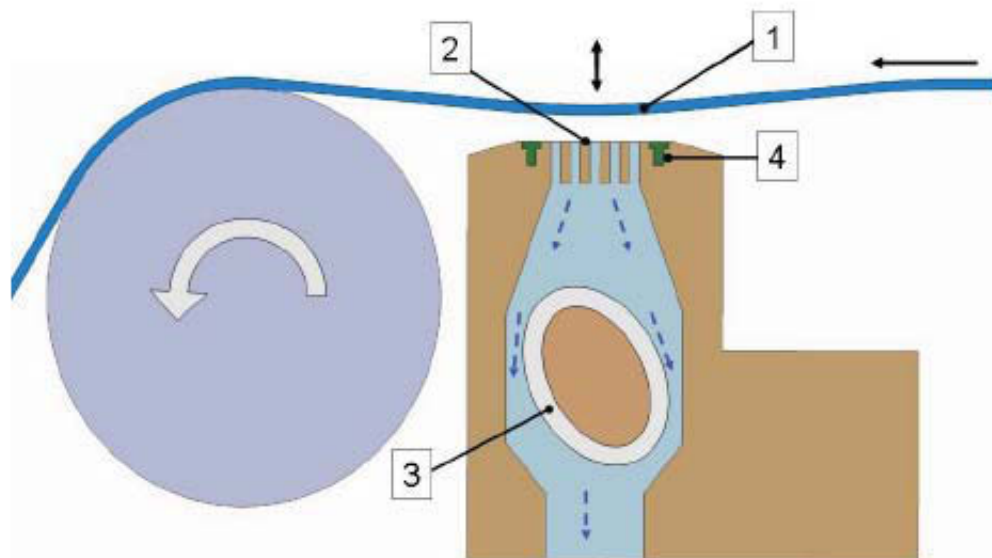


Abbildung 43: SI-Flat, schematische Darstellung [66].(1) Band, (2) Sensorplatte, (3) Modulator, (4) Wirbelstromsensoren.

Die Modulationsfrequenz wird so gewählt, dass sie unterhalb der Eigenfrequenz des Bandes unter Zug liegt und im Mittel über die Bandbreite eine konstante Amplitude von ca. 0,15 mm hat. Wirbelstromsensoren messen die lokalen Auslenkungsamplituden über die gesamte Breite des Bandes. Diese liefern ein Maß für die Zugspannungsverteilung. Eine nahe am Prozess befindliche Auswertelektronik wandelt die Rohwerte in digitale Signale um und führt sie dem Rechner im Schalthaus zu, der daraus die Planheitswerte ermittelt.

Die berechneten Daten werden über ein Visualisierungssystem angezeigt und stehen für die weitere Bearbeitung zur Verfügung [78].

4.2.3 Einflussfaktoren auf die Planheit

Um ein planes Band zu erhalten, wird die Geometrie des Walzspalts durch Beeinflussung der Walzenbiegeline bzw. der Walzenbombierung verändert. In Abbildung 44 sind die Methoden zur Walzspaltform und zur Planheitsregelung dargestellt.

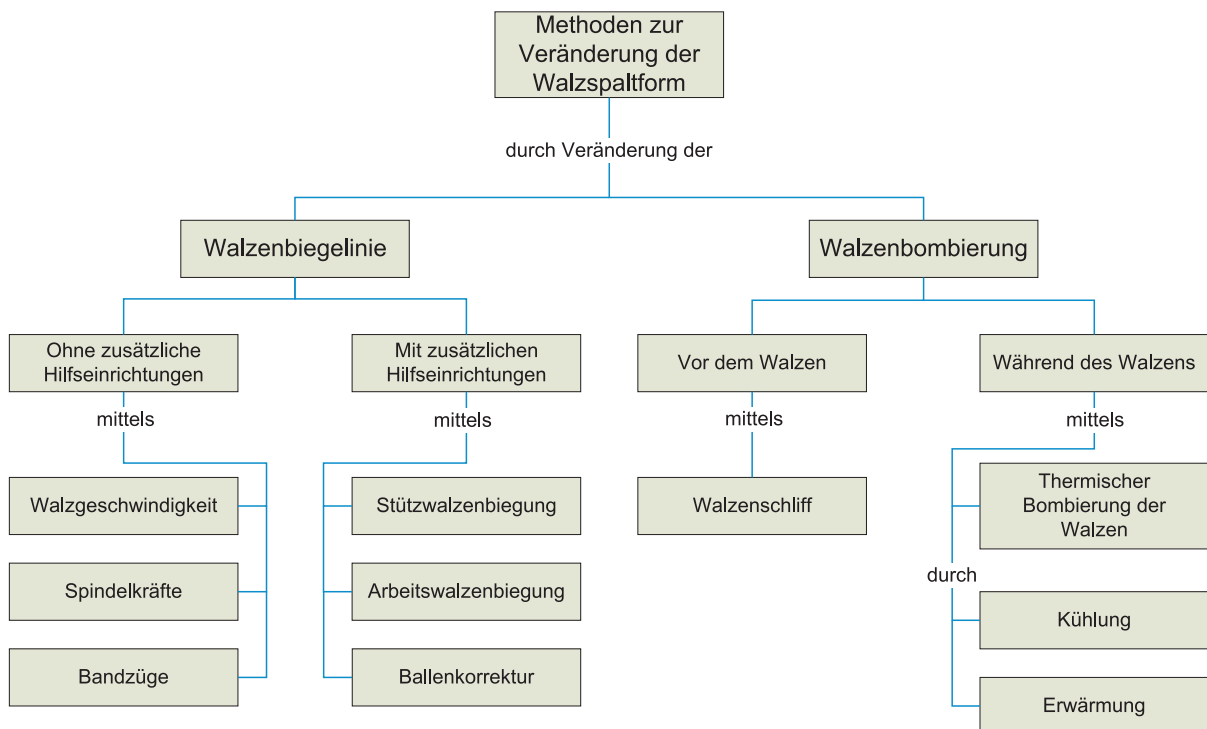


Abbildung 44: Möglichkeiten zur Beeinflussung der Walzspaltform [58].

Planheitssteuerungssysteme basieren meistens auf der variablen Einstellung des Walzspaltes, weil die Planheitsfehler meist auf Walzspaltfehler zurückzuführen sind. In der Praxis wird meistens das Biegen und Schwenken der Arbeitswalzen dazu verwendet, die Walzspaltform zu verändern [66].

Während das Schwenken der oberen Arbeits- und Stützwalzen zur Unterbindung von keilförmigen Banddickeprofilen genutzt wird, dient die Biegung der Arbeitswalzen in erster Linie zur Behebung von Welligkeitsdefekten. Hierbei ist es Stand der Technik, daß die Arbeitswalzen sowohl in positive, als auch in negative Richtung zur Bandnormalen gebogen werden können, wodurch diese Stellgröße als primäres Steuerinstrument zur Behebung eines Großteils der auftretenden Planheitsfehler fungiert.

Die Walzenbiegung erfolgt dabei über eine auf die Walzenzapfen wirkende hydraulische Krafteinleitung, die in modernen Walzgerüsten häufig durch die mittlerweile weit verbreitete CVC (Continuous Variable Crown) oder UC (Universal Crown-control) Walztechnik ergänzt wird [66].

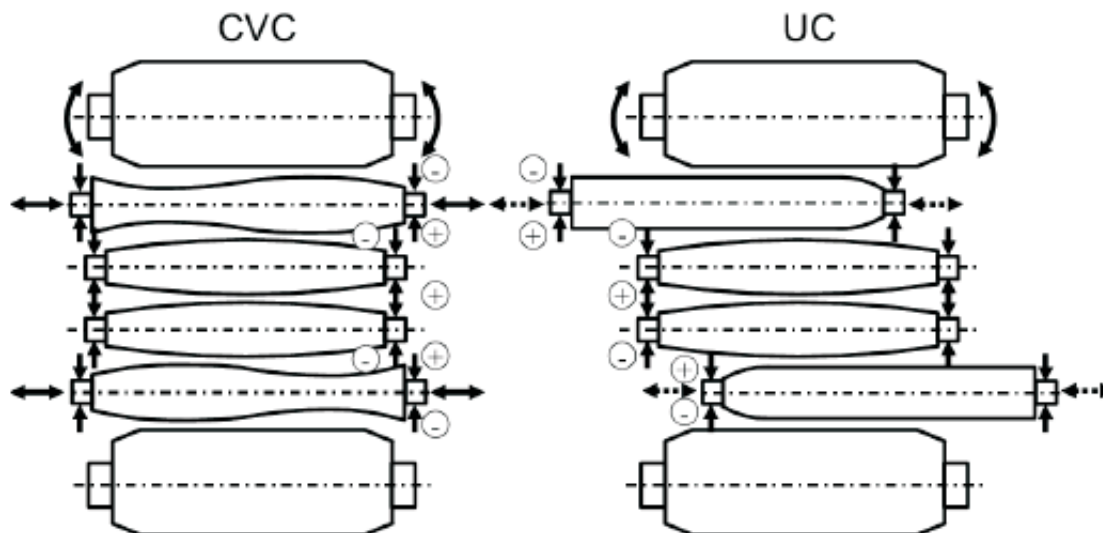


Abbildung 45: CVC- und UC-Walzgerüst, schematische Darstellung [66].

Der Hauptunterschied zwischen den beiden in Abb. 45 schematisch dargestellten Systemen sind die Zwischenwalzen. Während diese beim CVC-Walzensystem ein S-förmiges Profil aufweisen, sind sie beim UC-Walzensystem zylindrisch geformt, mit an einem Ende abgeschliffenen Kanten.

Die Veränderung der Kontaktfläche zwischen Arbeits- und Zwischenwalze durch deren Horizontalverschiebung in Verbindung mit der Verjüngung der Zwischenwalzenenden bietet die Möglichkeit, die Durchbiegung der Arbeitswalzen zu erhöhen oder zu senken.

Die Verschiebung der Zwischenwalzen ist sowohl beim CVC- als auch beim UC-Walzensystem üblich, nimmt jedoch einen höheren Stellenwert beim CVC-Walzen ein. Da das Biegen der Arbeitswalzen schneller auf die Walzspaltform einwirkt als die Verschiebung der Zwischenwalzen, wird diese bei beiden Systemen nur zur Unterstützung der Arbeitswalzenbiegung eingesetzt.

Mit Hilfe der Biegung der Arbeitswalzen kann dabei hauptsächlich die Welligkeit des Bandes beeinflusst werden. Dabei können die Walzen sowohl in positive als auch in negative Richtung zur Bandnormalen gebogen werden.

Dies kann sowohl kraft- bzw. weggesteuert erfolgen, als auch thermisch. Dabei werden die Walzen durch gezielte Ausdehnung unterschiedlich gebogen. Der Nachteil der thermischen Bombierung liegt in der Trägheit. Damit können erkannte Planheitsfehler nicht unmittelbar behoben werden.

Die häufigste Form der Walzenbombierung ist die mechanische Bearbeitung der Walzenoberfläche mit Hilfe des Walzenschliffs. Diese Bombierung kann allerdings für die Dauer des Walzeinsatzes nicht mehr verändert werden und wird daher für bestimmte Walzlose festgelegt.

Eine weitere, wesentlich schnellere Methode zur Veränderung der Bombierung ergibt sich durch die horizontale Verschränkung der Arbeitswalzen oder die Axialverschiebung vorbombierter Arbeitswalzen.

Die Möglichkeiten zur Steuerung der Planheit sind in Abbildung 46 dargestellt.

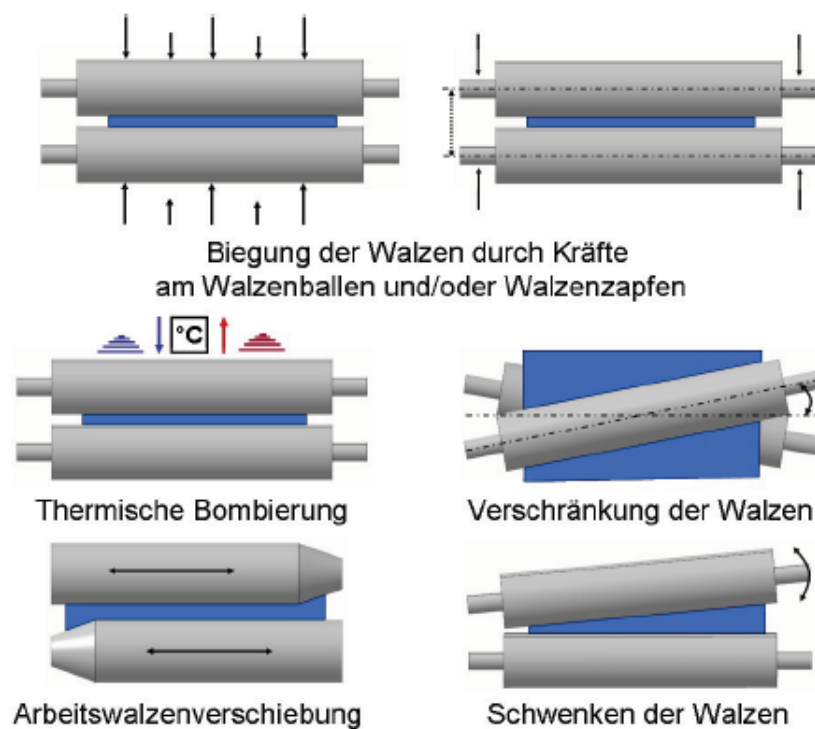


Abbildung 46: Steuermöglichkeiten der Planheit [79].

Hauptzweck der Walzenbombierungsverfahren ist die Egalisierung der konvexen Walzspaltform aufgrund der Walzen- und Gerüstaufbiegung infolge des zur Walgerüstmitte ansteigenden Biegemoments.

Die Bandplanheit hat einen wesentlichen Einfluss auf die nachfolgenden Verarbeitungsschritte und nachfolgenden Produkte und stellt somit einen wichtigen Faktor der Wirtschaftlichkeit der gesamten Produktionskette dar.

4.3 Bewertung der Unplanheiten und der Maßabweichungen

Beim Kaltwalzprozess sind Bandunplanheiten, welche auf Längenunterschiede über der Bandbreite beruhen sowohl messbar als auch im Rahmen der Stellmöglichkeiten der jeweiligen Walzgerüste beeinflussbar. Die Tatsache, dass nach dem Walzen, je nach Festigkeit des Bandes, die Planheit durch Umlenken oder durch Auf- und Abwickeln wieder verändert werden kann, bedeutet nicht, dass deswegen eine Planheitsmessung und -regelung überflüssig ist. Neben der einzustellenden Bandplanheit liegt nämlich der Hauptvorteil einer solchen Regelung in der wesentlich erhöhten Prozesssicherheit durch Vermeidung von Überwalzungen und Bandrissen, wodurch der Walzprozess durch höheres Ausbringen und erhöhten Durchsatz wesentlich kostengünstiger gestaltet werden kann [71].

Die Bogigkeitsfehler im Band lassen sich beim Kaltwalzen jedoch nicht messen, da mit relativ hohen Längszugspannungen gearbeitet wird. Wenn der Bandbehandlungsprozess es erfordert, müssen im Anschluss an den Walzprozess, durch andere Methoden wie Streckbiegerichten oder Formschlussbiegen beseitigt werden oder in ein zulässiges geometrisches Prozessfenster gebracht werden. Hierbei hat das Formschlussbiegen deutliche Kostenvorteile [71].

Teil II

Praktische Untersuchungen

5 Verwendung von Aramis[®] zur Messung von Eigenspannungen

Das optische Messsystem Aramis[®] ist, wie in Kapitel 3.7 beschrieben, in der Lage Verschiebungen und Verformungen am Messobjekt zu bestimmen. Sind in einem Bauteil Eigenspannungen vorhanden und werden diese durch das Zerlegeverfahren freigelegt, so kommt es zur Relaxation des unter Spannung stehenden Materials, wodurch es möglich sein sollte, mit Aramis[®] diese Dehnungen zu messen. Die Vorteile von Aramis[®] liegen in der Schnelligkeit der Messung und in der Möglichkeit die Dehnungen flächig aufzunehmen und auszuwerten.

Um einen ersten Anhaltspunkt dafür zu bekommen, ob es möglich ist, Eigenspannungen mit Aramis[®] zu messen, wurde ein einachsiger Zugversuch durchgeführt.

Dazu wurde ein Blechstreifen in die Universalprüfmaschine Z250 von Zwick eingespannt. Anschließend wurden definierte Dehnungen an der Maschine eingestellt und für jede Dehnung ein Bild mit Aramis[®] aufgenommen.

Parallel wurde der Blechstreifen mit einer DMS versehen, um Vergleichswerte zu generieren und anschließend den Ergebnissen der Berechnung von Aramis[®] gegenüberzustellen. In Abbildung 47 ist der verwendete Blechstreifen mit der aufgeklebten DMS dargestellt.

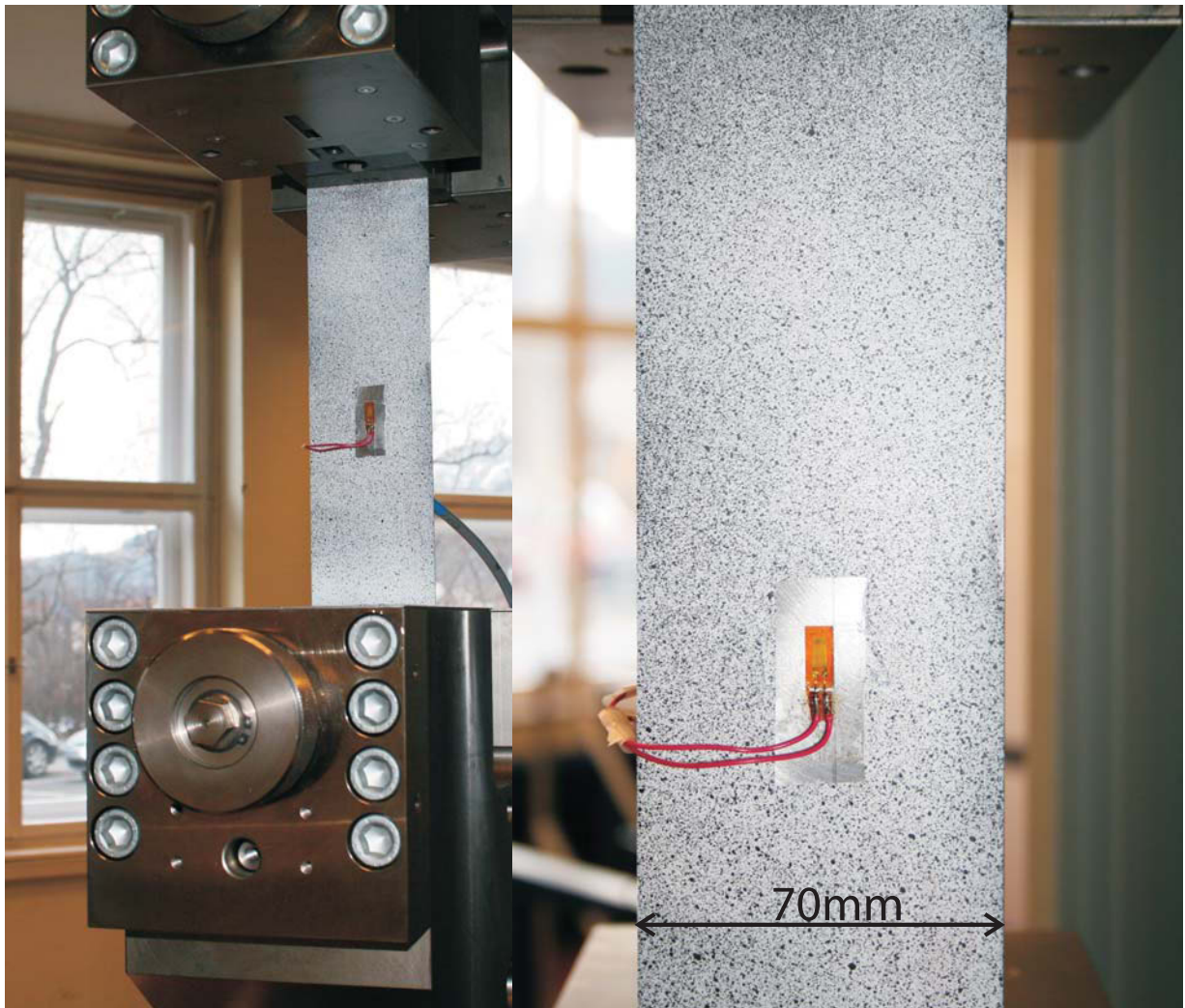


Abbildung 47: Blechstreifen zur Vergleichsmessung mit Aramis® in Zwick eingespannt. Mit dem typischen stochastischen Muster für Aramis® und mit einer DMS zur Vergleichsmessung.

Insgesamt wurde die Probe in 9 Stufen gezogen (siehe Tabelle 3). Bei der Auswertung wurde ein einachsiger Spannungszustand angenommen und dieser mit Hilfe des eindimensionalen Hooke'schen Gesetzes berechnet ($\sigma = E\epsilon$).

Die Auswertung der durchgeführten Versuche ergab, die in Abbildung 48 dargestellten Kurven.

Stufe	Gesamtdehnung [mm]	Globale Dehnung [%]
1	0,1	0,042
2	0,2	0,083
3	0,3	0,125
4	0,6	0,250
5	0,9	0,375
6	1,2	0,500
7	1,5	0,625
8	1,8	0,750
9	2,1	0,875

Tabelle 3: Aufgebrachte Dehnungen beim Kalibrieren von Aramis[®]

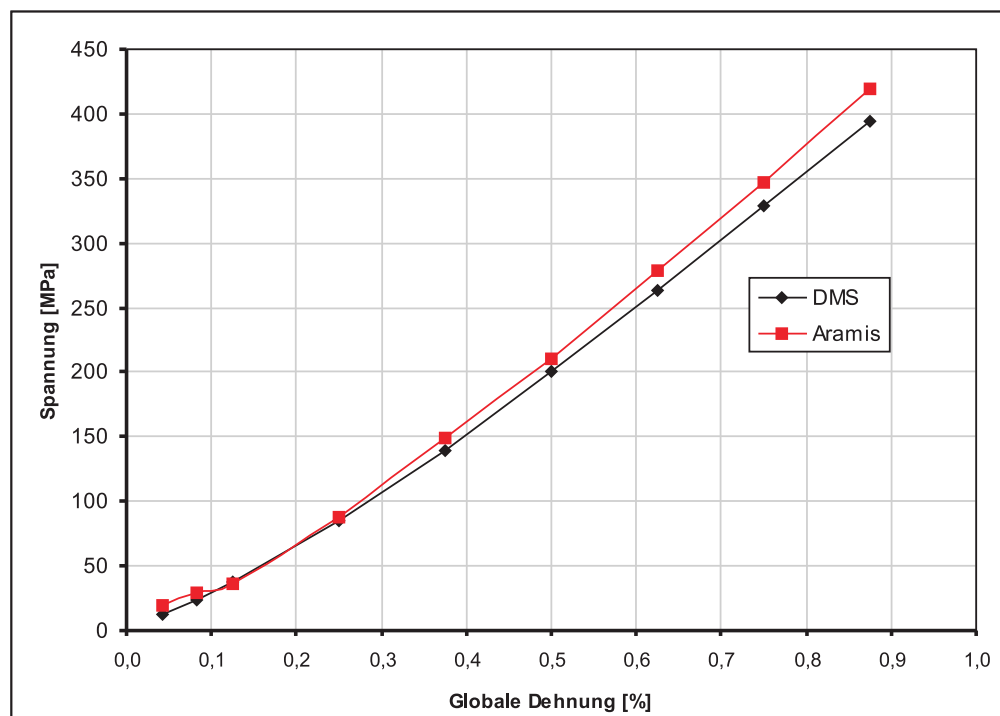


Abbildung 48: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die Vergleichsmessung von DMS mit Aramis[®].

Die rote Kurve stellt dabei die mit Aramis[®] berechneten Spannungen dar, die schwarze Kurve steht für die mit DMS ermittelten Spannungswerte, auf der x-Achse ist die aufgebrachte globale Dehnung eingezeichnet.

Der Vergleich der beiden Spannungs-Dehnungskurven zeigt, dass sowohl im unteren, als auch im oberen Dehnungsbereich eine gute Übereinstimmung der berechneten Spannungswerte gegeben ist. Das Aramis[®] System 5M, das für die Untersuchungen in dieser Arbeit

verwendet wurde, weist eine Dehnungsmessgenauigkeit von 0,01% auf. Die Dehnungen, die unter dieser Grenze liegen, können also nicht mehr aufgelöst werden.

Daraus lässt sich ableiten, dass Aramis[®] sich grundsätzlich dazu eignet Dehnungen zu messen. Die gute Übereinstimmung der beiden Kurven resultiert auch darin, dass es sich um einen einachsigen Spannungszustand handelt. Allerdings liegen in den meisten Bauteilen zwei- bzw. dreiachsige Spannungszustände vor, die in der Berechnung wesentlich komplexer sind (siehe Kapitel 2.3). Daher kann aus diesen Ergebnissen noch keine generalisierte Aussage über die Anwendbarkeit von Aramis[®] getroffen werden.

6 Untersuchungen an kaltgewalzten Bändern

6.1 Herstellung der kaltgewalzten Bänder

Als Ausgangsmaterial für die Herstellung von kaltgewalztem Band, wird ein Warmband mit einer Dicke von 2mm verwendet. Danach erfolgt eine Verringerung der Banddicke in zwei Walzstichen mit jeweils einer Zwischenglühung. Nach dem letzten Glühvorgang wird das Band schließlich, in die für die Weiterverarbeitung notwendige Breite, geschnitten. Der Herstellungsprozess ist in Abbildung 49 dargestellt.

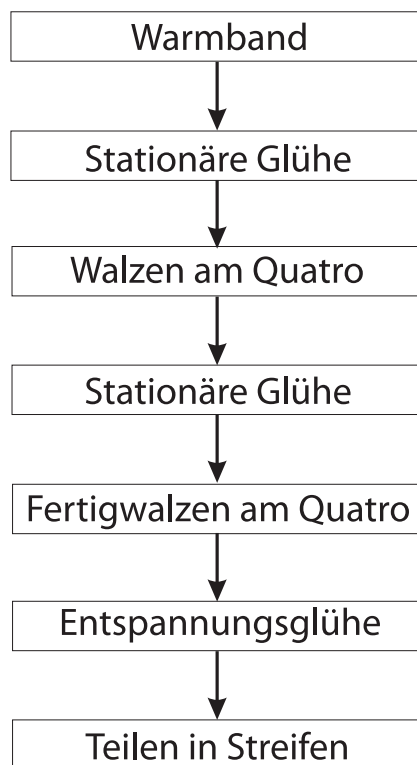


Abbildung 49: Produktionsstufen vom Warm- zum Kaltband.

Bei den untersuchten Bändern handelt es sich um einen unlegierten Stahl der Sorte Ck45. Die chemische Zusammensetzung laut Norm ist in Tabelle 4 aufgelistet.

C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]
0,45	0,25	0,65	0,030

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung des Stahls Ck45.

Die mechanischen Kennwerte sind in Tabelle 5 angeführt.

Streckgrenze $R_{p0,2}[N/mm^2]$	Zugfestigkeit $R_m[N/mm^2]$	Bruchdehnung A_5 [%]	Brucheinschnürung Z [%]
490	700-850	min. 14	min. 35

Tabelle 5: Mechanische Richtwerte des Stahls Ck45 im vergüteten Zustand.

6.2 Angewandte Messverfahren

Bei der Auswahl der geeigneten Messmethode ist es von Vorteil, bereits etwas über die Art der Eigenspannungen, die in dem zu untersuchenden Bauteil vorherrschen, zu wissen.

Also die Frage, die sich zu Beginn stellt, lautet: Welche Art von Eigenspannungen möchte ich messen und reicht die Auflösung meiner Messmethode dafür aus?

Betrachtet man den Herstellungsprozess des Kaltbandes, so zeigt sich, dass sowohl durch thermische Einflüsse beim Glühen, als auch durch das Kaltwalzen selbst, ein Eigenspannungseintrag zu erwarten ist.

Aufgrund der Größe der Bänder (ca.1000x400mm) leitet sich als Messmethode das Bohrlochverfahren ab. Bei Verwendung des Röntgenverfahrens müsste das Band zuerst zerlegt werden, da die Probengröße beim Röntgenverfahren beschränkt ist. Dies würde aber bereits einen Eingriff in den Eigenspannungszustand darstellen und daher die Ergebnisse verfälschen.

Beim Bohrlochverfahren ist zwar nur eine punktuelle Messung möglich, aber es kann jedes Band in jeder Produktionsstufe an mehreren Stellen gemessen werden und so ein Mittelwert ermittelt werden.

Ein neuer Ansatz, der in dieser Arbeit vorgestellt wird, ist die optische Messung im Zusammenhang mit dem Zerlegeverfahren. Der Grundgedanke dahinter ist, die durch das Freischneiden der Eigenspannungen entstandene Relaxation des Materials, optisch zu messen und aufgrund dieser Dehnungen auf einen ursprünglich vorherrschenden Spannungszustand zurückzurechnen.

Dabei bot sich das optische Messsystem Aramis[®], das in Kapitel 3.7 ausführlich beschrieben wird, an. Dieses System ermöglicht es nämlich, Dehnungsrelaxationen an der Materialoberfläche zu messen.



Abbildung 51: Unterschiedliche Schneidformen für die Schneidlinien.

Eine genaue Beschreibung der Schneidformen und deren Einsatzgebiet ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Schneidenform	Beschreibung	Anwendung
CF	Doppelseitige Fase	Standardschneide für sämtliche Zwecke
SF	Einseitige Fase	zum Ausschneiden von engen Konturen, z.B. Dichtungen, Displays
CFDB	Vierer- oder Facettenschliff	zum Schneiden von harten, dicken Materialien mit verminderter Stanzkraft z.B. Kunststoff, Gummi, Holz
SFDB	Einseitiger Facettenschliff	zum Schneiden von harten, dicken Materialien mit engen Konturen

Tabelle 6: Formen und Verwendung der Schneidlinien.

Zum Stanzen wird eine verschleißfeste und harte Schneide benötigt, die durch das Vergüten der Schneidspitze erreicht werden kann. Die Schneide wird dabei mit einer Einhärtetiefe von etwa $220\mu\text{m}$ induktiv gehärtet. Die anschließende Glühbehandlung erfolgt bei einer Anlasstemperatur von 500°C . In Abbildung 52 ist das Schliffbild der Schneidspitze nach dem Härten und nach dem Härten und Anlassen mit jeweils drei Härteeindrücken dargestellt.

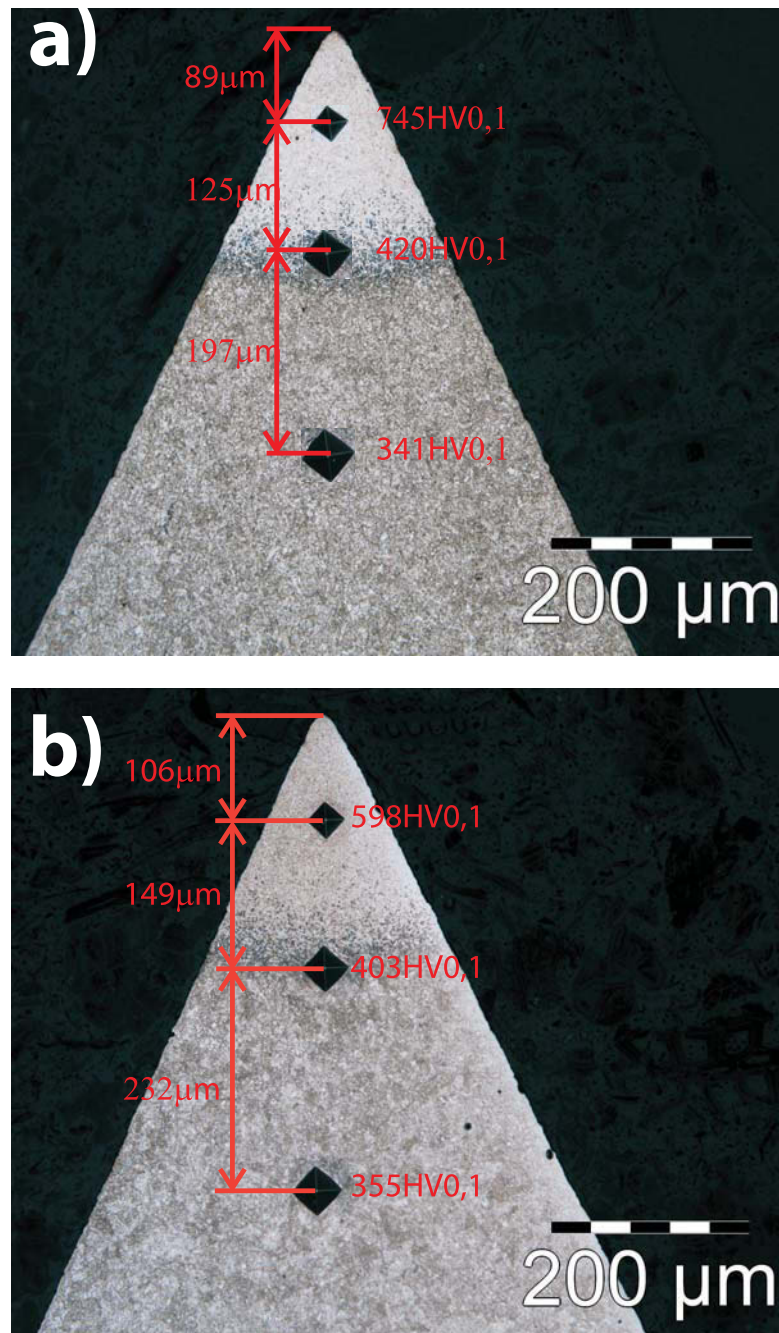


Abbildung 52: Schliffbild der Schneide mit Härteeindrücken (HV0,1) und dem Abstand der Eindrücke von der Schneidspitze, a) nach dem Härten und b) nach dem Härten und Anlassen der Schneidspitze.

An der Schneidspitze ist das Gefüge martensitisch, im Grundmaterial liegt ein perlitisches Gefüge vor und im Übergangsbereich hat sich Bainit gebildet.

Als Werkstoff für die Schneidlinien wird ein Ck45 Stahl verwendet, bei dem es sich um einen Vergütungsstahl handelt. Die chemische Zusammensetzung und die wichtigsten mechanischen Kennwerte laut Norm sind in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

C [%]	Si [%]	Mn [%]	S [%]
0,45	0,25	0,65	0,030

Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung des Vergütungsstahls Ck45.

Streckgrenze $R_{p0,2}[N/mm^2]$	Zugfestigkeit $R_m[N/mm^2]$	Bruchdehnung A_5 [%]	Brucheinschnürung Z [%]
490	700-850	min. 14	min. 35

Tabelle 8: Mechanische Kennwerte des Vergütungsstahls Ck45 im vergüteten Zustand.

Die Herstellung der Schneidlinien erfolgt je nach Schneidform in 4 bzw. 5 Produktionsstufen, die in Tabelle 9 dargestellt sind.

Nummer	Produktionsstufe
1	Ausgangszustand
2	CF-geschabt
3	DB-geschabt
4	Härten
5	Härten und Anlassen

Tabelle 9: Produktionsstufen zur Herstellung von Schneidlinien.

Nach der Wärmebehandlung werden die aufgewickelten Schneidlinien zum Kunden geliefert. Dort erfolgen dann noch zwei weitere Produktionsschritte, nämlich zuerst das Ablängen der Blechstreifen auf die benötigte Einbaulänge und anschließend das Stanzen von Ausnehmungen auf der Rückseite der Schneidlinien. Diese Ausnehmungen sind notwendig, damit die Schneidlinien in die anfangs erwähnten Pressen eingebaut werden können (siehe Abb. 53).

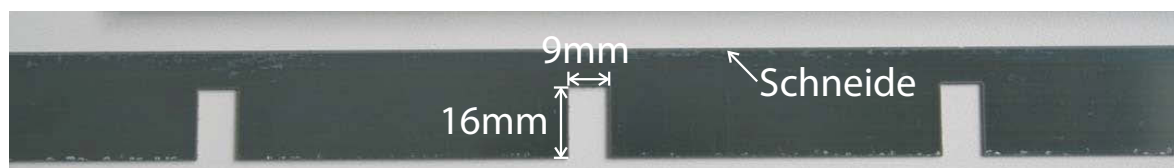


Abbildung 53: Schneidlinie mit Ausnehmungen an der Rückseite für den Einbau in Stanzpressen.

Doch das Stanzen der Ausnehmungen stellt einen schwerwiegenden Eingriff in den Spannungszustand der Schneidlinie dar. Durch die Materialentnahme kommt es zur Relaxation der Eigenspannungen und in letzter Konsequenz zu einem Verzug der Schneidlinie (Säbelbildung), wodurch ein Einbau in die Presse nicht mehr möglich ist. In Abbildung 54 ist eine Schneidlinie nach dem Schneiden der Ausnehmungen dargestellt, in der deutlich die Säbelbildung zu erkennen ist.



Abbildung 54: Säbelbildung nach dem Schneiden von Ausnehmungen mit der Wasserstrahlschneidanlage.

Ein Teil der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit, beschäftigte sich daher mit der Frage, in welchem Produktionsschritt diese Eigenspannungen induziert werden und in weiterer Folge sollen auch Möglichkeiten zur Verringerung dieser Spannungen aufgezeigt werden.

Des Weiteren wurde auch die Möglichkeit einer optischen Messung der Eigenspannungen mit Hilfe des Messsystems Aramis[®] analysiert.

7.2 Verwendete Messmethoden

Wie bereits in Kapitel 6.2 erläutert ist es bei der Auswahl der geeigneten Messmethode wichtig bereits Informationen über die Art der Eigenspannungen, die bei den Messungen zu erwarten sind, zu haben.

Bei der Betrachtung des Herstellungsprozesses der Schneidlinien zeigt sich, dass aller Voraussicht nach, das Härten der Schneidspitze, den größten Einfluß auf den Spannungszustand haben wird.

Die durch den Härteprozess induzierten Eigenspannungen sind Eigenspannungen I. Art (siehe Kapitel 2.1). Daraus leitet sich als klassische Messmethode das Röntgenbeugungsverfahren und die Neutronenbeugung ab. Dabei ist vor allem der Verlauf der Eigenspannungen quer zur Schneide von großem Interesse.

Die Verwendung des Zerlegeverfahrens mit DMS kann aufgrund der Dimension der Schneidlinie (Breite 20-26mm) nicht verwendet werden, da nur eine punktuelle Messung bzw. eine über die Breite der Schneidlinie gemittelte Messung, durchführbar ist. Ebenso verhält es sich mit dem Bohrlochverfahren, das wiederum nur eine punktuelle Messung zulässt.

Ebenso wie bei den Untersuchungen der Kaltbänder wurde das optische Messsystem Aramis[®] im Zusammenhang mit dem Zerlegeverfahren angewandt. Die durch das Freischneiden der Eigenspannungen entstandenen Relaxationen des Materials sollten dabei

optisch gemessen werden und anschließend soll aufgrund dieser Dehnungsrelaxationen auf einen ursprünglich vorherrschenden Spannungszustand zurückgerechnet werden.

Zur Verifikation der Untersuchungsergebnisse mit Aramis® wurde die Röntgenmethode gewählt.

8 Messungen und Berechnungen

Im folgenden Kapitel werden nun die durchgeführten Messungen beschrieben.

8.1 Messungen an kaltgewalzten Bändern

Zur Analyse der Eigenspannungen in den Bändern wurde das Bohrlochverfahren und das optische Messsystem Aramis[®] verwendet.

8.1.1 Messungen nach der Bohrlochmethode

Die Messung erfolgte nach der Norm ASTM E 837 [41]. Untersucht wurden dabei drei Produktionsstufen. Die unterschiedlichen Produktionsstufen sind in Tabelle 10 aufgelistet.

Nr.	Produktionsstufe
1	Warmband
2	1.Walzstich
3	Besäumt

Tabelle 10: Produktionsstufen, die bei den Bändern analysiert wurden

Es wurden pro Produktionsstufe jeweils zwei Messungen durchgeführt. Jeweils eine Messung genau in der Mitte des Bandes und eine im Randbereich.

In Abbildung 55 ist die Lage der Bohrlöcher am Band dargestellt.

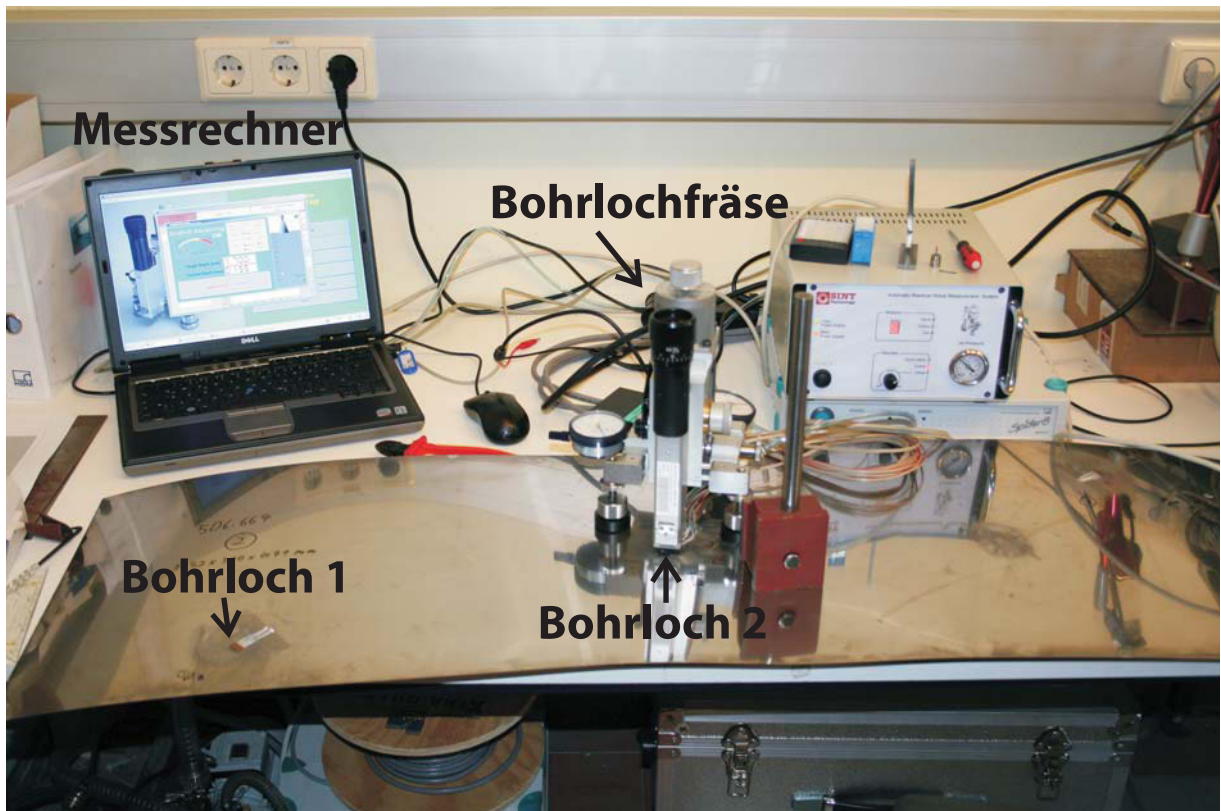


Abbildung 55: Lage der Bohrlöcher an den untersuchten Bändern.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Kapitel 9.1.1 dargestellt.

8.1.2 Messungen mit Aramis®

Zur Messung der unterschiedlichen Eigenspannungen an kaltgewalzten Bändern, mit dem optischen Messsystem Aramis®, wurde das Zerlegeverfahren angewandt. Durch das Freischneiden der Blechbänder entstehen Dehnungsrelaxationen, die mit Hilfe von Aramis® detektiert werden sollten.

Dazu wurden die Bänder mit dem für Aramis® typischen stochastischen Muster besprüht und anschließend der Ausgangszustand aufgenommen. Daran anschließend wurde das Band mit einer Wasserstrahlschneidanlage zerlegt. Dies geschah in 3 Schnittfolgen. Die Schnittfolgen wurden so gewählt, dass dabei die Bandmitte in immer kleinere Abschnitte zerteilt wird. In Abbildung 56 ist die Abfolge der einzelnen Schnitte am Blechband dargestellt.

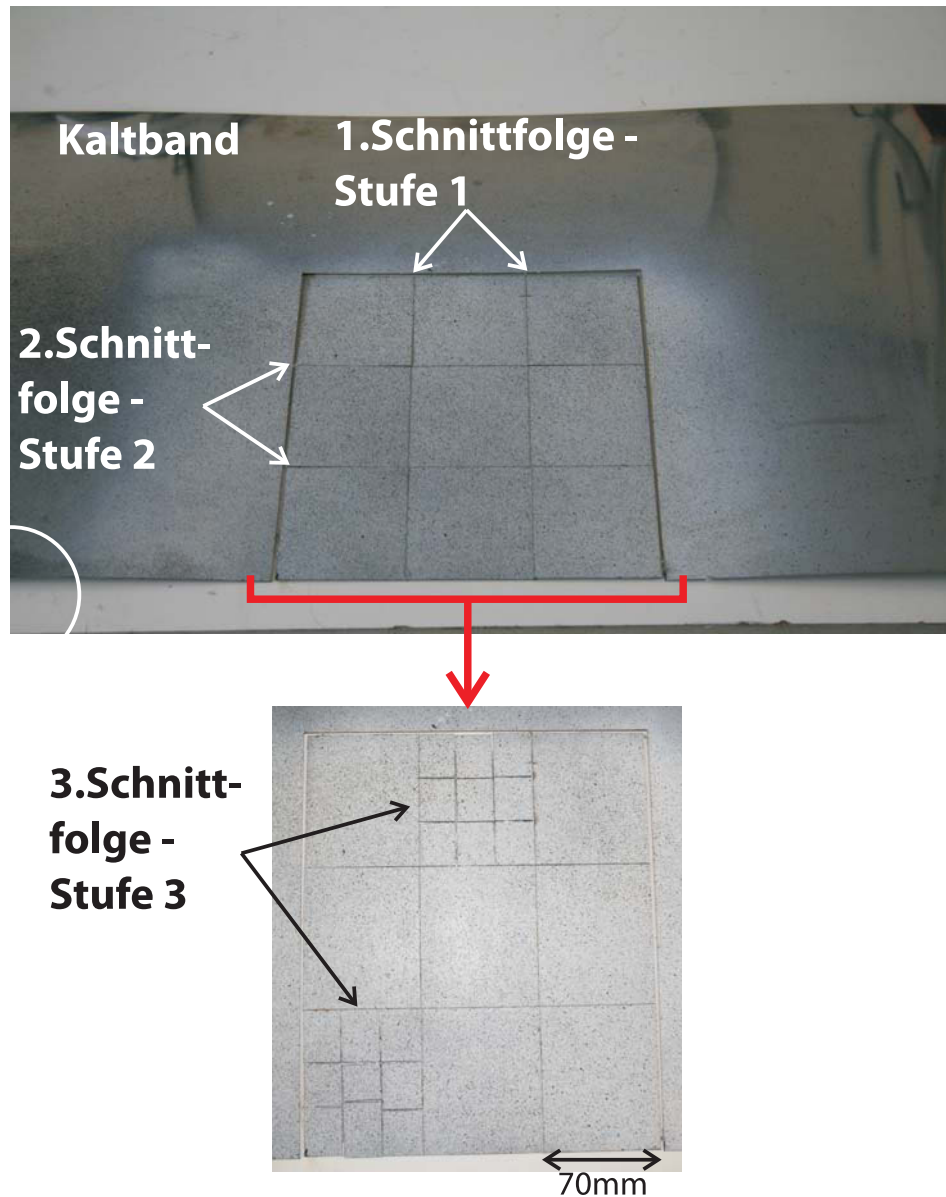


Abbildung 56: Schnittfolge am kaltgewalzten Band.

Nach jedem Schnitt wurde eine Aufnahme mit Aramis[®] gemacht. Im Anschluss wurden jeweils Punktpaare definiert und deren Abstand mit Aramis[®] berechnet. Aus der Änderung des Punkt-Punkt-Abstandes sollte eine Einschätzung des ursprünglich vorherrschenden Eigenspannungszustandes möglich sein.

In Abbildung 57 ist die genaue Lage der mit Aramis[®] vermessenen Quadrate eingezeichnet.

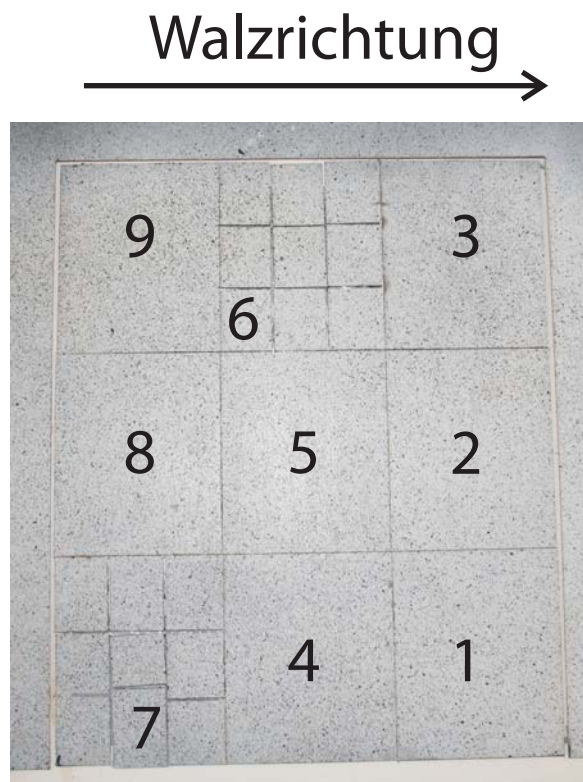


Abbildung 57: Bezeichnung und Lage der mit Aramis[®] vermessenen Quadrate.

In Abbildung 58 ist die 3D-Ansicht der analysierten Abstände nach der 3.Schnittfolge zu sehen.

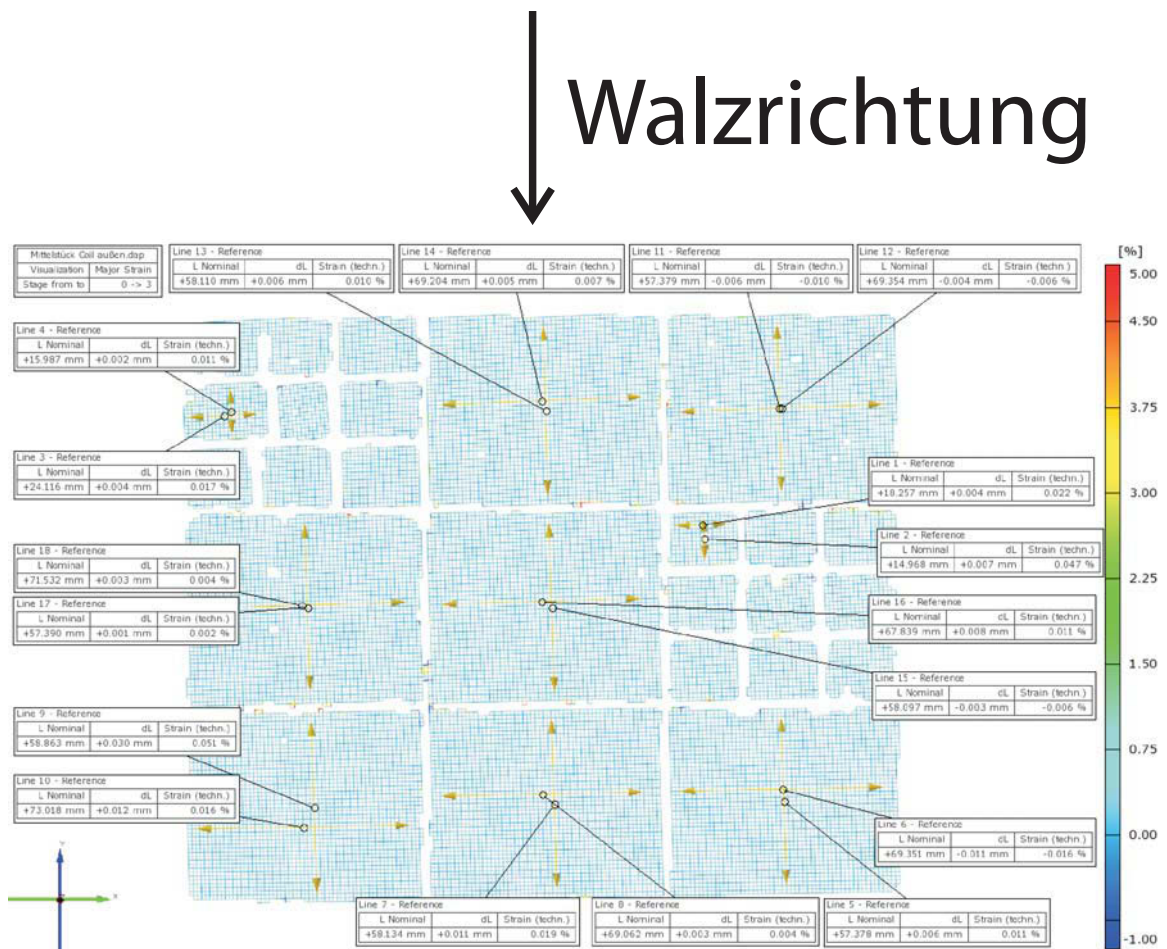


Abbildung 58: Lage der mit Aramis[®] vermessenen Abstände.

Es wurden dabei sieben Quadrate, die sich nach der 2. Schnittfolge und zwei, die sich nach der 3. Schnittfolge ergeben, vermessen. Die ermittelten Dehnungen wurden, durch Annahme eines ebenen Spannungszustandes, in die Gleichungen 39 aus Kapitel 2.3.4.2 eingesetzt und daraus der Spannungszustand ermittelt.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Kapitel 9.1.2 dargestellt.

In einer weiteren Auswertung an den Kaltbändern wurde mit Aramis[®] in den einzelnen Schnittfolgen (Stufen) ein Schnitt in der 3D-Ansicht gelegt und die Schnittdaten ermittelt. Die einzelnen Stufen und die Lage des 3D-Schnittes sind in Abbildung 59 dargestellt. Dabei ist die Darstellung „Epsilon X“, als die Verschiebung quer zur Walzrichtung gewählt.

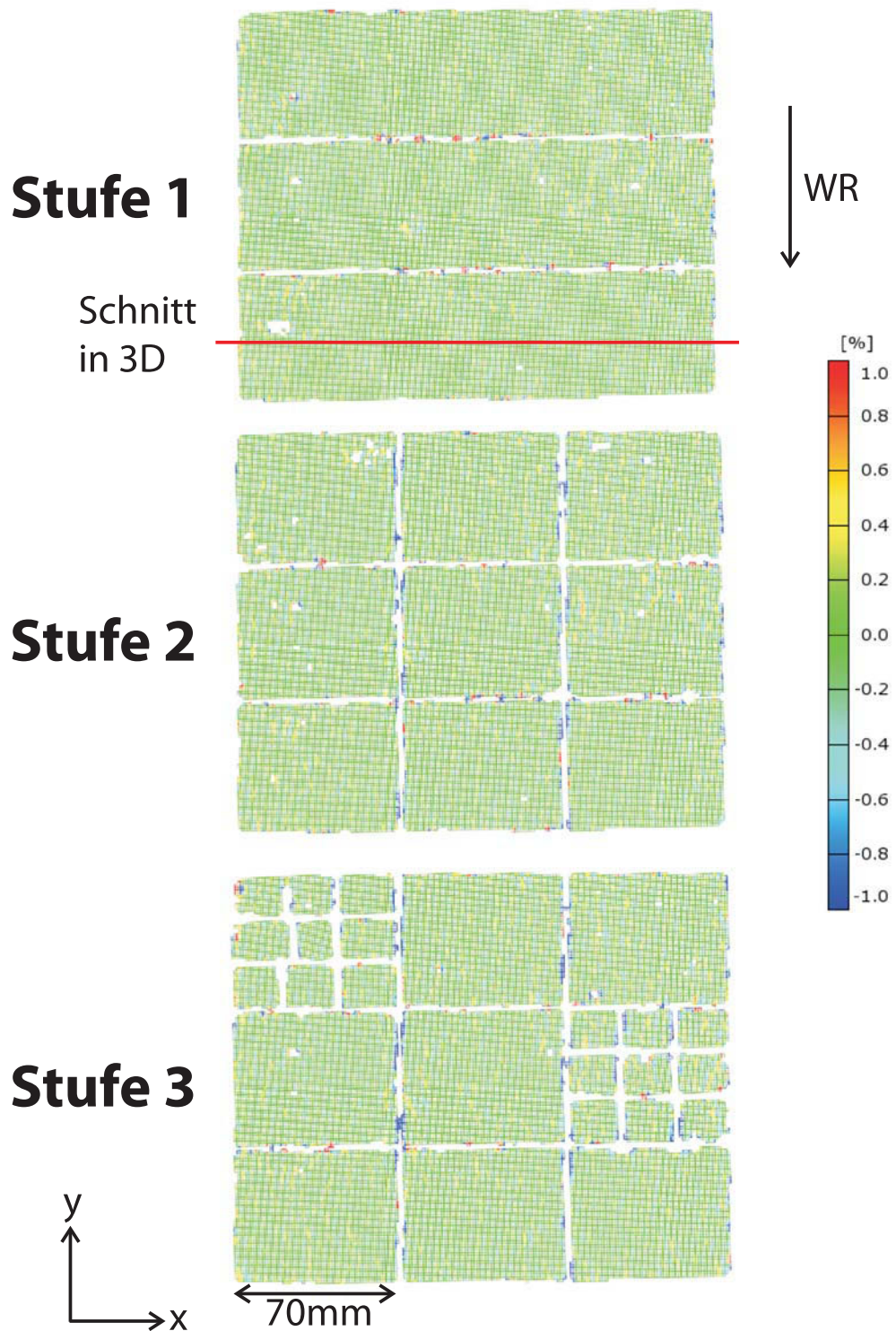


Abbildung 59: Berechnete 3D-Ansicht des Kaltbandes in 3 Stufen mit eingezeichneter Lage des Schnittes.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Kapitel 9.1.2 dargestellt.

8.2 Untersuchung von Schneidlinien

8.2.1 Messung und Berechnung der Säbeligkeit

8.2.1.1 Messungen mit Aramis®

Bei den ersten Versuchen zur Messung der Eigenspannungen mit Aramis® wurde die Säbeligkeit der Schneidlinien in den einzelnen Produktionsstufen, bei Entnahme von Material an der Rückseite der Schneide, untersucht. Dieser Vergleich sollte erste wichtige Hinweise auf den Spannungszustand der Schneidlinien in den unterschiedlichen Bearbeitungsstufen bringen.

In Tabelle 11 ist eine Übersicht der untersuchten Chargen und Bearbeitungszustände dargestellt.

Chargennummer	Analysierte Bearbeitungszustände	Breite der Linie [mm]
1	Vor/Nach dem Härten	23,8
2	Vor/Nach dem Härten	30
3	Unbearbeitet/CF geschabt/CFDB geschabt/Gehärtet/Entspannt	23,8
4	Vor/Nach dem Härten/Nach Härten und Anlassen	23,8
5	Vor/Nach dem Härten	23,8

Tabelle 11: Die für die Messung der Säbeligkeit verwendeten Chargen und Produktionsstufen

Zur Messung des Säbels wurde das Messsystem Aramis® verwendet. Die Größe des ausgebildeten Säbels kann dabei als Maß für den ursprünglich in den Schneidlinien vorherrschenden Spannungszustand genommen werden.

Damit es zur Ausbildung eines Säbels in den Schneidlinien kommt, muss in den Spannungszustand eingegriffen werden. Dies wurde durch die Materialentnahme an der Rückseite der Schneide erreicht.

In den ersten Untersuchungen wurde eine Ausnehmung mit einer Wasserstrahlschneidanlage geschnitten. Dabei wurde eine Wasserstrahlschneidanlage der Firma Stein Moser verwendet. Diese Anlage arbeitet mit einer Hochdruckpumpe, die einen Druck von bis zu 4000bar erzeugt und einem Abbrasivmittel, das dem Wasserstrahl beigemischt wird. Die Schnittbreite beträgt 1mm. Die Verwendung einer Wasserstrahlschneidanlage ermöglicht es, die Schneidlinien ohne zusätzlichen Wärmeeintrag zu bearbeiten, was bei einem Laserschnitt nicht möglich wäre. Ein weiterer Vorteil liegt in der einfachen Handhabung der Anlage, die eine rasche Bearbeitung zulässt und eine saubere Schnittfront liefert.

Die Ausnehmung hatte eine Dimension von 18x210 mm. In Abbildung 60 ist eine Schneidlinie vor und nach dem Schneiden einer Ausnehmung auf der Rückseite der gehärteten Schneide dargestellt.

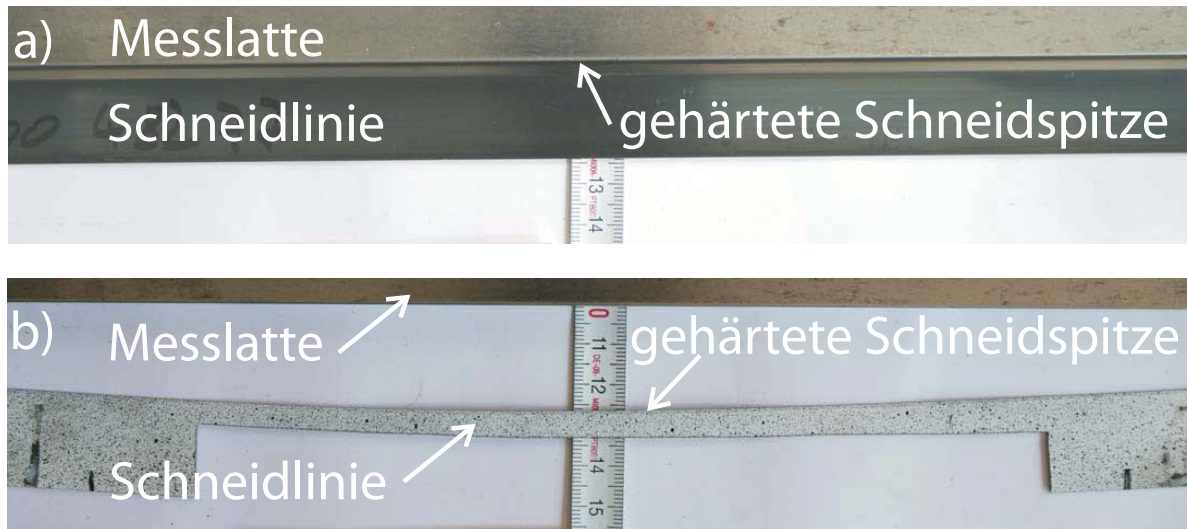


Abbildung 60: Gehärtete Schneidlinie a) vor und b) nach dem Schneiden der Ausnehmung. Deutlich ist die Bildung des Säbels nach dem Schneiden der Ausnehmung (b) zu erkennen.

Vor dem Schneiden der Ausnehmungen wurde das Blechband mit dem für Aramis[®] typischen stochastischen Muster versehen und anschließend der Referenzzustand aufgenommen. Danach erfolgte das Schneiden der Ausnehmung und wiederum eine Aufnahme mit Aramis[®]. Die von Aramis[®] berechnete 3D-Ansicht vom Referenzzustand und dem Zustand nach dem Schneiden der Ausnehmung ist in Abbildung 61 dargestellt.

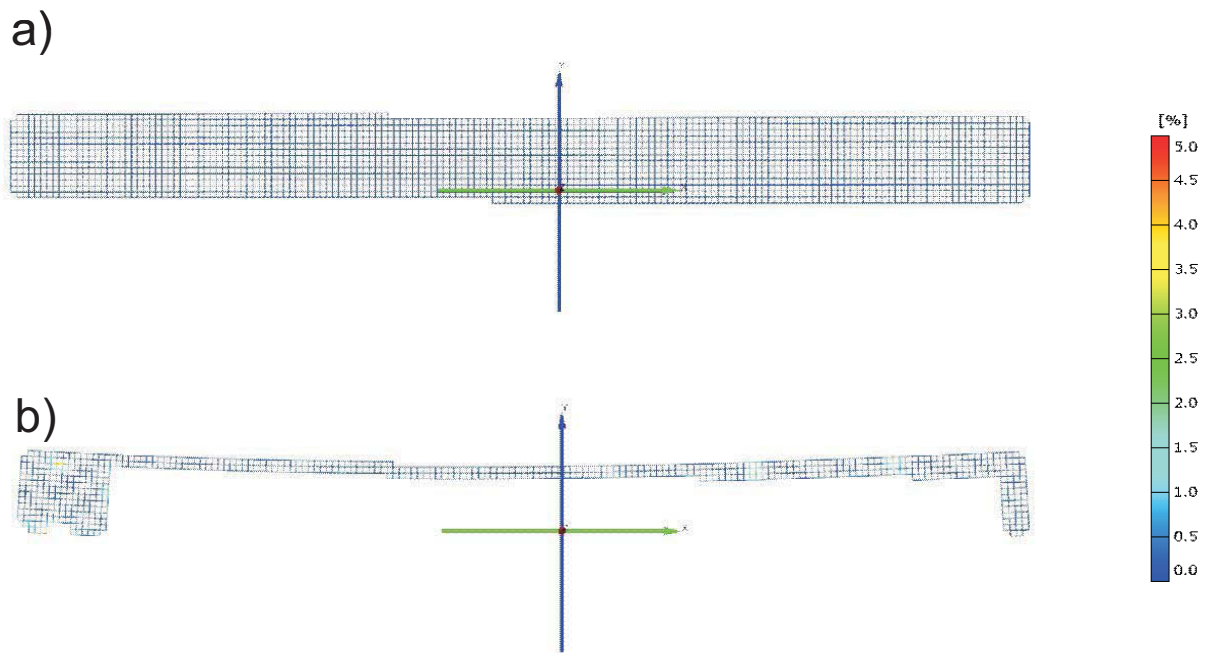


Abbildung 61: Gehärtete Schneidlinie a) vor und b) nach dem Schneiden der Ausnehmung in der berechneten 3D Ansicht von Aramis[®]. Auf der Skala ist die Hauptformänderung dargestellt.

Dieser Versuchsablauf wurde für alle unterschiedlichen Produktionsstufen und Chargen durchgeführt.

Nach dem Berechnen der 3D-Darstellung durch Aramis[®], wurden Punkte in dem 3D-Gitter definiert. Jeweils 4 Punkte am rechten und 4 Punkte am linken Rand und anschließend wurde deren Abstand bestimmt (siehe Abb. 62). Danach wurde die Änderung der Länge dieser Linie vom Referenzzustand in den Zustand nach dem Schneiden der Ausnehmung dargestellt.

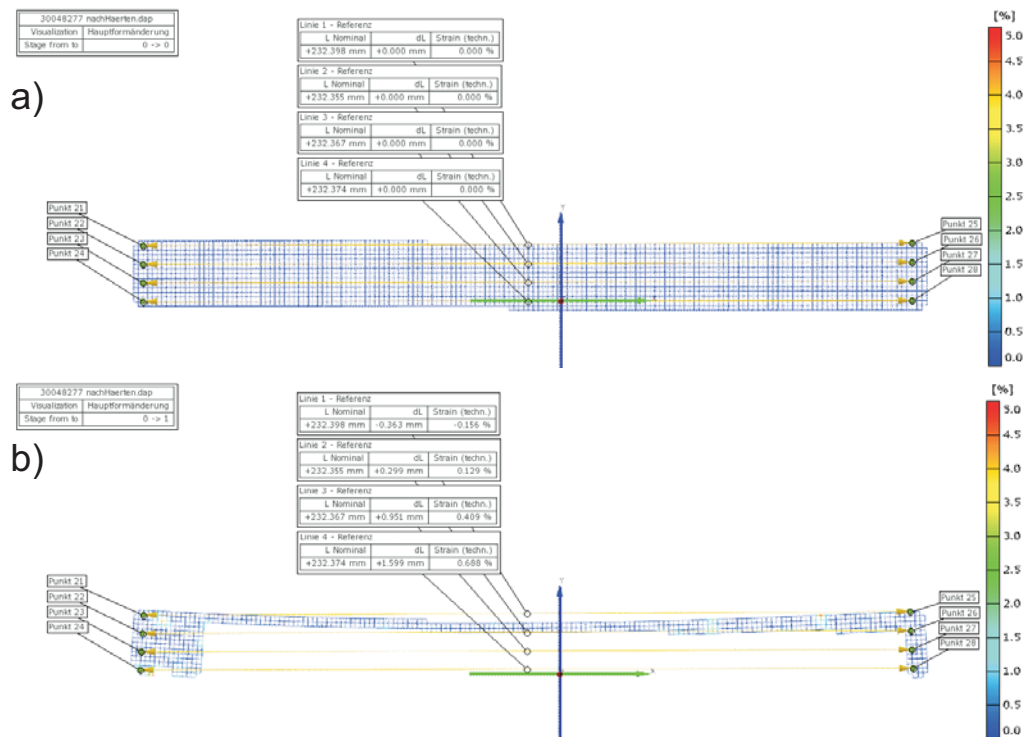


Abbildung 62: Gehärtete Schneidlinie a) vor und b) nach dem Schneiden der Ausnehmung in der berechneten 3D Ansicht von Aramis®.

Im folgenden Flussdiagramm ist noch einmal, zur besseren Übersicht und Verständlichkeit, der genaue Messablauf zu sehen.

Kalibrierung
Aramis



Auftragen des
Musters mit
Spraylack



Aufnahme des
Referenzzustandes mit
Aramis



Schneiden der Ausnehmungen
mit der Wasserstrahl-
schneid-
anlage



Aufnahme mit Aramis
nach dem Schneiden
der Ausnehmungen



3D Auswertung mit
Aramis



Abbildung 63: Typischer Messablauf mit Aramis[®] zur Bestimmung der Säbeligkeit in Schneidlinien.

Die Ergebnisse dieser Analysen sind in Kapitel 9.2 zusammengefasst.

8.2.1.2 FEM-Berechnung der Säbelbildung

Die numerische Berechnung der Säbelbildung wurde mit der FEM-Software DEFORMTM 3D durchgeführt. Ziel dieser Simulation war es, nachzurechnen, ob das Härten der Schneidlinie, also die Bildung des Martensit und die damit verbundene Volumsänderung im Gefüge und die daraus resultierende Verspannung des Metallgitters, für die auftretende Säbelbildung verantwortlich ist.

Wie in allen modernen Simulationsprogrammen gliedert sich der Ablauf einer Simulation mit DeformTM in drei Teilschritte. Die grafische Benutzeroberfläche führt den Benutzer in der in Abbildung 64 gezeigten Reihenfolge durch das Programm. Im Preprozessor erfolgt die Modellerstellung mit Eingabe aller für das Modell wesentlichen Randbedingungen und Parameter [80].

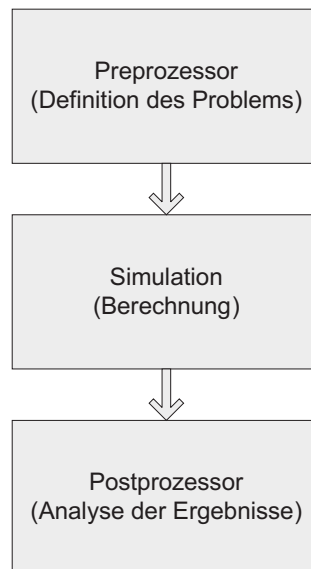


Abbildung 64: Ablauf einer Simulation mit DeformTM [80].

Die numerische Berechnung zur Lösung des im Preprozessor definierten Problems findet im zweiten Programmmodul, dem eigentlichen Simulationsmodul, statt. Die Berechnung der Verformung und der thermischen Vorgänge erfolgt zwar getrennt, ist jedoch iterativ miteinander gekoppelt. Aufgrund der zu berechnenden plastischen Verformungen und der komplexen Randbedingungen ist in einer Umformsimulation immer ein nichtlineares Gleichungssystem für jeden Simulationsschritt zu lösen. Zur Lösung kann dieses System durch geeignete Methoden linearisiert werden [80].

DeformTM stellt dafür zwei Iterationsverfahren zur Verfügung. Das erste ist die so genannte Newton-Raphson-Methode. Diese ist ein Tangentenverfahren, in dem die Steigung in den approximierten Punkten nach jedem Iterationsschritt berechnet wird. Die zweite ist die direkte Methode, bei deren Anwendung angenommen wird, dass die Zustandsglei-

chung während aller Iterationen linear ist. Welche dieser Methoden für ein spezifisches Problem besser geeignet ist, muss der Anwender entscheiden [80].

In der grafischen Benutzeroberfläche des Postprozessors wird die Auswertung der Simulationsergebnisse durchgeführt. Die Visualisierung der in der Datenbank gespeicherten Ergebnisse erfolgt entweder an Hand von Konturplots, Vektorplots sowie Isolinienplots in denen der lokale Wert einer Größe (z.B. die lokale Vergleichsspannung) durch einen Farbverlauf dargestellt wird, oder durch Diagramme, durch die der Verlauf ortsunabhängiger Größen visualisiert werden kann [80].

Eine weitere Möglichkeit zur Beobachtung des Materialflusses im DeformTM Postprozessor ist das „Pointtracking“. Mit dieser Funktion ist es möglich, einen oder mehrere Punkte zu definieren, deren Bewegung während des Umformprozesses, gemäß den Geschwindigkeitskomponenten der Knoten, beobachtet werden kann [80].

8.2.1.3 Erstellung eines Modells und Eingabe der Werkstoffparameter

Der erste Schritt in der Simulation bestand darin ein Modell der Schneidlinien im Preprozessor zu erstellen. In Abbildung 65 ist das Modell der Schneidlinie in 3D dargestellt.

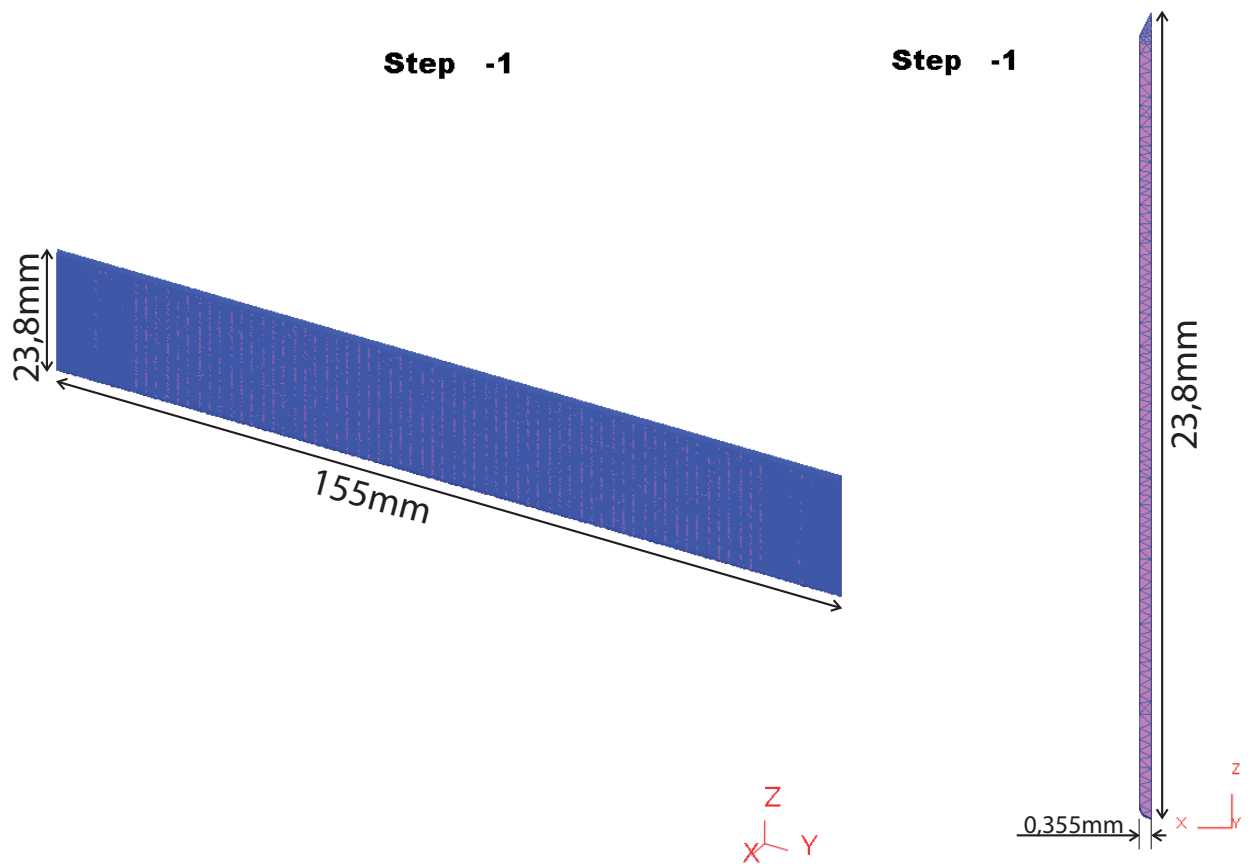


Abbildung 65: Modell der Schneidlinie in DeformTM.

Als Werkstoff wurde der Vergütungsstahl Ck45 ausgewählt, wie er auch für die Schneidlinien verwendet wird. Für diesen Werkstoff sind in Deform sehr viele physikalische Parameter (siehe Tabelle 12) in einer Datenbank hinterlegt und es sind auch drei Phasen (Martensit, Ferrit und Austenit) definiert, sodass eine thermomechanische Berechnung mit Phasenumwandlung möglich ist.

Parameter	Vorgegebener Wert	
Poissonzahl	0,3	
Wärmekapazität [N/mm ² K]	4,631	
Emissionsgrad	0,9	
Diffusionskonstante [m ² /s]	$7,4 \cdot 10^{-5}$	
Wärmeausdehnungskoeffizient [1/K]	Austenit	$2 \cdot 10^{-5}$
	Perlit	$1,5 \cdot 10^{-5}$
	Martensit	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Härte [HRC]	Austenit	20
	Perlit	30
	Martensit	55

Tabelle 12: Vorgegebene Parameter für den Stahl Ck45 in Deform.

Insgesamt wurden drei Operations definiert. Sie sind in Tabelle 13 aufgelistet.

Operation	Durchgeführte Simulation	Zeit
1	Aufheizen der Schneide	0,25s
2	Abkühlen (Härten) der Schneide	4,25s
3	Schneiden der Ausnehmung	5s

Tabelle 13: In der Simulation mit Deform verwendete Operationen und die dafür vorgegebene Zeit.

Nach dem Eingeben des Modells und dem Festlegen der Rand- und Anfangsbedingungen, wurde als erste Operation das Härten der Schneide über ein „Environment Window“ vorgenommen. Dies bewegt sich, gleich wie das Band beim Härten im Realprozess, mit 666 m/s über die Schneidlinie und hat eine Temperatur von 900°C. Als Wärmeübergangskoeffizient wurde ein Wert von 1000 W/m²K eingegeben.

In Abbildung 66 ist der Verlauf der Temperatur an der Schneidspitze dargestellt.

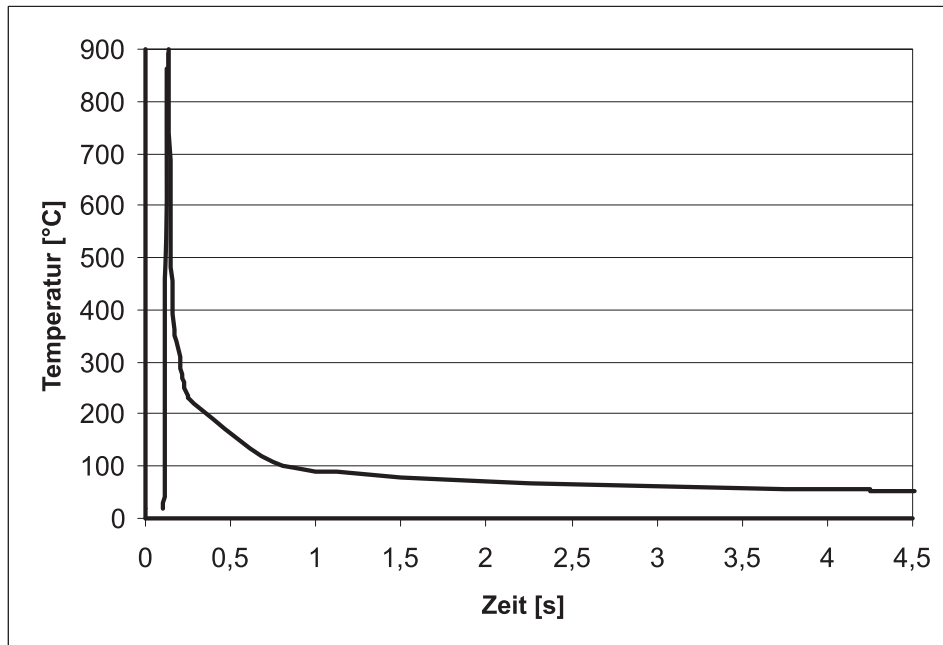


Abbildung 66: Temperaturverlauf der Schneide in der Simulation mit Deform.

Abbildung 67 zeigt dazu das ZTU-Schaubild des Stahls Ck45 mit der in Deform berechneten Abkühlkurve.

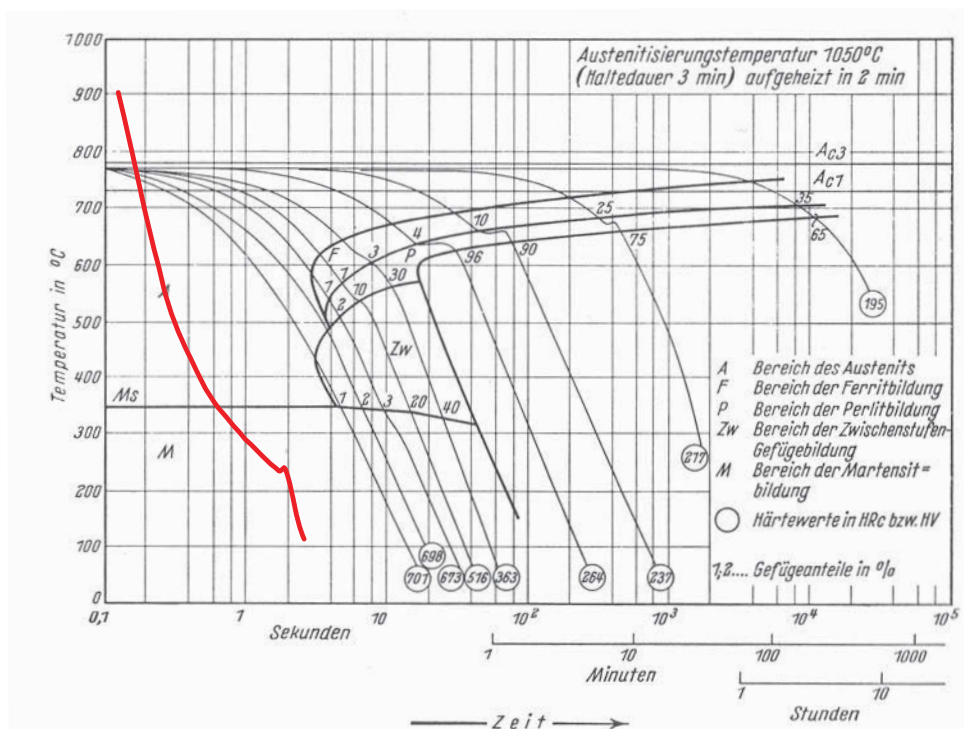


Abbildung 67: Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild (ZTU) des Stahl Ck45.

Es zeigt sich, dass nach 1s die Schneide bereits unter M_S abgekühlt ist und sich somit Martensit gebildet hat.

Als Operation 2 wurde das Auskühlen der Schneidspitze und die damit verbundene Bildung des Martensit gerechnet.

In Abbildung 68 ist der Anteil des Martensit in der Schneidlinie, nach dem Härten der Schneide, dargestellt.

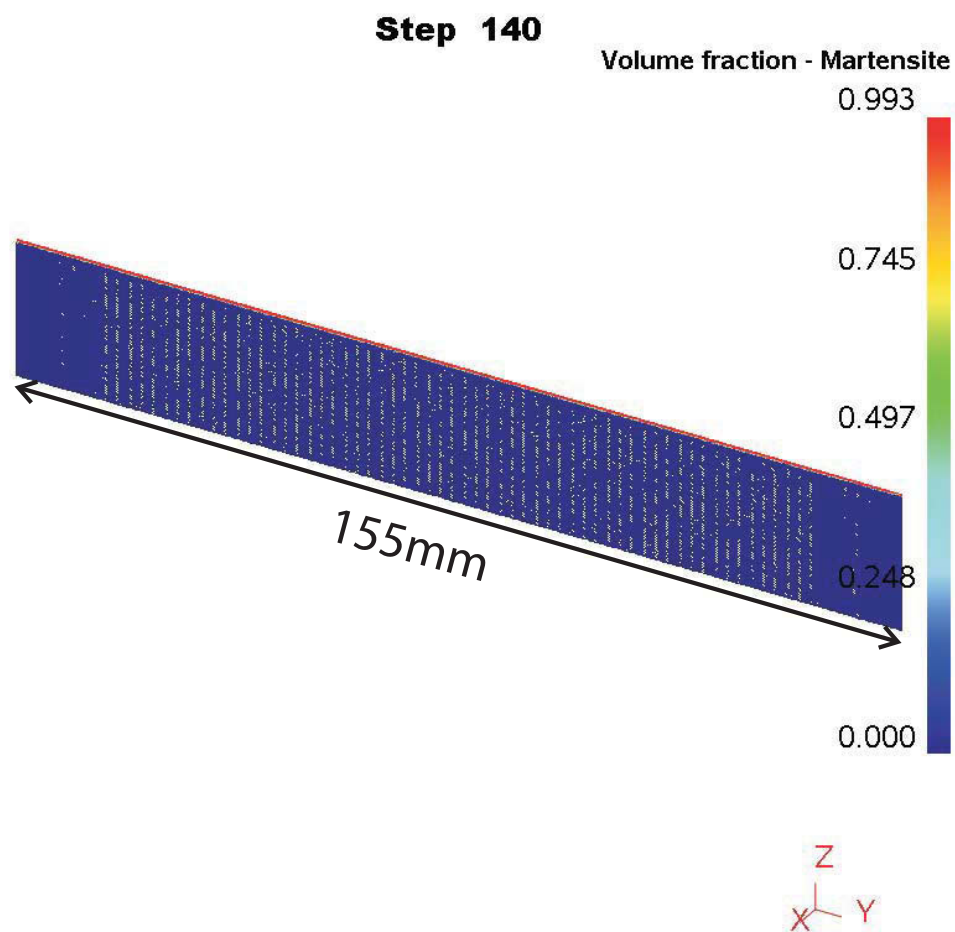


Abbildung 68: Martensitanteil nach dem Härten der Schneide. Die Schneide, in rot dargestellt, hat dabei vollständig in Martensit umgewandelt.

In Operation 3 wurde die Ausnehmung geschnitten. Dies geschah mit einer „Boolean Operation“. Wofür die Verwendung eines „Tetrahedral“- Netzes Voraussetzung ist.

In Abbildung 69 ist die Schneidlinie beim Stanzen der Ausnehmung mittels der Boolean Operation dargestellt.

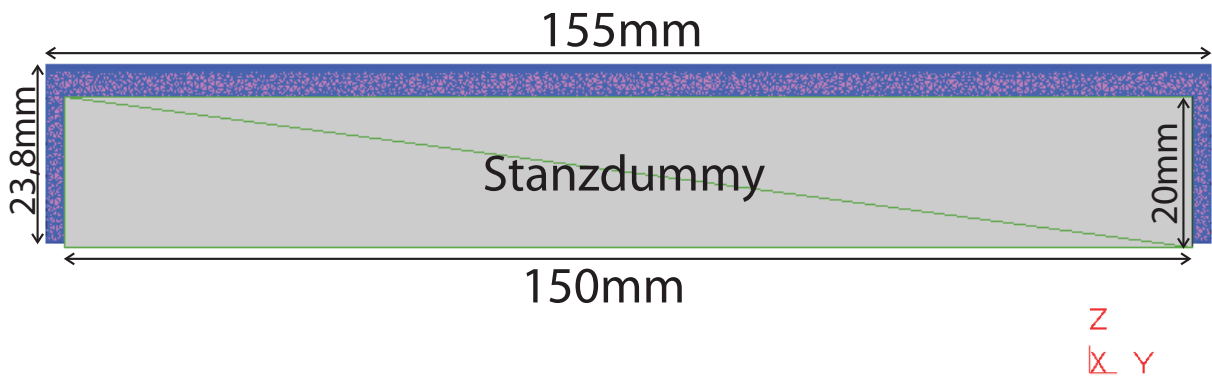


Abbildung 69: Darstellung der Schneidlinie mit Stanzdummy.

In Abbildung 70 ist der von Deform berechnete Säbel, der sich durch das Stanzen einer Ausnehmung auf der Rückseite der Schneide bildet, zu sehen. Klar zeigt sich eine Verkürzung der Schneide.

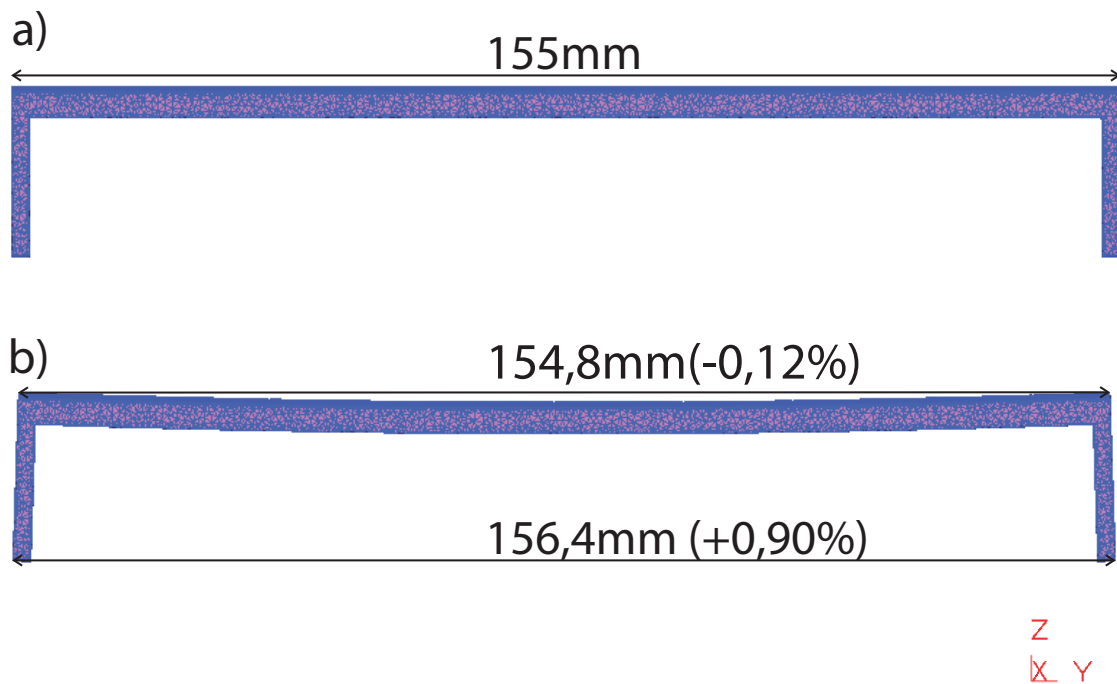


Abbildung 70: Darstellung der Schneidlinie nach dem Stanzen der Ausnehmung, a) direkt beim Stanzen b) 5s nach dem Stanzen.

Nach dem Stanzen der Ausnehmung wurde im Postprozessor die Auswertung vorgenommen. Das Ergebniss dazu ist in Kapitel 9.2.1.2 zusammengefasst.

8.2.2 Röntgenverfahren

Die Analyse der Eigenspannungen nach dem Röntgenverfahren wurde an der Produktionsstufe „nach Härten“ der Charge Nr. 4 vorgenommen. Dabei wurde die Anlage Seifert PTS 3000 am Erich-Schmid-Institut in Leoben verwendet. Sie ist in Abbildung 71 dargestellt.



Abbildung 71: Aufbau der Röntgenanlage am Erich-Schmid-Institut zur Messung der Eigenspannungen.

Das Seifert PTS 3000 4-Kreis-Goniometer verwendet $\text{Cu-K}\alpha$ -Strahlung mit einer Wellenlänge von $1,54\text{\AA}$. Der Strahldurchmesser betrug in etwa 4mm . Die Messungen erfolgten in der Bragg-Brentano $\theta/2\theta$ -Geometrie. Die im Diffraktometer integrierte Eulerwiege ermöglichte es, über eine definierte Verkipfung der Probe Eigenspannungsmessungen gemäß der $\sin^2\psi$ -Methode durchzuführen.

Die Eigenspannung wurde entlang der Schneidlinie im Zustand „nach Härten“ in zwei aufeinander senkrechten Richtungen $\phi=0$ bzw. 90° bestimmt. Aus den elastischen Dehnungen wurde die Eigenspannungen unter Verwendung der röntgenographisch elastischen Konstanten von Fe berechnet.

In Abbildung 72 ist die Probe vor der Messung der Eigenspannungen mit Hilfe der Röntgenbeugung dargestellt.

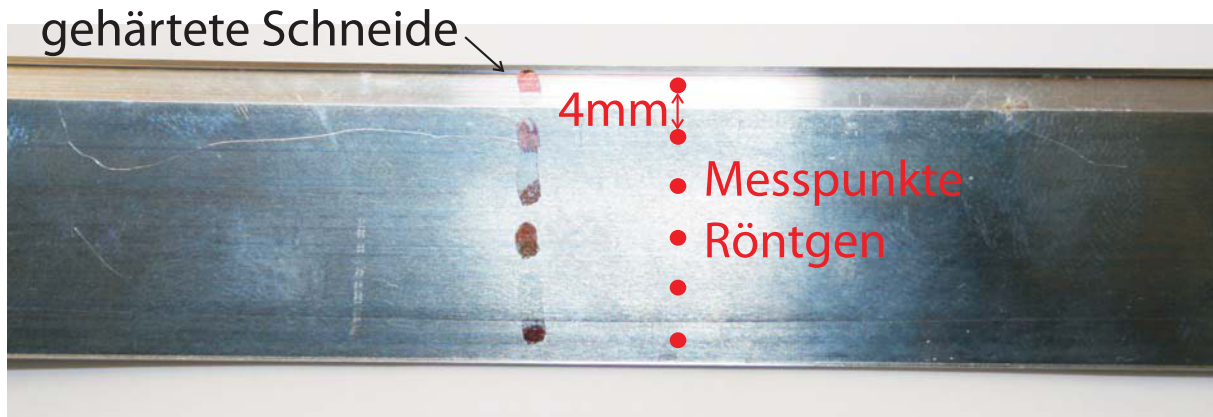


Abbildung 72: Probe zur Messung der Eigenspannungen quer zur Walzrichtung nach dem Röntgenverfahren.

Es wurden die Eigenspannungen an 6 Messpunkten quer zur Schneide analysiert, welche einen Abstand von 4mm hatten.

Die Ergebnisse der Messungen sind in Kapitel 9.2.2 zusammengefasst.

8.2.3 Bohrlochverfahren

Die Messungen nach dem Bohrlochverfahren wurden vorgenommen, um einen ersten Vergleichswert für die vorliegenden Eigenspannungen zu erhalten. Da das Bohrlochverfahren nur eine punktuelle Messung zulässt und die untersuchten Schneidlinien nur eine Breite von max. 25mm aufweisen, ist es nicht möglich, damit einen Spannungsverlauf quer zur Schneide zu messen.

In Abbildung 73 ist der Versuchsaufbau zur Messung der Eigenspannungen in Schneidlinien nach dem Bohrlochverfahren dargestellt.

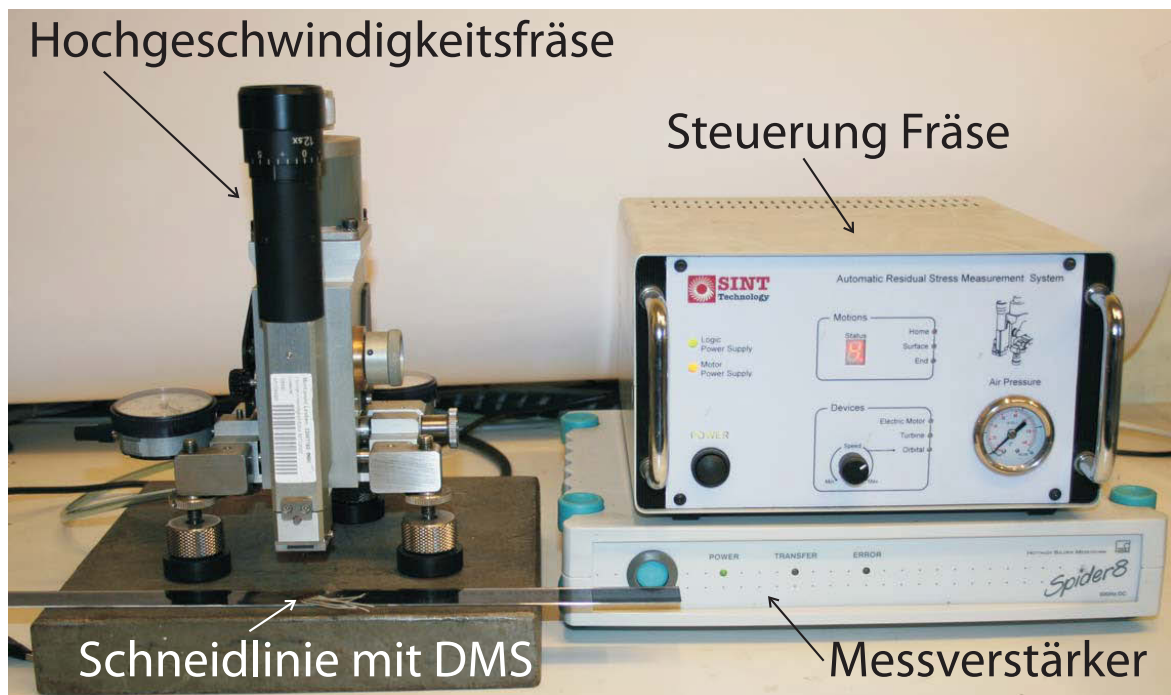


Abbildung 73: Messaufbau bei der Bohrlochmethode.

Die Messung erfolgte nach der Norm ASTM E 837 [41]. Die Ergebnisse sind in Kapitel 9.2.3 zusammengefasst.

8.2.4 Zerlegeverfahren

8.2.4.1 Messung mit Aramis®

Zur Messung der Eigenspannungen nach dem Zerlegeverfahren wurde die in Kapitel 3 beschriebene Vorgehensweise gewählt. Im Folgenden ist dies noch einmal kurz dargestellt.

1. Beschreibung des Spannungsfeldes
2. Auswahl der Dehnungsmessmethode
3. Vorbereitung zur Dehnungsmessung
4. Trennung des Elements
5. Messung der Dehnung nach dem Trennen

Bezüglich der Beschreibung des Spannungsfeldes wird aufgrund der Dimension der Schneidlinie (1000 x 23 x 1,5mm) ein ebenes Spannungsfeld angenommen. Da die Dicke des Blechbandes im Vergleich zur Länge und Breite sehr gering ist, wird eine konstante Spannungsverteilung über die Dicke angenommen. Dies hat den Vorteil, dass die Berechnung

eines ebenen Spannungsfeldes einfacher ausfällt, als die Annahme und Berechnung eines dreidimensionalen Spannungsfeldes (siehe Kapitel 2.3.4).

Nach der Beschreibung des Spannungsfeldes muss eine Dehnungsmessmethode ausgewählt werden. Hier stellt sich dann die Frage nach der notwendigen Auflösung der Messmethode. Das heute gängigste Verfahren ist die Verwendung von DMS, die eine sehr hohe Auflösung besitzen, aber den Nachteil haben, keine flächige Auswertung zu ermöglichen. Da vor allem der Spannungsverlauf quer zur Walzrichtung von Interesse ist und die Blechbänder sehr schmal sind, erscheint eine Verwendung von DMS nicht sinnvoll.

Daher wurde in dieser Arbeit versucht, die relaxierten Dehnungen nach dem Freischneiden mit Hilfe des optischen Messsystems Aramis[®] zu erfassen.

Wie in Kapitel 3 erläutert, gilt es nun den richtigen Ort zur Messung der Eigenspannungen auszuwählen. Die vorliegenden Proben hatten eine Länge von 1000mm, daher wurden Proben mit einer Länge von 100mm genau aus der Mitte entnommen. Beim Freischneiden der Schneidlinie in der Mitte dieser 100mm Proben kann der Einfluss durch das Trennen vom restlichen Band vernachlässigt werden.

Im Anschluss folgt das eigentliche Zerlegen des Blechbandes. Dabei ist es wesentlich eine geeignete Trennmethode zu wählen, da das Trennverfahren an sich schon wieder Eigenspannungen induzieren kann. Bei den Untersuchungen für diese Arbeit wurde zum Trennen der Proben eine metallographische Trennmaschine verwendet. Hier wird durch Kühlung ein Wärmeeintrag verhindert und der Schnitt kann sehr präzise erfolgen, sodass der auf die Probe aufgetragene Lack nicht beschädigt wird.

Vor dem Trennen muss aber noch der Referenzzustand gemessen, bzw. im Fall von Aramis[®], ein Bild des Ausgangszustandes aufgenommen werden. Dazu ist es notwendig, die Proben mit einem stochastischen Muster zu besprühen. Dazu wird ein handelsüblicher Spraylack verwendet. Das Muster ist, wie in Kapitel 3.7 beschrieben, dazu notwendig, um die Verschiebungen des Materials an der Oberfläche zu detektieren (siehe Abb. 31).

Nach der Aufnahme des Referenzzustandes wird nun die 100mm lange und 23,8mm breite Probe in der Mitte mit einem Schnitt 90° zur Walzrichtung getrennt. Danach wird wieder eine Aufnahme mit Aramis[®] gemacht und mit Hilfe der Software die Dehnungen berechnet.

In Abbildung 74 ist der eben beschriebene Ablauf der Messung der Eigenspannungen nach dem Zerlegeverfahren und der Auswertung mit Aramis[®] dargestellt.

Lackieren
der Schneidlinie



Aufnahme des
Referenzzustandes



Freischneiden mit der
Trennmaschine



Aufnahme nach
dem Freischneiden



Auswertung in Aramis

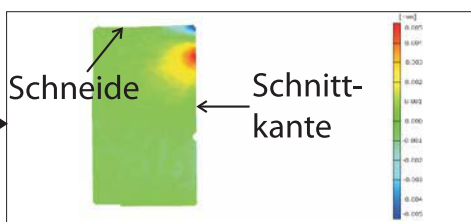


Abbildung 74: Typischer Messablauf beim Zerlegeverfahren und anschließender Auswertung mit Aramis®.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind in Kapitel 9.2.4 zusammengefasst.

8.2.4.2 Numerische Berechnung der Eigenspannungen mit Abaqus

Die mit Aramis[®] gemessenen Verschiebungen in x- und y-Richtung (siehe Abb. 88) wurden anschließend verwendet, um damit in der FEM-Software Abaqus, einen ursprünglich vorherrschenden Spannungszustand zu berechnen.

Dazu wurde ein Modell der freigeschnittenen Schneidlinie erstellt und an der Schnittfront 112 Knoten gelegt, das genau der Anzahl der Messpunkte, die mit Aramis[®] parallel zur Schnittfront ermittelt wurden, entspricht. Für jeden dieser Knoten wurde anschließend die mit Aramis[®] gemessene Verschiebung in x- und y-Richtung eingegeben, wie in Abbildung 75 zu sehen.

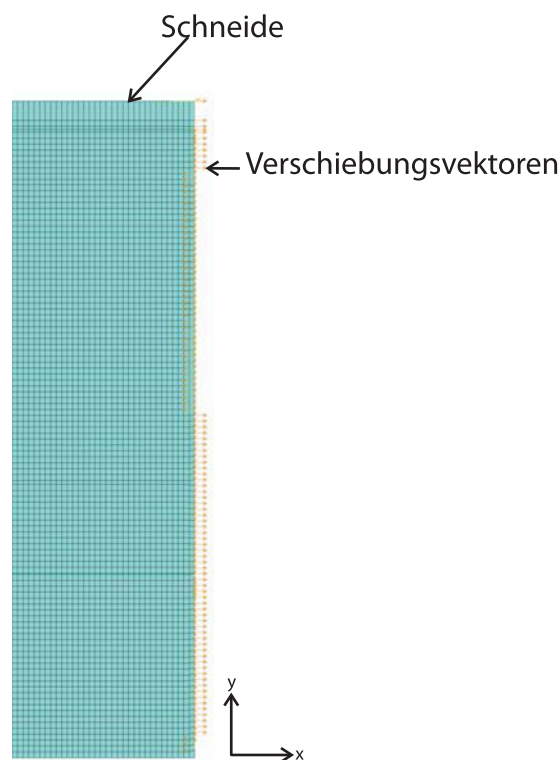


Abbildung 75: Verschiebung der Knoten im Bereich der Schneidspitze.

Darauffolgend wurde jeder Knoten in die Nulllage zurückverschoben und als Resultat die daraus resultierende Spannung berechnet.

Der so ermittelte Spannungsverlauf ist in Kapitel 9.2.4.2 dargestellt.

9 Ergebnisse

9.1 Messung der Eigenspannungen an kaltgewalzten Bändern

9.1.1 Messungen nach der Bohrlochmethode

Die Messung der Eigenspannungen in den unterschiedlichen Bearbeitungszuständen wurde, wie in Kapitel 8.1.1 beschrieben, durchgeführt.

In Abbildung 76 sind die Ergebnisse der Messung nach dem Bohrlochverfahren für den Randbereich dargestellt.

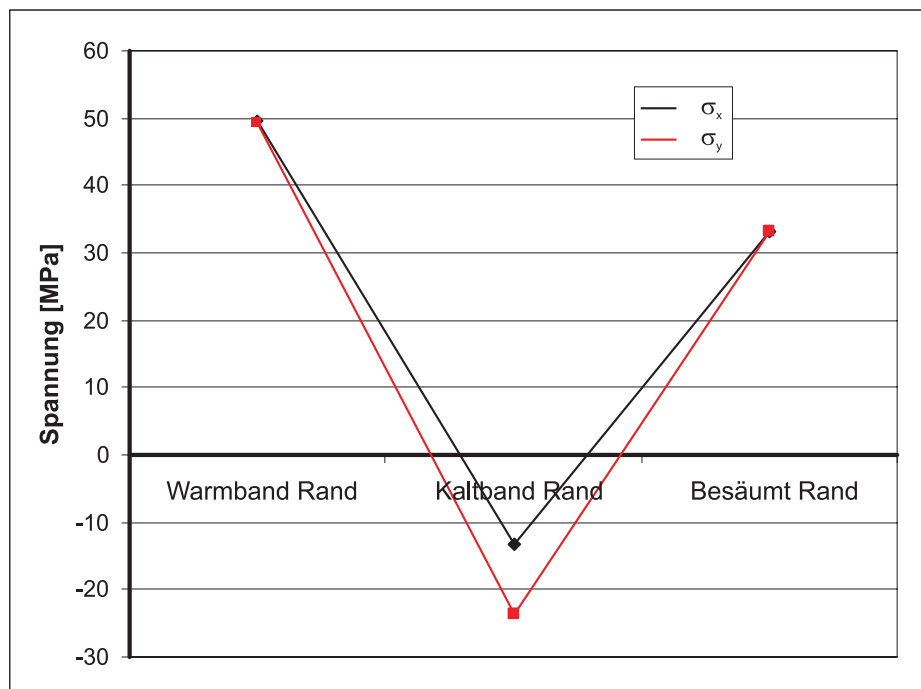


Abbildung 76: Vergleich der Eigenspannung unterschiedlicher Bearbeitungszustände am Rand der Bänder.

Dabei ergeben sich für das Warmband und das besäumte Band jeweils Zugspannungen. Das Kaltband zeigt hingegen leichte Druckspannungen am Rand.

In Abbildung 77 sind die Ergebnisse der Messung nach dem Bohrlochverfahren für die Messung in der Mitte des Bandes dargestellt.

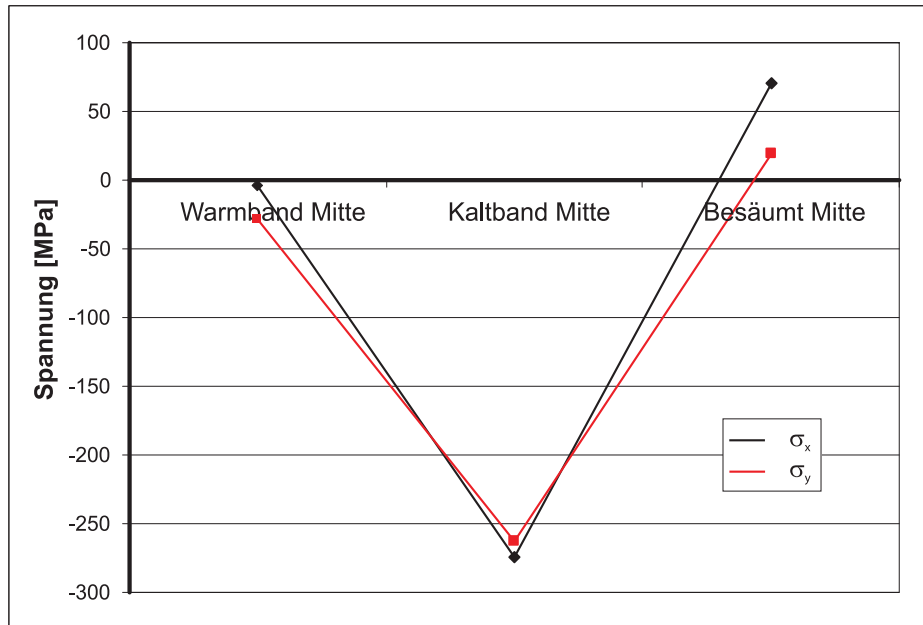


Abbildung 77: Vergleich der Eigenspannungen unterschiedlicher Bearbeitungszustände in der Mitte der Bänder.

Das Warmband zeigt in der Mitte sehr niedrige Druckeigenspannungen, während sich im besäumten Band auch in der Mitte Zugeigenspannungen ergeben. Das Kaltband zeigt wiederum Druckeigenspannungen, die allerdings in der Mitte um eine Zehnerpotenz höher sind als am Rand.

9.1.2 Messungen mit Aramis®

Wie in Kapitel 8.1.2 beschrieben wurden die Messungen an den Bändern in den unterschiedlichen Bearbeitungszuständen durchgeführt. Bei der Auswertung der Punkt-Punkt-Abstände für die Bearbeitungsstufe Kaltband ergab sich dabei folgendes Ergebnis.

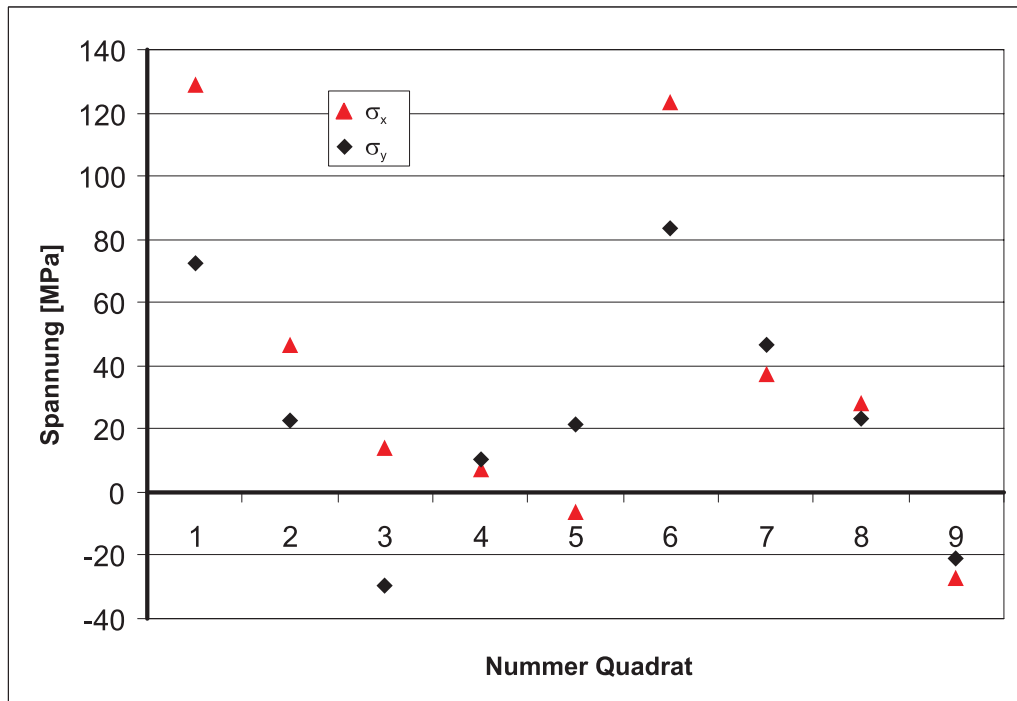


Abbildung 78: Vergleich der Eigenspannungen nach der Auswertung der Messungen mit Aramis[®] für das Kaltband.

Die Spannungen liegen in einem sehr niedrigen Bereich ($<50\text{MPa}$), nur die Quadrate 1 und 6 zeigen erhöhte Werte und es zeigen sich im Quadrat 9 reine Zugspannungen im Kaltband, während in Quadrat 3 und 5, sowohl Zug- als auch Druckspannungen auftreten.

In Abbildung 79 sind die Schnittdaten für die drei freigeschnittenen Stufen (Schnittfolgen), wie in Kapitel 8.1.2 beschrieben, für die Verschiebung „Epsilon x“, also quer zur Walzrichtung dargestellt (siehe Abb. 59).

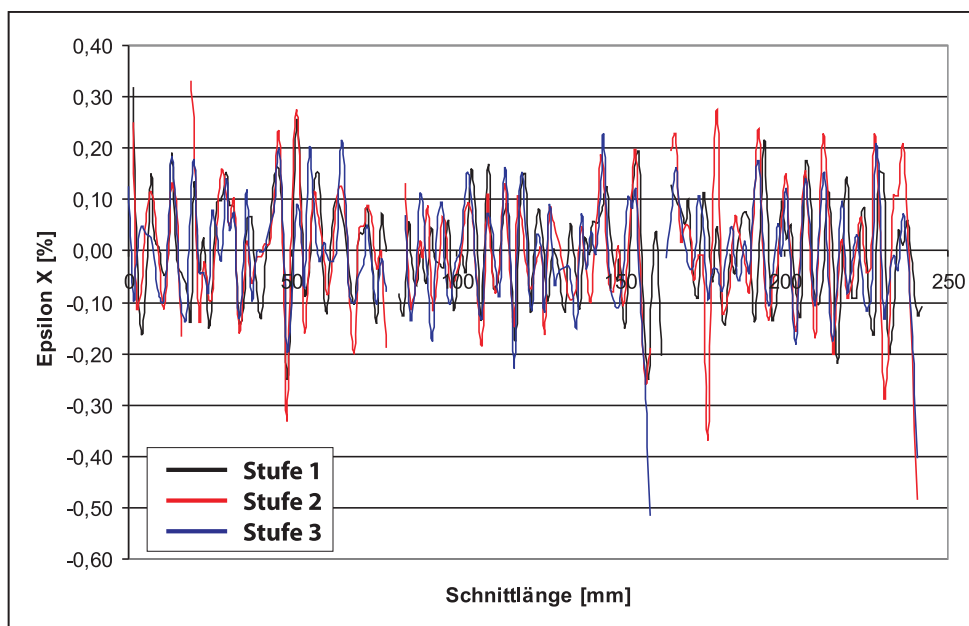


Abbildung 79: Vergleich der Schnittdaten in den drei Stufen aus der 3D-Ansicht für die Verschiebung „Epsilon X“.

Dabei lässt sich kein Unterschied zwischen den einzelnen Stufen erkennen. Es ist auch keine Aussage über darüber möglich, ob die Dehnungen mehrheitlich positiv oder negativ sind.

Die Schlussfolgerungen aus diesen Messungen werden in Kapitel 10.1 erläutert.

9.2 Untersuchung von Schneidlinien

9.2.1 Messung und Berechnung der Säbeligkeit

9.2.1.1 Messungen mit Aramis®

Wie in Kapitel 8.2.1.1 beschrieben, wurden die ersten Messungen an Schneidlinien durchgeführt. Dabei wurde mit Hilfe des optischen Messsystems Aramis® die Säbeligkeit vermessen und in den unterschiedlichen Bearbeitungszuständen verglichen.

Die Ergebnisse sind nun im folgenden für die Charge Nr. 3 dargestellt.

Es wurden fünf unterschiedliche Bearbeitungszustände analysiert, die in Tabelle 14 aufgelistet sind.

Nr.	Bearbeitungszustand
1	Unbearbeitet
2	CF geschabt
3	CFDB geschabt

4	nach Härten
5	Endprodukt

Tabelle 14: Die bei der Charge Nr. 3 untersuchten Bearbeitungszustände.

CF...Doppelseitige Fase

CFDB...Vierer- oder Facettenschliff

In Abbildung 80 sind die Längenänderungen der vermessenen Linien in % dargestellt. Auf der x-Achse ist der Abstand von der Schneide in mm aufgetragen. Es wurde die prozentuale Längenänderung von 4, zur Schneide parallelen, Linien ausgewertet. Die Auswertung erfolgte wie in Kapitel 8.2.1.1 beschrieben.

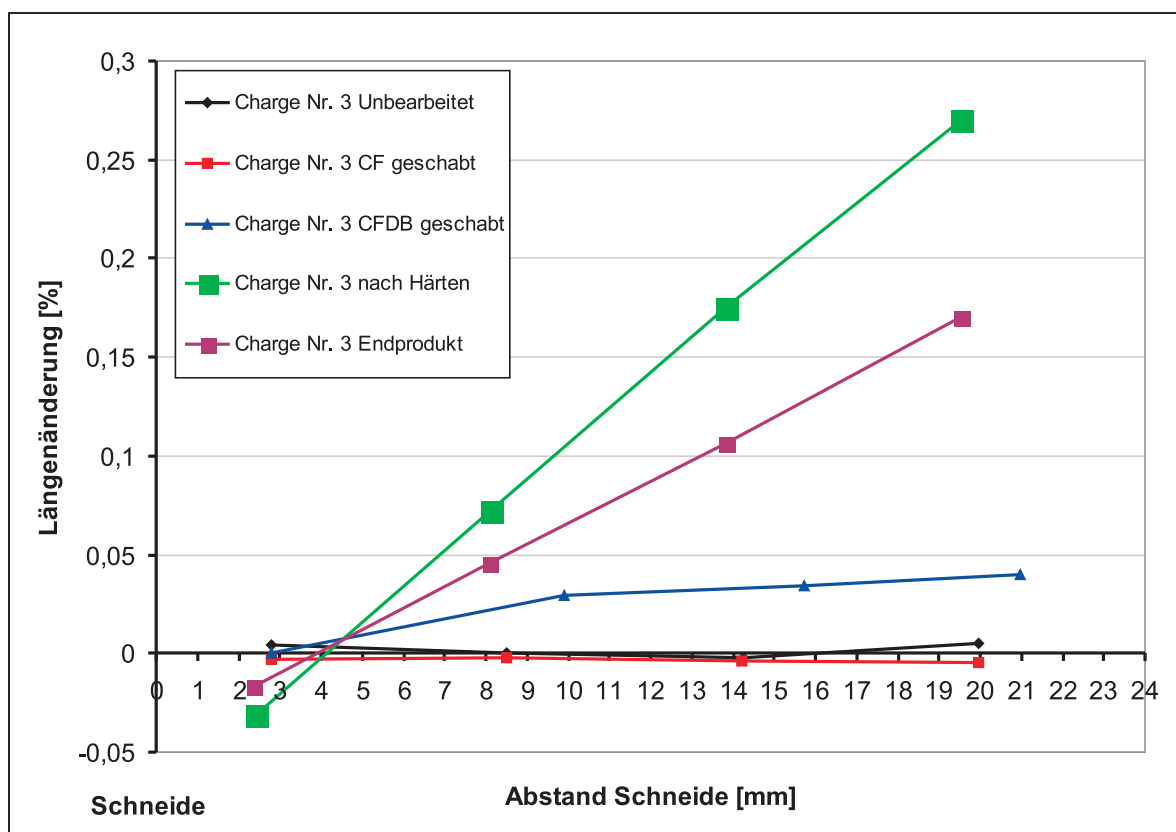


Abbildung 80: Vergleich der Längenänderung bei Freischeiden der Eigenspannungen in den unterschiedlichen Bearbeitungszuständen der Schneidlinien der Charge Nr. 3.

Es zeigt sich eindeutig, dass die Bearbeitungsstufen „nach Härten“ und „Endprodukt“, bei Entnahme von Material an der Rückseite der Schneidlinie, die größten Längenänderungen zeigen und daher auch den größten Säbel bilden (wie in Abb. 60 dargestellt.)

Bei den Untersuchungen der Schneidlinien der Charge Nr. 4 wurden nur drei Bearbeitungszustände untersucht. Sie sind in Tabelle 15 aufgelistet.

Nr.	Bearbeitungszustand
1	Unbearbeitet
4	Nach Härten
5	Nach Härten und Anlassen

Tabelle 15: Die bei der Charge Nr. 4 untersuchten Bearbeitungszustände.

In Abbildung 81 sind die Längenänderungen der vermessenen Linien in % dargestellt. Auf der x-Achse ist wiederum der Abstand von der Schneide in mm aufgetragen. Es wurde die prozentuale Längenänderung von 4, zur Schneide parallelen, Linien ausgewertet.

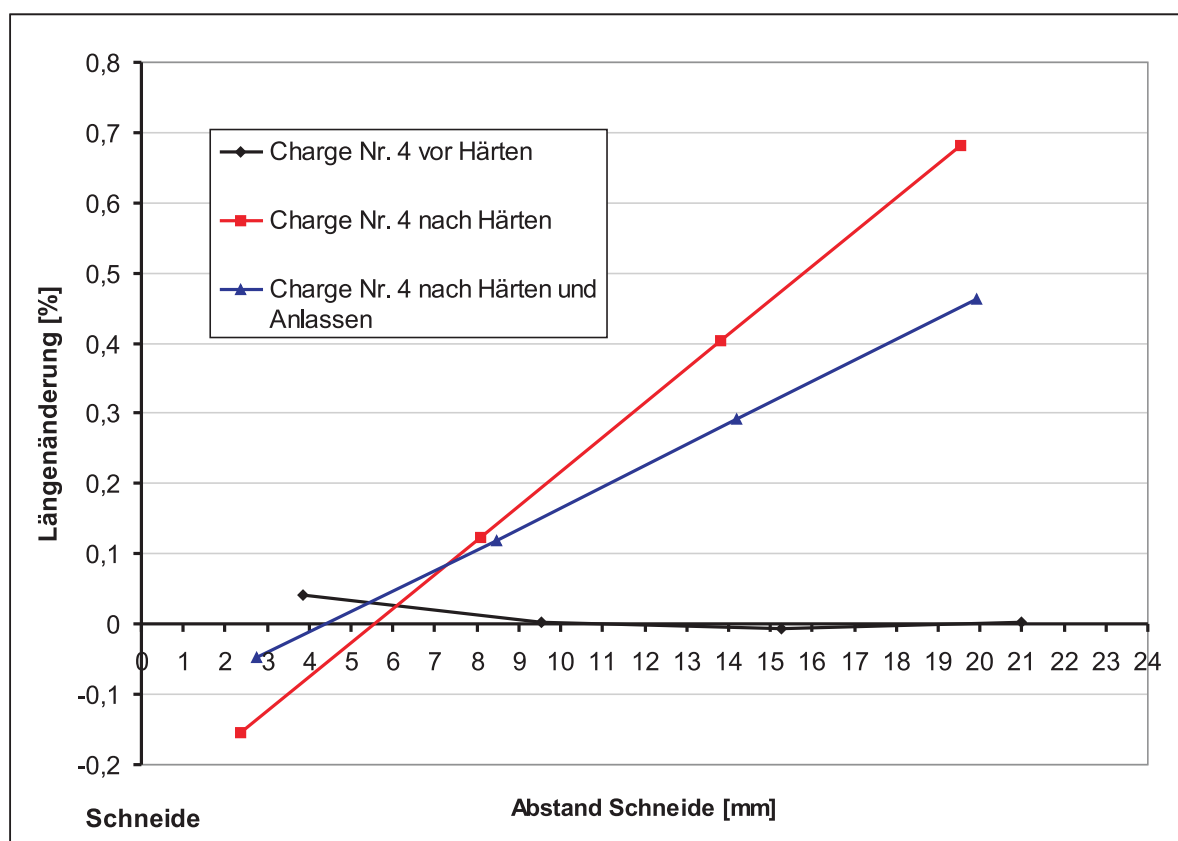


Abbildung 81: Vergleich der Längenänderung bei Freischeiden der Eigenspannungen in den unterschiedlichen Bearbeitungszuständen der Schneidlinien der Charge Nr. 4.

Wie schon bei den Schneidlinien der Charge Nr. 3 zeigt sich, dass die Bearbeitungsstufen „nach Härten“ und „nach Härten und Anlassen“, bei Entnahme von Material an der Rückseite der Schneidlinie, die größten Längenänderungen zeigen und daher auch den größten Säbel bilden (wie in Abb. 60 dargestellt.)

In Abbildung 82 ist die Produktionsstufe „nach Härten“ für die analysierten Chargen im Vergleich dargestellt.

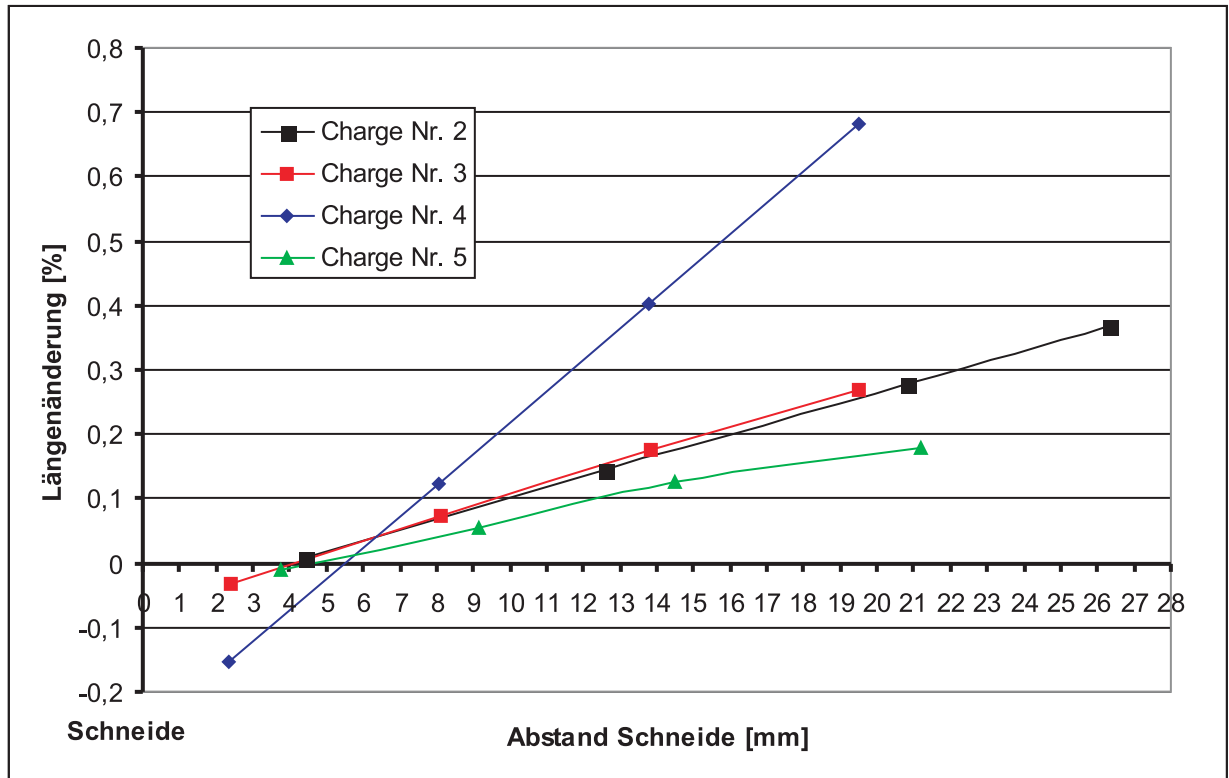


Abbildung 82: Vergleich der Längenänderung bei Freischeiden der Eigenspannungen im Bearbeitungszustand „nach Härten“ der Schneidlinien.

Die genaue Interpretation und Analyse dieser Ergebnisse findet sich in Kapitel 10.

9.2.1.2 Ergebnisse der FEM-Berechnung der Säbeligkeit

Die Ergebnisse der Berechnung der Säbeligkeit mit DEFORM sind in Abbildung 83 dargestellt.

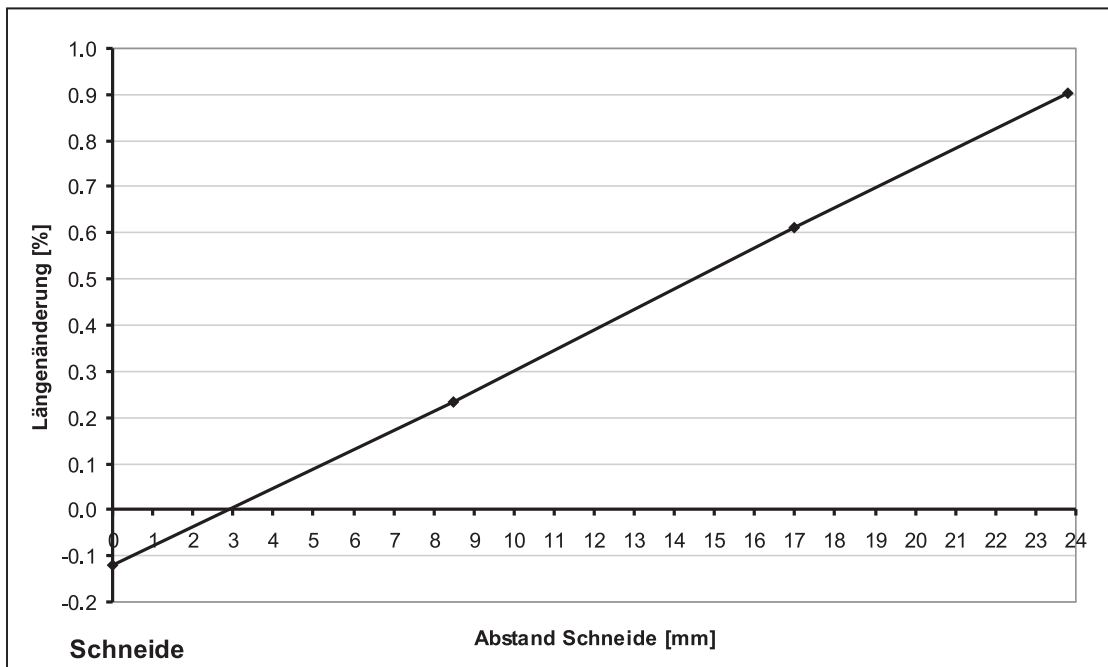


Abbildung 83: Längenänderung bei Entnahme von Material an der Rückseite einer Schneidlinie in einer Simulation mit DEFORM.

Eindeutig ist wiederum die Verkürzung der Schneide und die Verlängerung an der Rückseite der Schneide zu erkennen.

In Abbildung 84 sind die Ergebnisse der Berechnung der Säbeligkeit mit DEFORM und die Ergebnisse der Messung mit Aramis[®] für die Charge Nr. 4 für den Zustand nach dem Härten gegenübergestellt.

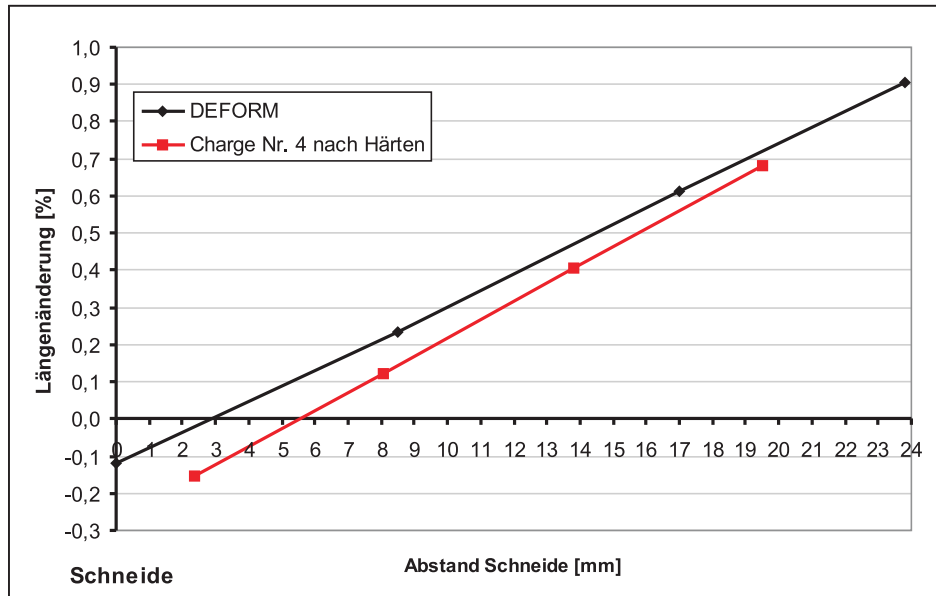


Abbildung 84: Vergleich der Längenänderung einer Schneidlinie bei Materialentnahme auf der Rückseite zwischen DEFORM und Aramis[®].

Die beiden Messungen zeigen eine gute Übereinstimmung, wobei in DEFORM ein etwas größerer Säbel berechnet wird.

9.2.2 Röntgenverfahren

Die Messung der Eigenspannungen nach dem Röntgenverfahren wurde gemäß der Beschreibung in Kapitel 8.2.2 durchgeführt.

Die Ergebnisse der Messung des Spannungsverlaufs quer zur Walzrichtung der Schneidlinie mit Hilfe des Röntgenverfahrens sind in Abbildung 86 dargestellt.

In den nachfolgenden Abbildungen wird die Bezeichnung der Richtungen laut Abbildung 85 festgelegt.

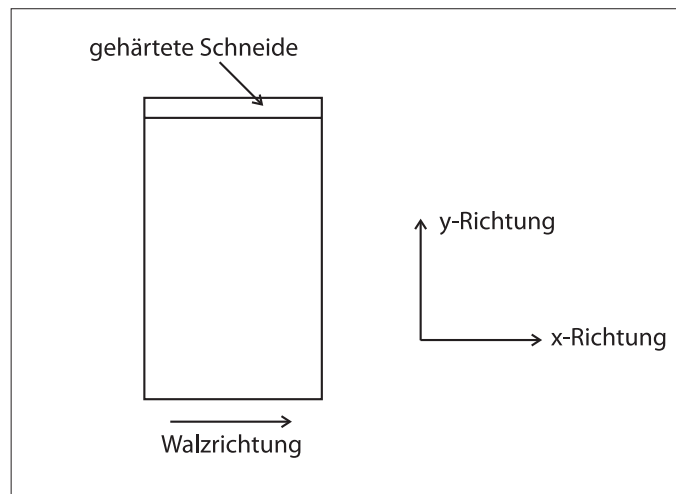


Abbildung 85: Bezeichnung der Spannungsrichtungen.

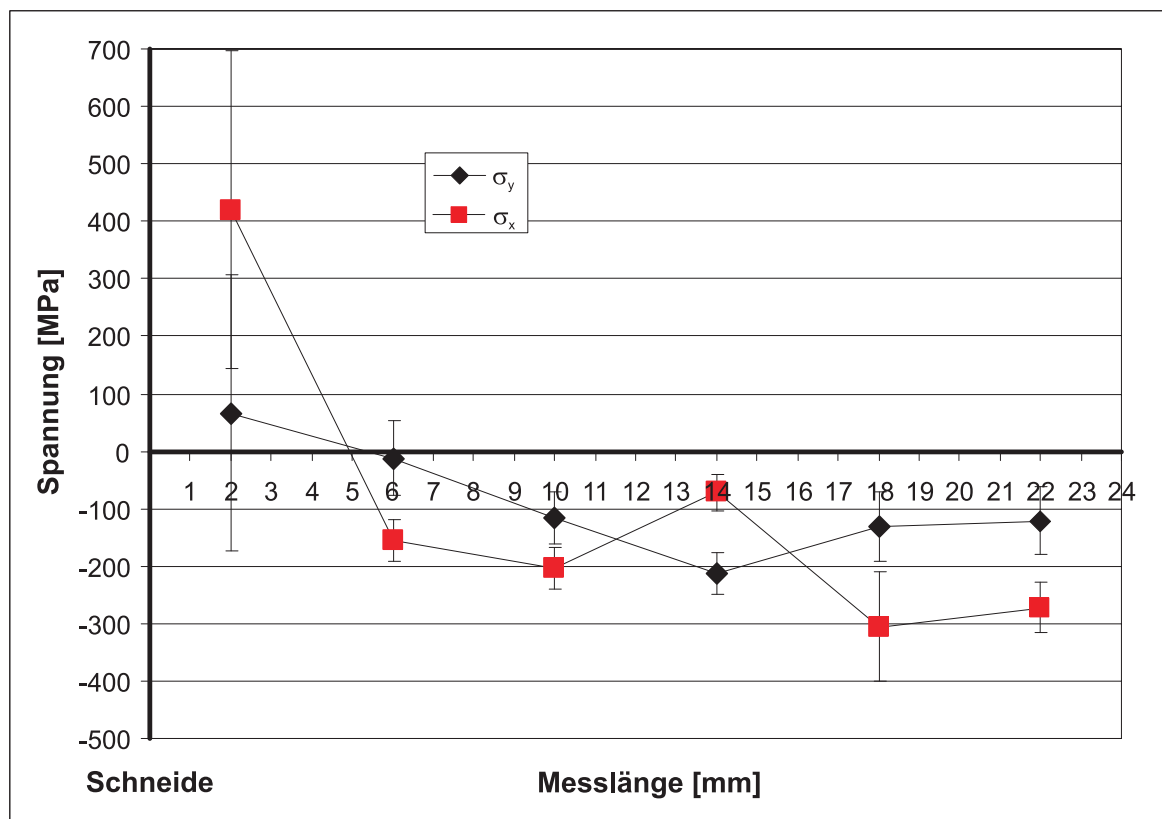


Abbildung 86: Verlauf der Eigenspannungen quer zur Walzrichtung gemessen mit dem Röntgenverfahren.

Es wurden sechs Messpunkte quer zur Walzrichtung analysiert (siehe Kap. 8.2.2). Der Verlauf der Eigenspannungen zeigt dabei an der Schneide starke Zugeigenspannungen. Im

Abstand von etwa 5mm bzw. 6mm wechselt der Spannungsverlauf in den Druckspannungsbereich.

9.2.3 Bohrlochverfahren

Die Messung der Eigenspannungen nach dem Bohrlochverfahren wurde, wie in Kapitel 8.2.3 beschrieben, durchgeführt. In Abbildung 87 sind die Ergebnisse ersichtlich.

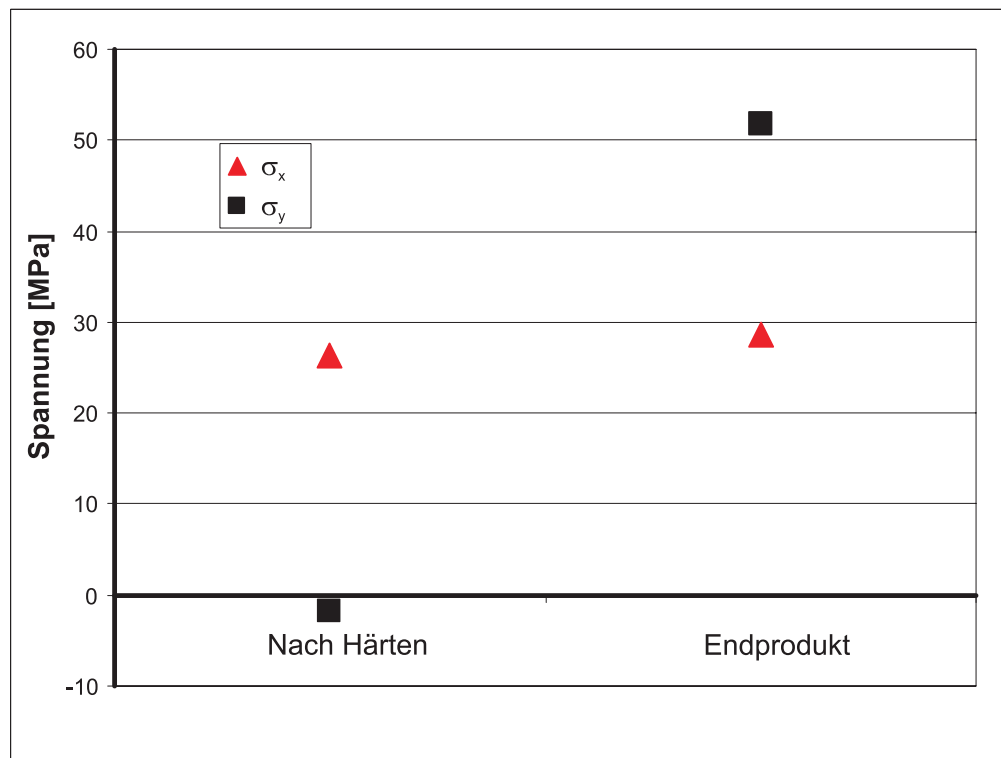


Abbildung 87: Ergebnis der Bohrlochmessung der Schneidlinie der Charge Nr. 3 in zwei Bearbeitungszuständen (nach dem Härten und Endprodukt).

Bei beiden Produktionsstufen wurden Zugeigenspannungen in der Mitte der Schneidlinie gemessen.

9.2.4 Zerlegeverfahren

9.2.4.1 Auswertung mit Aramis®

Die Eigenspannungen der Schneidlinien wurden, wie in Kapitel 8.2.4 erläutert, nach dem Zerlegeverfahren gemessen. Bei der Auswertung der Ergebnisse mit Aramis® wurde in einem ersten Schritt, die Verschiebung der berechneten Facettenmittelpunkte in x- und y-Richtung analysiert.

In Abbildung 88 ist die 3D-Ansicht der linken Seite der freigeschnittenen Schneidlinie dargestellt.

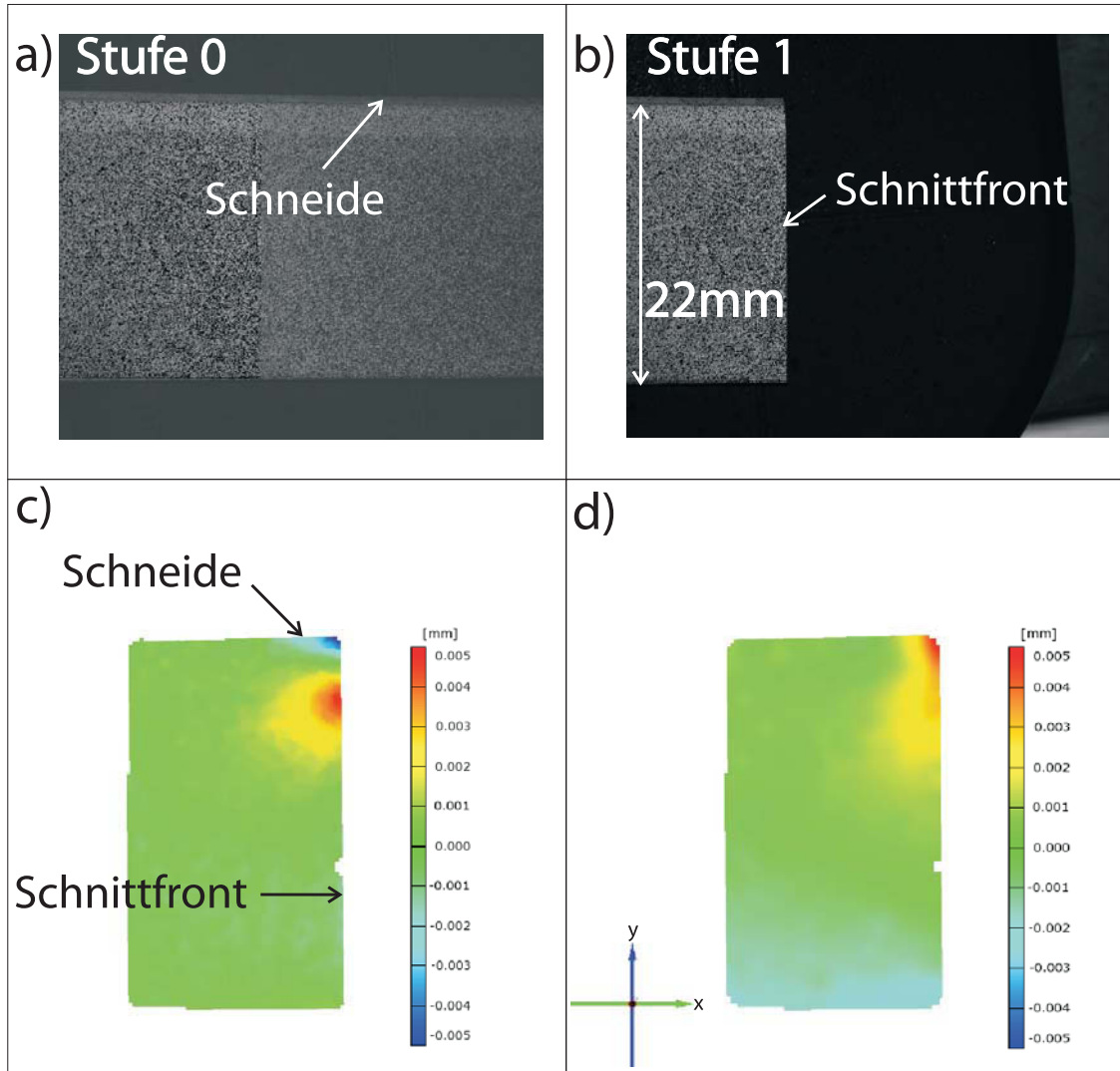


Abbildung 88: Verschiebung nach dem Freischneiden der Schneidlinie in x- und y-Richtung gemessen mit Aramis®. a) zeigt die Schneidlinie vor dem Zerlegen, b) zeigt die linke Seite der Schneidlinie, nach dem Zerlegen, c) stellt die Verschiebung der Punkte in x-Richtung und d) die Verschiebung in y-Richtung dar.

Bei der Betrachtung der Verschiebung in x-Richtung (Abb. 88c) zeigt sich, dass 4,5mm unterhalb der Schneide, an der Schnittfront ein lokales Maximum der Verschiebung in x-Richtung entsteht. Zur genaueren Bestimmung dieses Maximums wurde eine Schnittebene in 0,6mm Abstand parallel zur Schnittfront gelegt und die Schnittdaten ermittelt. Abbildung 89 zeigt den Verlauf der ermittelten Schnittdaten.

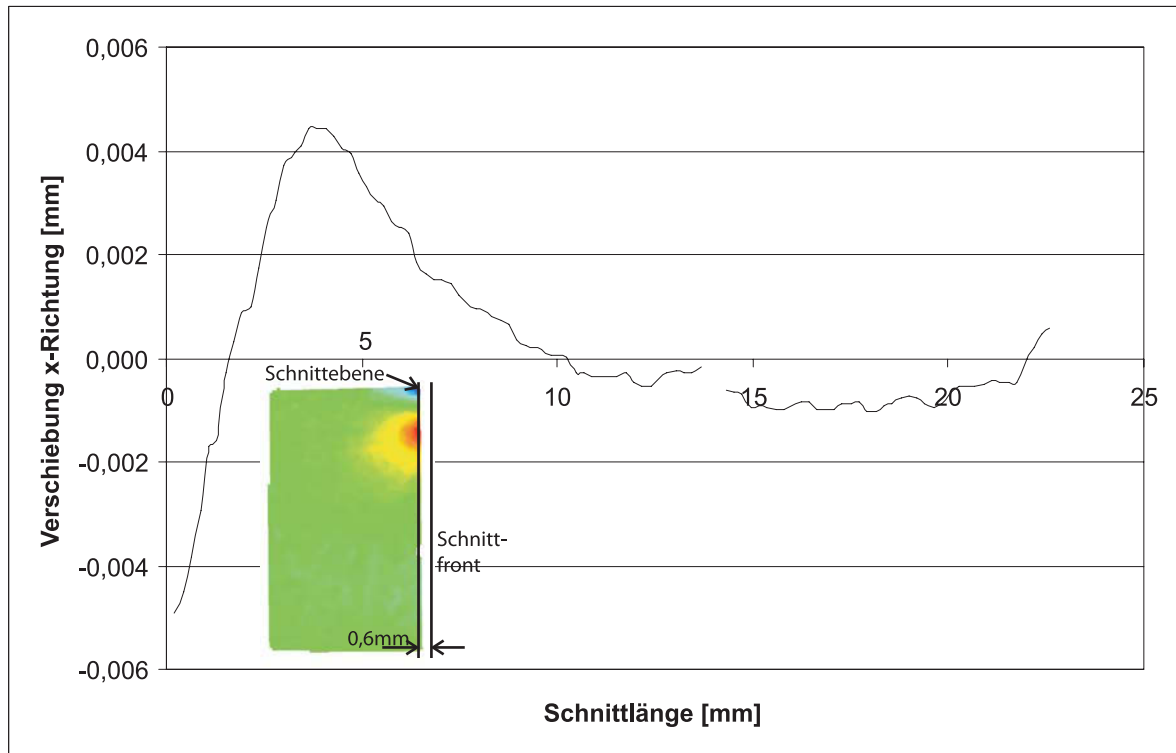


Abbildung 89: Verschiebungen in x-Richtung entlang der Schnittebene nach dem Freischneiden der Schneidlinie. Der Schnitt verläuft parallel zur Schnittfront in einem Abstand von 0,6mm und beginnt an der Schneide.

Weiters wurde eine Schnittebene parallel zur Schneide in einem Abstand von 4,5mm gelegt. Der Verlauf dieser Schnittdaten ist in Abbildung 90 dargestellt.

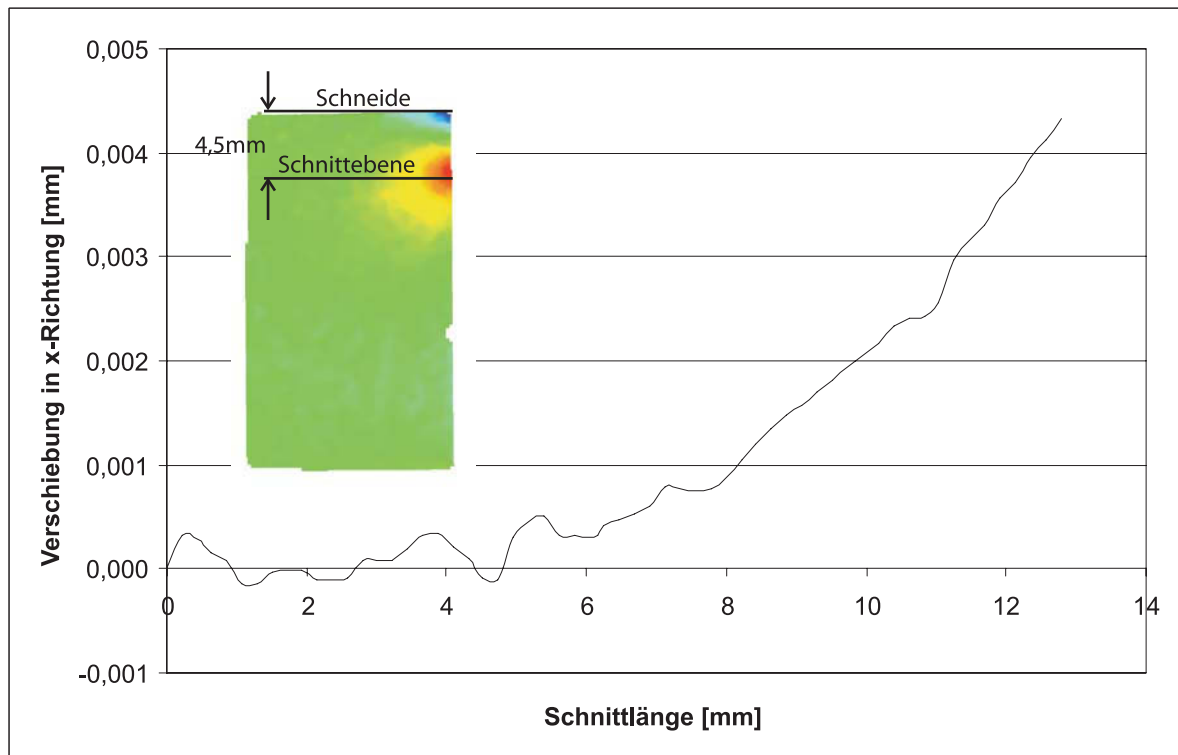


Abbildung 90: Verschiebung in x-Richtung entlang der Schnittebene nach dem Freischneiden der Schneidlinie. Der Schnitt verläuft parallel zur Schneide in einem Abstand von 4,5mm und beginnt links.

Die Ergebnisse werden in Kapitel 10 analysiert und diskutiert.

9.2.4.2 Spannungsberechnung mit Abaqus

Der Spannungsverlauf, der sich aufgrund der mit Aramis[®] ermittelten Verschiebungen der einzelnen Messpunkte in x- und y- Richtung ergibt, wurde wie in Kapitel 8.2.4.2 beschrieben mit Abaqus berechnet. In Abbildung 91 ist das Ergebnis der Berechnung der Spannungen σ_x und σ_y entlang der Schnittfront zu sehen.

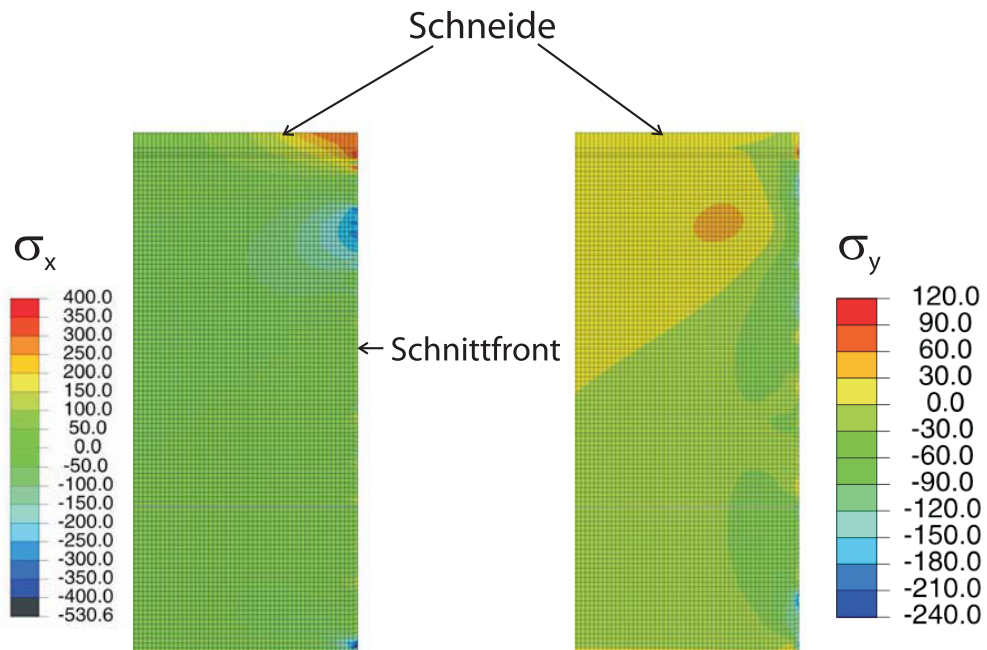


Abbildung 91: Mit Abaqus berechnete Spannungen σ_x und σ_y aufgrund der mit Aramis[®] gemessenen Verschiebungen.

Der daraus an der Schnittfront ermittelte Spannungsverlauf ist in Abbildung 92 dargestellt.

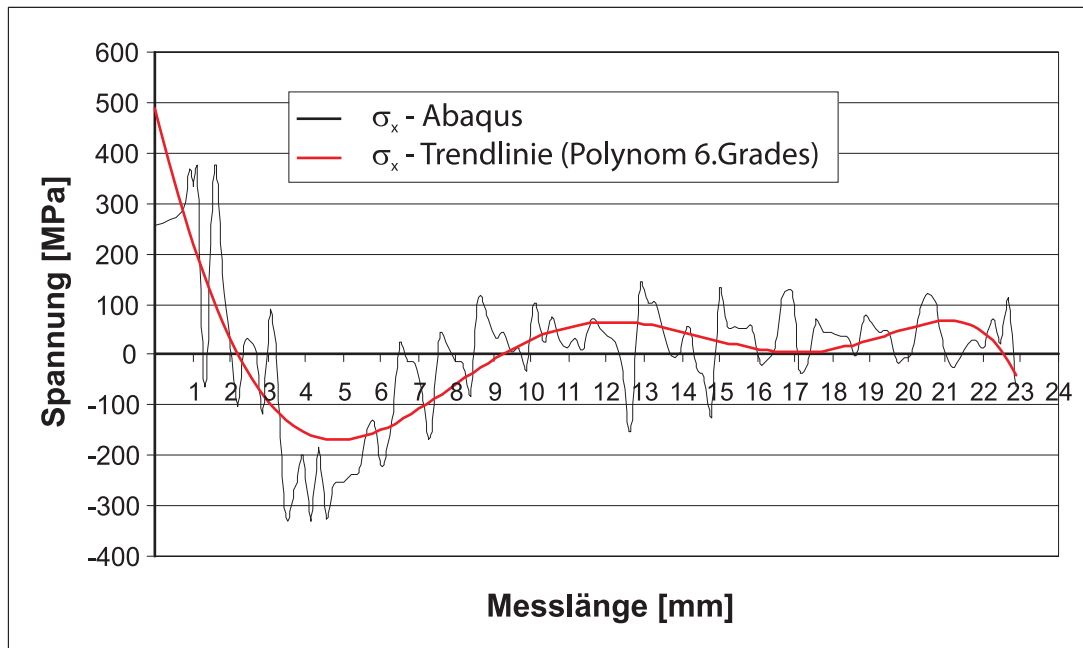


Abbildung 92: Verlauf der mit Abaqus berechneten Spannungen in x-Richtung.

Hierbei ist der Verlauf der Spannungen in x-Richtung (Walzrichtung) zu sehen. Weiters wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit eine Trendlinie durch die Messpunkte gelegt. Es handelt sich dabei um ein Polynom 6.Grades.

Ebenso wurde der Spannungsverlauf in y-Richtung (Quer zur Walzrichtung) ausgewertet. Der ermittelte Verlauf und die daraus berechnete Trendlinie, ebenfalls ein Polynom 6.Grades, sind in Abbildung 93 dargestellt.

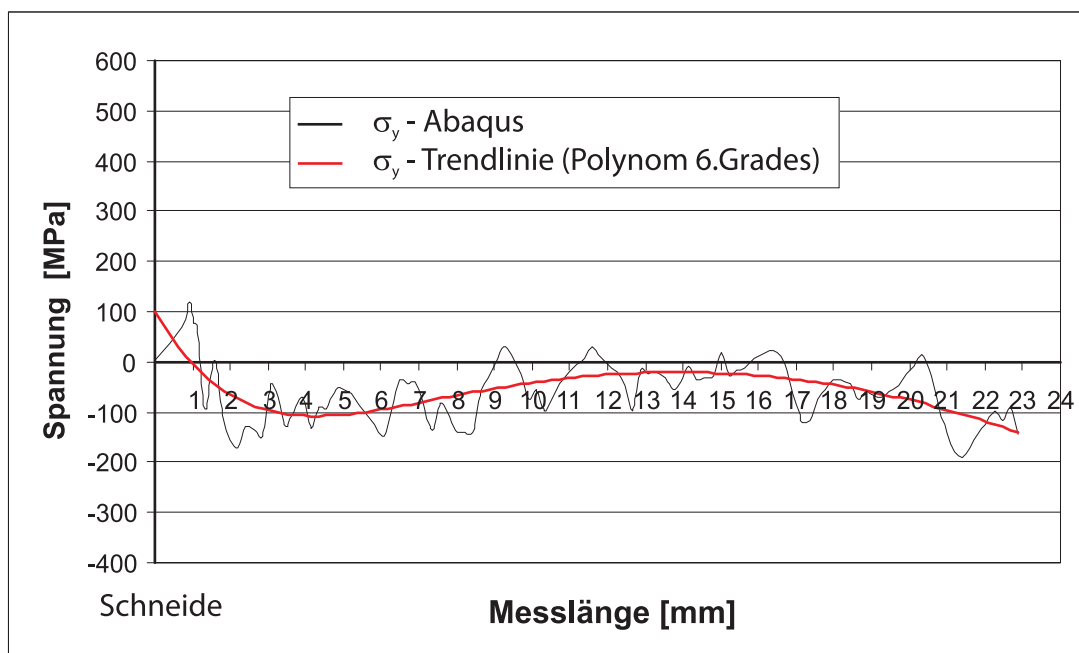


Abbildung 93: Verlauf der mit Abaqus berechneten Spannungen in y-Richtung.

In beiden Richtungen zeigen sich an der Schneide Zugspannungen, die im weiteren Verlauf in Druckspannungen wechseln. Die Spannungen in y-Richtung bleiben bis zur Rückseite im Druckspannungsbereich, die Spannungen in x-Richtung wechseln im Gegensatz dazu wieder in den Zugspannungsbereich.

9.2.5 Vergleich der Aramis[®]- mit den Röntgenmessungen

Beim Vergleich des Spannungsverlaufs in x-Richtung (Walzrichtung) der Messungen nach dem Röntgenverfahren und den Ergebnissen, welche die Untersuchungen nach dem Zerlegeverfahren geliefert haben (siehe Abb. 94) zeigt sich folgendes Bild.

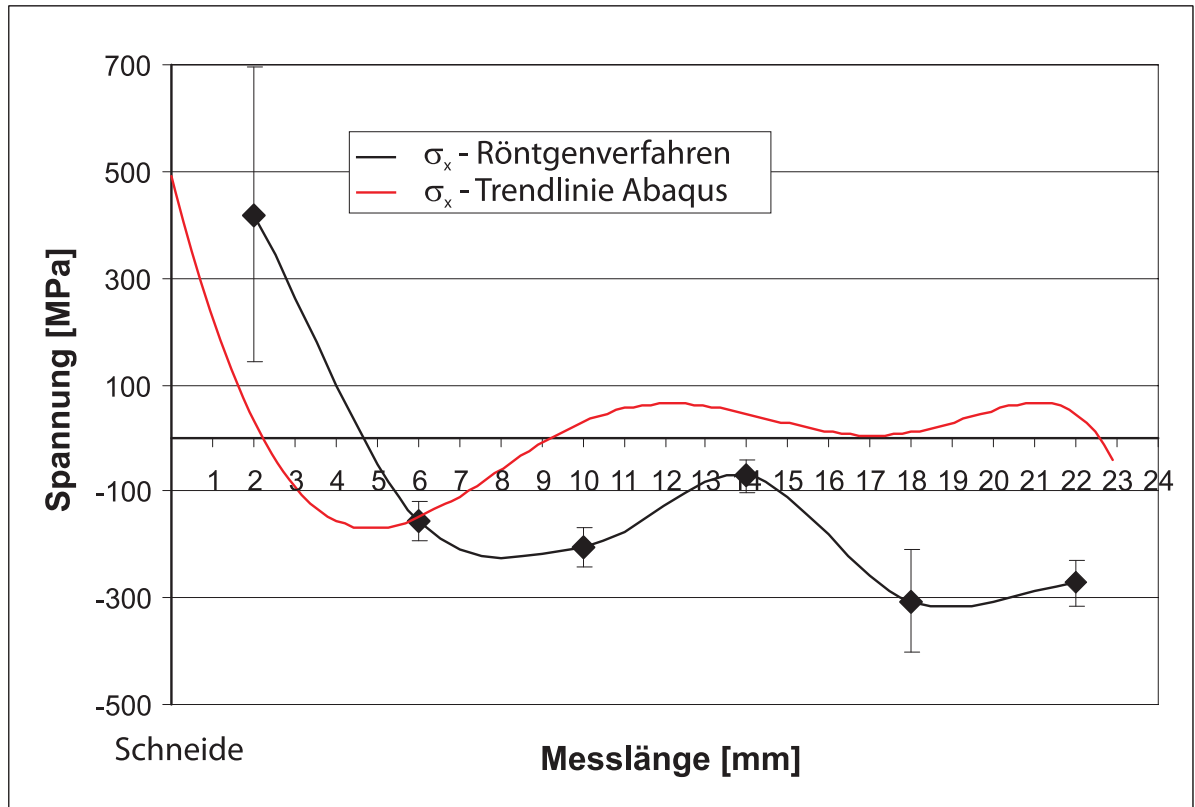


Abbildung 94: Vergleich des mit Abaqus berechneten und des mit der Röntgenmethode gemessenen Spannungsverlaufs quer zur Schneidlinie.

Die Ergebnisse werden in Kapitel 10.6 näher diskutiert.

10 Diskussion

In dieser Arbeit wurden verschiedene Hypothesen und Ansätze zur Messung von Eigenspannungen in Blechbändern abgearbeitet. Dazu wurde versucht in ersten Messungen das optische Messsystem Aramis[®] zur Bestimmung von Dehnungen in freigeschnittenen kaltgewalzten Bändern zu verwenden. Im nächsten Schritt wurde Aramis[®] dazu verwendet die Säbeligkeit von sogenannten Schneidlinien zu ermitteln. Als Vergleich wurde der Säbel auch in einer Simulation nachgerechnet. Als letzter Schritt wurde versucht direkt mit Aramis[®] Verschiebungen an der Schnittfront von Schneidlinien zu erfassen und anschließend mit Hilfe einer numerischen Berechnung den Eigenspannungsverlauf auszugeben.

10.1 Messung der Eigenspannungen in kaltgewalzten Bändern

Die Messung der Eigenspannungen in kaltgewalzten Bändern nach der Bohrlochmethode zeigte starke Unterschiede in der Größe und auch in der Richtung der Spannungen in den verglichenen Produktionsstufen. Das Warmband hatte erwartungsgemäß nur sehr geringe Spannungen, hingegen ergab sich beim Kaltband ein sehr hohes Spannungsniveau. Im besäumten Zustand konnten diese Spannungen aber wieder abgesenkt werden. Da das Band nach jedem Walzstich gegläht wird, ist das Sinken der gemessenen Eigenspannungen zu erwarten und natürlich auch beabsichtigt.

Hinsichtlich der Anwendbarkeit der Bohrlochmethode lässt sich festhalten, dass sich die untersuchten Bänder sehr gut für diese Art der Untersuchung eignen. Die Bohrlochfräse kann überall am Blech nach den Vorgaben der Norm positioniert werden. Das Anbringen der Bohrlochrosetten gestaltet sich ebenfalls als gut durchführbar.

Der Nachteil der Bohrlochmethode liegt allerdings in der punktuellen Erfassung der Eigenspannungen. Um den Eigenspannungszustand eines Bandes mit dieser Dimension (ca.1000x400mm) sauber zu erfassen, wäre es nötig, eine wesentlich höhere Anzahl an Bohrlochrosetten zu kleben. Dies steigert aber die Kosten als auch den Zeitaufwand enorm.

In einem neuen Ansatz wurde versucht das optische Messsystem Aramis[®] zur Messung der Eigenspannungen in kaltgewalzten Bändern zu verwenden. In Kombination mit dem Zerlegeverfahren wurde versucht, die durch das Freischneiden entstandenen Dehnung zu erfassen und in Spannungen umzurechnen. Die analysierte Produktionsstufe Kaltband zeigte sehr niedrige Spannungswerte bis auf zwei Quadrate, die erhöhte Werte lieferten (siehe Abb. 78).

Im Vergleich zum Bohrlochverfahren konnten keine Übereinstimmungen in den Ergebnissen gefunden werden. Da auch schon die Messung mit dem Bohrlochverfahren eine starke Streuung der Ergebnisse zeigte, ist es im Vergleich mit Aramis[®] nicht möglich, klare Aussagen über die Zuverlässigkeit der Werte zu treffen.

Bei Betrachtung der 3D-Auswertung mit Aramis[®], wie in Abbildung 79 dargestellt, ergeben sich für die einzelnen Schnitte keine Unterschiede in der Dehnung. Die drei ein-

gezeichneten Kurven lassen keine Aussagen über möglicherweise durch das Freischneiden entstandene Dehnungen oder Spannungsrelaxationen zu.

Der Grundgedanke war, dass die Messung und Auswertung mit dem Aramissystem eine flächige Berechnung der Dehnungen ermöglicht. Dies ist nicht möglich, da die Kalibrierung für die Größe der Blechbänder zu groß ist, als dass Spannungen bzw. Dehnungen zuverlässig erfasst werden können.

Vor allem die am stärksten relaxierenden Randbereiche zeigen mit Aramis® die höchste Fehlerquote und auch das Muster wird hier durch das Schneiden mit der Wasserstrahl-schneidanlage am meisten beschädigt.

10.2 Messung der Säbeligkeit

Die Messung der Säbeligkeit mit dem optischen Messsystem Aramis® ist in Kapitel 8.2.1.1 genau beschrieben. Die Ergebnisse sind in Kapitel 9.2 dargestellt. Dabei zeigte sich beim Vergleich der einzelnen Produktionsstufen, dass sich nach dem Härten der Schneide der größte Säbel ausbildet. Auch im Endprodukt, d.h. nach dem Härten und Anlassen der Schneide, ist noch ein deutlicher Säbel messbar.

Die Säbelbildung in diesen beiden Bearbeitungsstufen zeigt eindeutig, dass beim Härten die größten Eigenspannungen in den Schneidlinien induziert werden. Das Anlassen der Schneide kann die Säbelbildung und den Betrag der Eigenspannungen noch reduzieren, dennoch führt eine Materialentnahme auf der Rückseite der Schneidlinie zu massivem Verzug.

Da die Schneidlinie bei einer Materialentnahme an der Rückseite, also bei einem Eingriff in den vorhandenen Eigenspannungszustand, immer einen Säbel in Richtung „Schneide kurz“ ausbildet, lässt sich daraus schließen, dass in der gehärteten Schneide Zugspannungen wirksam sein müssen. Diese Zugeigenspannungen sind dafür verantwortlich, dass sich die Schneide verkürzt, sobald Material an der Rückseite entnommen wird.

Nach den theoretischen Überlegungen in Kapitel 2.4 sollten sich, aufgrund der martensitischen Umwandlung und der damit verbundenen Volumendilatation, eigentlich Druckspannungen in der Schneide bilden.

Doch die restlichen Einflussgrößen, wie z.B. die Umwandlungsplastizität oder die Wärmedehnung, haben ebenfalls einen wesentlich Einfluss auf die Bildung der Eigenspannungen, sodass sich letztendlich keine Druck-, sondern Zugspannungen in der Schneide bilden und somit eine Säbelbildung verursachen.

Einen genauen Aufschluss über den Spannungsverlauf quer zur Schneide sollten Messungen nach der Röntgenmethode bringen.

10.3 Röntgenverfahren

Um Vergleichswerte für den Spannungszustand zu generieren wurden Messungen nach der Röntgenmethode an den Schneidlinien durchgeführt. Die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 9.2.2 dargestellt.

Die ermittelten Eigenspannungen zeigten dabei den erwarteten Verlauf. Es ergaben sich beim Messpunkt, der am nächsten zur Schneide liegt, Zugspannungen, die im weiteren Verlauf an die Rückseite der Schneidlinie zuerst in Druckspannungen wechseln und zur Rückseite hin, wieder in leichte Zugspannungen umschlagen.

Ein wesentlicher Nachteil des Röntgenverfahrens ist der sehr große Fehlerbalken, speziell im Bereich nahe der Schneide (siehe Abb. 86).

10.4 Bohrlochverfahren

Des Weiteren wurden Messungen nach der Bohrlochmethode durchgeführt. Die Ergebnisse der Bohrlochmethode (siehe Kap. 9.2.3) lassen aber keine Rückschlüsse auf den Spannungsverlauf in der analysierten Schneidlinie zu. Da die Messung rein punktuell erfolgte, ist es nur möglich, den Spannungszustand genau in der Mitte der Schneidlinie zu bestimmen. Daher diene diese Messung zur Generierung eines Vergleichswertes.

Beim Vergleich der Messpunkte in der Mitte der Schneide konnte keine Übereinstimmung der Werte gefunden werden. Die Bohrlochmethode ergab leichte Zugspannungen (ca. 0-50MPa), während die Messung nach der Röntgenmethode Druckspannungen im Bereich von ca. 150MPa ergab (siehe Abb. 86 und Abb. 87).

10.5 Zerlegeverfahren

Zur Bestimmung der lokalen Dehnungen nach dem Freischneiden der Schneidlinie wurde erstmals das optische Messsystem Aramis[®] verwendet. Die Auswertung der Verschiebung in x-Richtung zeigte ein deutliches Maximum 4,5mm unterhalb der Schneide (siehe Abb. 89 und 90) und ein Minimum direkt an der Schneide (siehe Abb. 90).

Die negative Verschiebung unmittelbar an der Schneide selbst lässt den Rückschluss zu, dass im Zustand vor dem Freischneiden, hier Zugeigenspannungen wirksam gewesen sind. Nach dem Freischneiden dieser Spannungen, kann das Material nun relaxieren und sich zurückziehen.

Genau umgekehrt verhält es sich bei dem lokalen Maximum 4,5mm unterhalb der Schneide. Da die Verschiebung positiv ist, müssen im ursprünglichen Zustand Druckspannungen vorgeherrscht haben, die nun nach dem Relaxieren eben diese positive Verschiebungen im Material verursachen.

10.6 Vergleich der optischen Dehnungsmessung mit der Röntgen-Messung

Wie in Abbildung 94 zu sehen, liefern beide Analysen die schon erwähnten Zugspannungen direkt an der Schneide, die im weiteren Verlauf in Druckspannungen wechseln. Allerdings geschieht dies beim Röntgenverfahren etwa 4,7mm unterhalb der Schneide, während es beim mit Abaqus berechneten Spannungsverlauf schon bei ca. 2,1mm passiert.

Bei dem mit Abaqus berechneten Eigenspannungsverlauf ergibt sich auch wieder eine Umkehr in leichte Zugspannungen an der Rückseite der Schneide, während die Messung nach der Röntgenmethode an der Rückseite Druckspannungen zeigt.

Eine mögliche Ursache für diese starke Abweichung kann in den, in beiden Verfahren vorhandenen, starken Messfehlern bzw. Fehlerquoten liegen.

10.7 Gesamtbetrachtung

Die Betrachtung des Produktionsprozesses der Schneidlinien und die Messungen der Säbeligkeit (siehe Kap. 9.2) zeigten schon, dass das Härten der Schneide den größten Einfluss auf den Eigenspannungszustand in der Schneidlinie nimmt. Es kommt dabei, wie in Kapitel 2.4 beschrieben, zum Zusammenspiel mehrerer Einflussgrößen. Zum einen spielt die Dilatation eine große Rolle, weiters nimmt auch die Umwandlungsplastizität großen Einfluss bei der Bildung von Spannungen, ebenso wie der Aufheiz- und Abkühlvorgang.

Die Ausbildung der Zugspannungen in der Schneide ergibt sich durch das Zusammenspiel eben dieser Einflussgrößen. Zum einen spielt es eine Rolle, dass nur ein sehr kleiner Teil der Schneidlinie aufgeheizt wird. Beim Aufheizen dieses vergleichsweise kleinen Bereichs dehnt sich das Material grundsätzlich aus, aber da es ein Kontinuum mit der restlichen Schneidlinie bildet, die nicht erhitzt wird, kann diese Ausdehnung nicht stattfinden.

Die Konsequenz aus der Behinderung der Dehnung sind natürlich Spannungen. Diese Spannungen werden aber nicht aufrechterhalten, da es zur Plastifizierung des Materials an der Schneide kommt. Denn durch die hohe Temperatur sinkt die Streckgrenze stark ab und die durch die Wärmedehnung entstandenen Spannungen werden abgebaut.

Nach dem Aufheizen sind daher die Spannungen, die durch den Aufheizprozess selbst entstehen, zum Großteil nicht mehr vorhanden. Im Anschluss an den Aufheizprozess wird die Schneide gekühlt, was einerseits dazu führt, dass es zu einer Verkürzung in der abgekühlten Schneide kommt, aber andererseits auch zu einer Längenänderung aufgrund der Umwandlung von Austenit in Martensit und der damit verbundenen Volumendilatation.

Eine grobe Schätzung der Verkürzung durch das Abkühlen und der Verlängerung durch Volumendilatation zeigt, dass die Dehnung durch die Umwandlung wesentlich kleiner ist.

Denn wie in Kapitel 2.4 angeführt, kann die durch Dilatation entstandene Dehnung ungefähr mit $\epsilon_{11}^q = \epsilon_{22}^q = \epsilon_{33}^q = 0,003$ abgeschätzt werden. Die Dehnung bzw. Verkürzung

aufgrund eines bestimmten ΔT , die im betrachteten Fall $\Delta T = -900$ beträgt, ergibt hingegen eine Verkürzung von $\epsilon_{ij}^T = -0,0198$ (mit $\alpha = 22 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]$). Sie ist also um das 6,6-fache größer.

Daher verbleiben nach dem Härten der Schneidlinie Zugeigenspannungen in der Schneidspitze und es zeigt sich die eingangs beschriebene Säbelbildung in Richtung „Schneide kurz“ bei Entnahme von Material an der Rückseite.

Die Bildung der Druckeigenspannungen 4,5mm unterhalb der Schneide siehe Abb. 89 beruht darauf, da im nicht zerlegten Zustand ein Gleichgewicht in den Spannungen herrscht. Da sich an der Schneide eben Zugeigenspannungen ausbilden müssen sich im weiteren Verlauf quer zur Schneide, Druckeigenspannungen ausbilden, um dieses Gleichgewicht aufrecht zu erhalten.

Durch die Betrachtung der Ergebnisse lässt sich auch ein Vergleich der verwendeten Messverfahren hinsichtlich ihrer praktischen Anwendbarkeit, Genauigkeit, des Messaufwandes und der Kosten machen. Hinsichtlich der Anwendbarkeit lässt sich festhalten, dass das Röntgenverfahren sicher das am besten geeignete Verfahren ist, da es damit möglich ist einen Verlauf der Eigenspannungen direkt zu messen, während beim Zerlegeverfahren, in Verbindung mit Aramis[®], nur eine Messung der Dehnungsrelaxationen möglich ist. Will man die Eigenspannungswerte an sich erhalten, ist zusätzlich eine numerische Berechnung notwendig.

Das Bohrlochverfahren kann für die untersuchten Schneidlinien nicht verwendet werden, da es damit nicht möglich ist einen Spannungsverlauf zu ermitteln.

Ein Vergleich der Verfahren in Bezug auf die Messgenauigkeit liefert keinen eindeutigen Favoriten. Denn wie in Abbildung 86 zu sehen, haben die Messpunkte teils sehr hohe prozentuale Fehler. Das Messsystem Aramis[®] liefert hingegen bei exakter Probenpräparation immer eine gleichbleibende Genauigkeit (siehe Tab. 2).

Bezüglich des Messaufwandes lässt sich feststellen, dass mit Aramis[®] eine Messung der Dehnungsrelaxationen mit dem geringsten zeitlichen Aufwand verbunden ist. Auch eine Messung nach dem Bohrlochverfahren ist, vor allem bei dünnen Blechen (≤ 1 mm), sehr rasch durchführbar. Hingegen benötigt eine Messung nach der Röntgenmethode deutlich mehr Zeit, da das Eichen des Gerätes, das Einspannen der Probe und schließlich die Analyse selbst, sich sehr zeitintensiv gestaltet.

Schließlich bringt ein Vergleich der Kosten folgendes Ergebnis. Dabei ist grundsätzlich zwischen den Anschaffungskosten und den Kosten für jede einzelne Messung zu unterscheiden. Bezüglich der Anschaffungskosten liegt das Röntgenverfahren, vor Aramis[®] und am günstigsten in der Beschaffung ist eine Bohrlochfräse. Die Betrachtung der Kosten für eine einzelne Messung weist eindeutig das optische Messsystem Aramis[®] als billigstes Verfahren aus. Da lediglich Kosten für den Lack anfallen. Messungen nach der Bohrlochmethode sind durch die Verwendung spezieller DMS, sogenannter Bohrlochrosetten, teuer, da sie auch nur einmal verwendet werden können. Am teuersten ist die Messung nach dem Röntgenverfahren, da hier hohe Stromkosten zu Buche schlagen.

11 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine alternative Messmethode zur Bestimmung von Eigenspannungen in schmalen Blechbändern zu untersuchen. Dazu wurde das optische Messsystem Aramis[®] verwendet. In Kombination mit dem Zerlegeverfahren sollte überprüft werden, ob es möglich ist, Relaxationen im Material, die aufgrund des Freischneidens von Eigenspannungen entstehen, zu messen.

Die ersten Versuche wurden an Bändern durchgeführt. Dabei wurde das Bohrlochverfahren und das optische Messsystem Aramis[®] verwendet. Die Ergebnisse lieferten keine eindeutigen Aussagen über den Eigenspannungszustand der Bänder. Bezüglich der Anwendbarkeit von Aramis lässt sich festhalten, dass es damit nicht möglich ist, eine flächige Auswertung der Verschiebungen, die aufgrund des Freischneidens von Eigenspannungen entstehen, vorzunehmen.

Die nächsten Versuche wurden an sogenannten Schneidlinien durchgeführt. Um einen Vergleich des Eigenspannungszustands anstellen zu können wurde mit Aramis[®] die Säbeligkeit, die sich aufgrund des unterschiedlichen Eigenspannungszustands, ausbildet, gemessen. Dabei zeigte sich klar, dass das Härten der Schneide einen wesentlichen Einfluss auf den Spannungszustand in der Schneidlinie hat und es zu einer erheblichen Säbelbildung kommt.

Bei diesen Versuchen wurde festgestellt, dass sich Aramis[®] sehr gut dazu eignet, die unterschiedliche Ausbildung des Säbels zu messen.

Im nächsten Schritt wurde analysiert, ob es mit Aramis[®] möglich ist, in Kombination mit dem Zerlegeverfahren, Dehnungen an der Schnittfront zu messen und mit Hilfe dieser gemessenen Relaxationen auf Eigenspannungen zurückzurechnen. Die durch das Freischneiden bewirkten Dehnungsrelaxationen an der Schnittfront konnten sehr gut mit Aramis[®] gemessen und dargestellt werden.

Anschließend wurde versucht aus den Dehnungsrelaxationen an der Schnittfront auf den ursprünglich herrschenden Eigenspannungszustand zurückzurechnen.

Um einen Vergleich zu bekommen, ob die mit Aramis[®] gemessenen Verschiebungen und die daraus anschließend mit Abaqus berechneten Eigenspannungen, dem wahren Spannungszustand entsprechen, wurden parallel auch mittels der Röntgenmethode Messungen durchgeführt.

Der Vergleich mit den Ergebnissen aus der Bestimmung der Eigenspannungen anhand der Röntgenmethode und der berechneten Spannungen mit Abaqus ergab dabei eine gute Übereinstimmung. In beiden Analysen zeigten sich an der Schneide starke Zugspannungen, die im weiteren Verlauf quer zur Schneide in Druckspannungen umschlagen.

Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit lassen sich in den folgenden Punkten zusammenfassen:

1. Bei der Analyse des Einflusses unterschiedlicher Produktionsstufen auf den Eigenspannungszustand in schmalen Blechbänder, sogenannten Schneidlinien, konnte eindeutig das Härten der Schneide als entscheidender Prozessschritt identifiziert wer-

den. Das ergaben die vergleichenden Messungen der Säbelbildung von Schneidlinien unterschiedlicher Herstellungsstufen.

2. Die Verwendung des optischen Messsystems Aramis[®] zur Messung von Dehnungsrelaxationen, die aufgrund des Freischneidens von Eigenspannungen entstehen, erwies sich unter bestimmten Voraussetzungen (z.B. Größe des Kalibrierobjekts) als mögliche Alternative zu herkömmlichen Messverfahren.
3. In Verbindung mit einer FEM-Software ist es auch möglich, aufgrund der gemessenen Verschiebungen einen ursprünglich vorherrschenden Spannungszustand zu berechnen.
4. Der Vergleich der in dieser Arbeit verwendeten Messverfahren brachte für die einzelnen Methoden sowohl Vor- als auch Nachteile. Die folgende Tabelle zeigt einen Vergleich der Verfahren bzgl. der Anschaffungskosten, der Kosten pro Messung, der Genauigkeit und der Dauer einer einzelnen Messung.

Messverfahren	Anschaffungskosten	Kosten pro Messung	Genauigkeit	Messdauer
Bohrloch	gering	hoch	hoch	gering
Röntgen	sehr hoch	sehr hoch	sehr hoch	hoch
Aramis [®]	hoch	gering	gering	gering

Tabelle 16: Vergleich der verwendeten Messmethoden

12 Ausblick und Empfehlungen

Hier sollen nun ein kurzer Ausblick, auf die nächsten logischen Schritte, die sich aufgrund der Untersuchungsergebnisse in dieser Arbeit ergeben, gemacht werden.

1. Erhöhung der Genauigkeit der Messung mit Aramis®:
Dies kann einerseits durch die Verwendung eines noch feineren Musters gelingen. Aber auch die Verbesserung der Trennmethode beim Zerlegeverfahren kann zu einer Erhöhung der Genauigkeit der Messungen mit Aramis® beitragen. Denn vor allem eine saubere Schnittfront, die den aufgetragenen Lack praktisch nicht verletzt, führt zu einer Senkung der Fehlerquote an der, für die Berechnung der Eigenspannungen, so wichtigen Kante (z.B. Drahterosion).
2. Verbesserung der Analyse nach dem Röntgenverfahren:
Zur Verbesserung der Ergebnisse nach dem Röntgenverfahren kann die Verwendung einer moderneren Anlage eine Erhöhung der Genauigkeit der Messungen bringen. Moderne Anlagen haben einen schmalen Spot, wodurch die Anzahl der Messpunkte quer über die Schneidelinie erhöht werden kann.
3. Verwendung einer Synchrotron-Anlage zur Messung der Eigenspannungen:
Durch die Verwendung einer Synchrotron-Anlage ist es möglich ein dreidimensionales Bild der Eigenspannungen wiederzugeben und die Genauigkeit der Messung ist ebenfalls höher als bei einer Analyse nach der Röntgenmethode. Die Kosten für eine Messung sind natürlich auch größer als bei der herkömmlichen Röntgenmethode.
4. Verbesserung des Eigenspannungszustandes durch gezielten Richtprozess:
Was die Verbesserung des Eigenspannungszustandes an sich und der damit verbundenen Verringerung der Säbelbildung angeht, so muss eine Lösung im Bereich des Richtprozesses gefunden werden. Aufgrund der ausführlich beschriebenen Tatsache, dass sich an der Schneide durch das Härten Zugspannungen ausbilden, muss versucht werden, diese durch Aufbringen von Druckspannungen an der Rückseite in ein Gleichgewicht zu bringen.
5. Eine weitere Möglichkeit der Säbelbildung in den Schneidlinien entgegenzuwirken ist die Veränderung des Härtungsprozesses. Eine Variante ist z.B. die Veränderung der Einhärtetiefe. Dadurch wird eine Änderung des Eigenspannungsverlaufs erreicht, die dann beim Schneiden der Ausnehmungen an der Rückseite zur einer Minderung der Säbelbildung führt.
6. Weiters kann versucht werden, durch eine Wärmebehandlung der Schneidlinien an der Rückseite, die starke Säbelbildung zu verringern. Durch das Aufbringen von thermischen Spannungen an der Rückseite kann ein Ausgleich mit den Spannungen an der Schneide erfolgen und somit die Säbelbildung minimiert werden.

Abbildungsverzeichnis

1	Überlagerung von Eigenspannungen	4
2	Ausbildung thermischer Eigenspannungen I. Art in einem Zylinderkörper .	6
3	Schmid'sches Schubspannungsgesetz	7
4	Streckgrenzen Anisotropie	8
5	Streckgrenzen Anisotropie	9
6	Eigenspannungen II. Art in heterogenen WC-Co-Legierungen unterschiedlicher Zusammensetzung	10
7	Stufen- und Schraubenversetzungen	11
8	Scheibenproblem	17
9	Eigenspannungs-Entstehungsursachen als Wechselwirkung zwischen dem thermischen, metallurgischen und mechanischen Zustand	20
10	Eigenspannungen I. Art durch teilplastische Verformung an Kerbstäben . .	22
11	Auswirkungen der Wärme bei unbehinderter und behinderter Dehnung . .	23
12	Dilatometerkurve eines HSLA Stahls	25
13	Einfluss von Zug- bzw. Druckspannungen auf die Dilatometerkurven von 42CrMo4	26
14	Absenken der Eigenspannungen I. Art durch Glühen	28
15	Eigenspannungsabbau durch Recken	29
16	Einteilung der Methoden zur Messung von Eigenspannungen	31
17	Prinzip der Crack Compliance Methode	35
18	Zustände vor und nach dem Einbringen des Durchgangslochs	37
19	Superposition zweier Belastungsfälle um die relaxierte Dehnung zu berechnen	37
20	Spannungszustände vor und nach dem Bohren eines Lochs	39
21	Superposition zweier zueinander orthogonaler einachsiger Spannungszustände	40
22	Koordinatensysteme der DMS-Rosette	41
23	Bohrloch-Rosette zur Eigenspannungsanalyse	42
24	DMS-Rosette	45
25	Hochgeschwindigkeitsfräse für die Bohrlochmethode	46
26	Messanordnung beim Ringkernverfahren	47
27	Maximaler relativer Fehler in Abhängigkeit vom Abstand Bohrloch-Rand .	49
28	Schematischer Aufbau bei der SET Technik	51

29	Spannungsermittlung nach dem $\sin^2\psi$ -Verfahren (schematisch)	52
30	Komponenten des Messsystems Aramis®	58
31	15x15-Facetten mit 2 Pixel Überlappung	59
32	Facettenpaar der rechten und linken Kamera	60
33	Kalibrierobjekte	61
34	Formabweichungen entsprechend DIN 50642	64
35	Relative Dehnung $\Delta L/L$ über die Bandbreite	66
36	Krummlinig begrenzte Welligkeit	68
37	Welligkeitsfehler und Längenverteilung $\delta L/L$	69
38	Unterschiedliche Dickenprofile	70
39	Bandsäbel	71
40	Planheitsmessrolle von BFI - Typ A	72
41	Neue Planheitsmesstechnik beim Streckbiegerichten von Bändern	73
42	Prinzipskizze des Messsystems TopPlan	74
43	SI-Flat, schematische Darstellung	75
44	Möglichkeiten zur Beeinflussung der Walzspaltform	76
45	CVC- und UC-Walzgerüst, schematische Darstellung	77
46	Steuermöglichkeiten der Planheit	78
47	Blechstreifen in Zwick eingespannt	81
48	Spannungs-Dehnungs-Diagramm für die Vergleichsmessung von DMS mit Aramis®	82
49	Produktionsstufen vom Warm- zum Kaltband	84
50	Schneidlinien	86
51	Schneidformen	87
52	Schliffbild der Schneide mit Härteeindrücken	88
53	Schneidlinie mit Ausnehmungen	89
54	Säbelbildung nach dem Schneiden von Ausnehmungen	90
55	Lage der Bohrlöcher an den untersuchten Bändern	93
56	Schnittfolge am kaltgewalzten Band	94
57	Bezeichnung und Lage der mit Aramis® vermessenen Quadrate	95
58	Lage der vermessenen Abstände	96
59	Berechnete 3D-Ansicht des Kaltbandes in 3 Stufen mit eingezeichneter Lage des Schnittes	97

60	Schneidlinie vor und nach dem Schneiden der Ausnehmungen	99
61	3D Ansicht der Schneidlinie vor und nach dem Schneiden der Ausnehmung	100
62	3D Ansicht der Schneidlinie vor und nach dem Schneiden der Ausnehmung mit Messung der Säbeligkeit	101
63	Typischer Messablauf mit Aramis®	102
64	Ablauf einer Simulation mit Deform TM	103
65	Modell der Schneidlinie in Deform TM	105
66	Temperaturverlauf der Schneide in der Simulation mit Deform	107
67	Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild des Stahl Ck45	107
68	Anteil des Martensit nach dem Härten der Schneide	108
69	Darstellung der Schneidlinie mit Stanzdummy	109
70	Darstellung der Schneidlinie nach dem Stanzen der Ausnehmung	109
71	Aufbau der Röntgenanlage	110
72	Probe zur Messung nach dem Röntgenverfahren	111
73	Messaufbau bei der Bohrlochmethode	112
74	Typischer Messablauf beim Zerlegeverfahren und Auswertung mit Aramis®	114
75	Verschiebung der Knoten im Bereich der Schneidspitze	115
76	Vergleich der Eigenspannung unterschiedlicher Bearbeitungszustände . . .	116
77	Vergleich der Eigenspannungen unterschiedlicher Bearbeitungszustände . .	117
78	Vergleich der Eigenspannungen nach der Auswertung der Messungen mit Aramis®	118
79	Vergleich der Schnittdaten aus der 3D-Ansicht für die Verschiebung „Epsi- lon X“	119
80	Vergleich der Längenänderungen bei Freischneiden der Charge Nr. 3	120
81	Vergleich der Längenänderung bei Freischneiden der Charge Nr. 4	121
82	Vergleich der Längenänderung bei Freischeiden der Eigenspannungen im Bearbeitungszustand „nach Härten“ der Schneidlinien	122
83	Längenänderung bei Entnahme von Material an der Rückseite einer Schneid- linie in einer Simulation mit DEFORM	123
84	Vergleich der Längenänderung einer Schneidlinie DEFORM - Aramis® . .	124
85	Bezeichnung der Spannungsrichtungen	125
86	Verlauf der Eigenspannungen quer zur Walzrichtung	125
87	Ergebnis der Bohrlochmessung der Schneidlinie der Charge Nr. 3	126

88	Verschiebungen in x- und y-Richtung gemessen mit Aramis®	127
89	Verschiebungen entlang der Schnittebene quer zur Schneide	128
90	Verschiebungen entlang der Schnittebene parallel zur Schneide	129
91	Mit Abaqus berechnete Spannungen σ_x und σ_y aufgrund der gemessenen Verschiebungen	130
92	Verlauf der mit Abaqus berechneten Spannungen in x-Richtung	130
93	Verlauf der mit Abaqus berechneten Spannungen in y-Richtung	131
94	Vergleich des mit Abaqus berechneten und des mit der Röntgenmethode gemessenen Spannungsverlaufs	132

Tabellenverzeichnis

1	Randbedingungen der Bohrlochmethode und des Ringkernverfahrens	48
2	Vergleich der angewandten Messverfahren	62
3	Aufgebrachte Dehnungen beim Kalibrieren von Aramis®	82
4	Chemische Zusammensetzung des Stahls Ck45.	84
5	Mechanische Richtwerte des Stahls Ck45 im vergüteten Zustand.	85
6	Formen und Verwendung der Schneidlinien.	87
7	Chemische Zusammensetzung des Vergütungsstahls Ck45.	89
8	Mechanische Kennwerte des Vergütungsstahls Ck45 im vergüteten Zustand.	89
9	Produktionsstufen zur Herstellung von Schneidlinien.	89
10	Produktionsstufen, die bei den Bändern analysiert wurden	92
11	Die für die Messung der Säbeligkeit verwendeten Chargen und Produkti- onsstufen	98
12	Vorgegebene Parameter für den Stahl Ck45 in Deform.	106
13	In der Simulation mit Deform verwendete Operationen und die dafür vor- gegebene Zeit.	106
14	Die bei der Charge Nr. 3 untersuchten Bearbeitungszustände.	120
15	Die bei der Charge Nr. 4 untersuchten Bearbeitungszustände.	121
16	Vergleich der verwendeten Messmethoden	139

Literaturverzeichnis

- [1] K. Kloos: “Eigenspannungen, Definition und Entstehungsursachen”, *Zeitschrift für Werkstofftechnik* **9**:293–302, 1979.
- [2] G. Masing: “Eigenspannungen in kaltgereckten Metallen”, *Zeitschrift technische Physik* **6**:569–573, 1925.
- [3] U. Wolfstieg und E. Macherauch: “Ursachen und Bewertung von Eigenspannungen”, *Chemie-Ing-Technik* **11**:760–770, 1973.
- [4] E. Macherauch, H. Wohlfahrt und U. Wolfstieg: “Zur zweckmäßigen Definition von Eigenspannungen”, *HTM* **28**:201–211, 1973.
- [5] B. Eigenmann und E. Macherauch: “Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen Teil I”, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **26**:148–160, 1995.
- [6] Y. Wang, R. Lin Peng, X. Wang und R. McGreevy: “Grain-orientation-dependent residual stress and the effect of annealing in cold rolled stainless steel”, *Acta Materialia* **50**:1717–1734, 2002.
- [7] P. Withers und H. Bhadeshia: “Residual stress, Part 1 - Measurement techniques”, *Materials Science and Technology* **17**:355–365, 2001.
- [8] R. Winholtz: “Residual Stresses: Macro and Micro Stresses”, *Encyclopedia of Materials: Science and Technology* S. 8148–8151, 2008.
- [9] G. Gottstein: *Physikalische Grundlagen der Materialkunde*, Springer Berlin Heidelberg London New York, 2001.
- [10] C. Klüber: *Orientierungsabhängigkeit und Größeneffekte bei der Nanoindentierung von Einkristallen*, Dissertation, Max-Planck-Institut in Düsseldorf, Abteilung Mikrostrukturphysik und Umformtechnik, 2008.
- [11] E. Macherauch: “Neuere Untersuchungen zur Ausbildung und Auswirkung von Eigenspannungen in metallischen Werkstoffen”, *Zeitschrift für Werkstofftechnik* **10**:97–111, 1979.
- [12] E. Macherauch und K. Kloos: “Bewertung von Eigenspannungen bei quasistatischer und schwingender Werkstoffbeanspruchung”, *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* **20**:1–13, 1989.
- [13] “Skriptum Festkörperchemie Kap. 1.2.2”, *Techn. Ber.*, Universität Freiburg - Institut für anorganische und analytische Chemie.
- [14] H. Schimmöller: *Analytische Behandlung von Eigenspannungszuständen auf der Grundlage der Elastizitätstheorie*, VDI Verlag, 1990.

- [15] S. R. Kienzler R.: *Einführung in die Höhere Festigkeitslehre*, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009.
- [16] G. D. Becker W.: *Mechanik elastischer Körper und Strukturen*, Springer Berlin Heidelberg London New York, 2002.
- [17] T. Antretter, F. Fischer, G. Cailletaud und B. Ortner: “On the algorithmic implementation of a material model accounting for the effects of martensitic transformation”, *Steel research* **77**:733–740, 2006.
- [18] D. Breuer: *Bestimmung des Formänderungsvermögens bei der Kaltmassivumformung*, Dissertation, RWTH Aachen, 2007.
- [19] V. Schuler und J. Twrdek: *Praxiswissen Schweißtechnik*, Springer Berlin Heidelberg London New York, 2006.
- [20] S. Mandziej: *Physical Simulation of Metal Forming Processes*, Dynamic Systems Inc., Advanced Materials Analysis, P.O.Box 3751, NL-7500DT Enschede, 2000.
- [21] F. Clemens: *Experimentelle Untersuchungen und Simulationen der Eigenspannungsbildung und des Verzugverhaltens bei der Durch- und Einsatzhärtung von Stählen*, Dissertation, Institut für Werkstoffkunde I Universität Karlsruhe, 2005.
- [22] M. Narazaki, G. Totten und G. Webster: “Hardening by Reheating and Quenching”, in: “Handbook of residual stress and deformation of steel”, (G. Totten, Hg.), S. 499, Hitchin, Herts, 2002.
- [23] G. Totten und M. Howes: *Steel Heat Treatment Handbook*, Kap. Distortion of Heat Treated Components, S. 292, Dekker, 1997.
- [24] H. Berns: “Verzug von Stählen infolge Wärmebehandlungen”, *Zeitschrift für Werkstofftechnik* **8**:149–157, 1977.
- [25] U. Ahrens: *Beanspruchungsabhängiges Umwandlungsverhalten und Umwandlungsplastizität niedrig legierter Stähle mit unterschiedlich hohen Kohlenstoffgehalten*, Dissertation, Fakultät für Maschinenbau der Universität Paderborn, 2003.
- [26] W. Mitter: *Umwandlungsplastizität und ihre Berücksichtigung bei der Berechnung von Eigenspannungen*, Dissertation, Habilitationsschrift Montanuniversität Leoben, 1985.
- [27] H. Bhadeshia: “Material Factors”, in: “Handbook of residual stress and deformation of steel”, (G. Totten, Hg.), S. 499, Hitchin, Herts, 2002.
- [28] W. Jones und P. Alberry: “Ferritic steels for fast reactor steam generators”, *British Nuclear Engineering Society* 1977.
- [29] W. Jones und P. Alberry: “Residual stresses in welded constructions”, *The Welding Institute* 1977.

- [30] P. Withers und H. Bhadeshia: “Residual stress, Part 2 - Nature and origin”, *Materials Science and Technology* **17**:366–375, 2001.
- [31] A. Eichhorn, H. Hoffmann und A. Neubauer: “Untersuchungen über Möglichkeiten zur Verminderung von Eigenspannungen I.Art in Stahlleichtprofilen”, *Neue Hütte* **20**:659–662, 1975.
- [32] H. J. Schindler: “Mechanische Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen”, *Techn. Ber.*, Vorlesung, Mechanische Werkstoffprüfung”, Teil 2/3, ETH D-Werk, 2002.
- [33] Y. Ueda: *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Kap. Sectioning Method, S. 49–70, Lu, Jian, 1996.
- [34] C. Ruud: “Measurement of Residual Stresses”, in: “Handbook of residual stress and deformation of steel”, (G. Totten, Hg.), S. 499, Hitchin, Herts, 2002.
- [35] E. Heyn: “Internal Strains in Cold Wrought Metals, and Some Troubles Caused Thereby”, *J. Inst. Met.* **12**:1–37, 1914.
- [36] M. Mesnager: “Methods de Determination dees Tensions Existant dans un Cylindre Circulative”, *C.R. Hebed. Seances Acad. Sci.* S. 169, 1926.
- [37] D. Rosenthal und J. Norton: “A Method for Measuring Triaxial Residual Stresses in Plates.”, *Welding Journal* **24** (5):295–307, 1945.
- [38] W. Cheng und I. Finnie: “The Crack Compliance Method for Residual Stresses Measurement”, *Welding in the World* **28**:355–360, 1990.
- [39] W. Cheng, I. Finnie und Vardar: “Measurement of Residual Stresses Near the Surface Using the Crack Compliance Method”, *Journal Eng. Mater. Technology* **113**:199–204, 1991.
- [40] J. Mathar: “Ermittlung von Eigenspannungen durch Messung von Bohrloch-Verformungen”, *Archiv für das Eisenhüttenwesen* **7**:277–281, 1932.
- [41] ASTM: “ASTM E 837-99 Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method”, 2002.
- [42] E. Sobolevski: *Residual Stress analysis of Components with Real Geometries Using the Incremental Hole-Drilling Technique and a Differential Evaluation Method*, Dissertation, Universität Kassel, 2007.
- [43] R. G. Schajer, Flamen T.: *Handbook of Measurement of Residual Stresses*, Kap. Hole-Drilling and Ring Core Methods, S. 5–34, 1996.
- [44] G. Kirsch: “Die Theorie der Elastizität und die Bedürfnisse der Festigkeitslehre”, *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* **42**:797–807, 1898.

- [45] C. Krempaszky: “Eigenspannungsmessung mit dem Bohrlochverfahren”, Praktikum Werkstoffmechanik, Lehrstuhl für Werkstoffkunde und Werkstoffmechanik TU-München, 2006.
- [46] N. Rendler und I. Vigness: “Hole-drilling Strain-gage Method of Measuring Residual Stresses”, *Proc. SESA XXIII*:577–586, 1966.
- [47] G. S. Schajer: “Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. Part I - Stress Calculation procedures”, *Journal of Engineering Materials and Technology* **110**:338–343, 1988.
- [48] G. S. Schajer: “Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. Part II - Practical Application on the integral method”, *Journal of Engineering Materials and Technology* **110**:344–349, 1988.
- [49] T. Schwarz: *Beitrag zur Eigenspannungsermittlung an isotropen, anisotropen sowie inhomogenen, schichtweise aufgebauten Werkstoffen mittels Bohrlochmethode und Ringkernverfahren.*, Dissertation, Fakultät Energietechnik der Universität Stuttgart, 1996.
- [50] U. Preckel: “Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Bohrlochverfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen 1. Art”, *Industrie Anzeiger, Kurzberichte der Hochschulgruppe Fertigungstechnik 108* **8**:18–26, 1986.
- [51] H. Schimmöller: “Bestimmung von Eigenspannungen in ebenen plattierten Werkstoffen: Teil I: Rechnerische Grundlagen”, *Materialprüfung* **14**:115–122, 1971.
- [52] DIN: “DIN EN 15305 Zerstörungsfreie Prüfung - Röntgendiffraktometrisches Prüfverfahren zur Ermittlung der Eigenspannungen; Deutsche Fassung EN 15305:2008, Berichtigung zu DIN EN 15305:2009-01; Deutsche Fassung EN 15305:2008/AC:2009”, 2009.
- [53] E. Macherauch: *Eigenspannungen, Entstehung-Messung-Bewertung*, Deutsche Gesellschaft für Metallkunde E.V., 1983.
- [54] stresstech: “<http://de.stresstechgroup.com/content/de/11501/671/671.html>”, 2011.
- [55] I. Altpeter, G. Dobmann, M. Kopp und R. Tschuncky: “Zerstörungsfreie Charakterisierung der neutroneninduzierten Versprödung in Reaktordruckbehältern mittels elektromagnetischer Prüftechniken”, *DGZfP-Jahrestagung 2010* 2010.
- [56] S. GmbH: *Residual stress measurement based on hole-drilling and ESPI*, Stresstech GmbH, Bahnhofstrasse 39 D-56462 HÖHN Germany, 2010.
- [57] DIN: “DIN 8583-1 Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 1: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Ausgabe : 2003-09 , Deutsch”, 2003.
- [58] R. Kopp und P. Mauk: *Handbuch der Fertigungstechnik Band 2/1 Umformen*, Kap. Kaltwalzen von Flacherzeugnissen, S. 375–505, Carl Hanser Verlag München Wien, 1983.

- [59] DIN: "Euronorm 131-77 Kaltgewalztes Flachzeug ohne Überzug aus weichen unlegierten Stählen für Kaltumformung. Zulässige Maß- und Formabweichungen. 05-1977", 1977.
- [60] DIN: "ÖNORM DIN 1541 Flachzeug aus Stahl; kaltgewalztes Breitband und Blech aus unlegierten Stählen; Maße, zulässige Maß- und Formabweichungen. 1980-05-01", 1980.
- [61] DIN: "DIN 1623 Kaltgewalztes Band und Blech - Technische Lieferbedingungen - Allgemeine Baustähle. Ausgabe : 2009-05", 2009.
- [62] VDEh: *Grundlagen der bildsamen Formgebung*, Verl. Stahleisen, Düsseldorf, 1966.
- [63] A. Bähr: *Herstellung von kaltgewalztem Band*, Verl. Stahleisen, Düsseldorf, 1970.
- [64] G. Spur und D. Schmöckel: *Handbuch der Fertigungstechnik Band 2/1 Umformen*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1983.
- [65] K. Lange: *Umformtechnik 3*, Springer, Berlin, 1990.
- [66] F. Loges: *Entwicklung neuer Strategien zur Messung und Regelung der Bandplanheit beim Flachwalzen*, Dissertation, Universität Kassel, 2009.
- [67] G. Mücke und P. Pütz: "Definitionen zur Bandplanheit", *Techn. Ber.*, Andritz Sundwig, D-Hemer, 2003.
- [68] O. Pawelski: "Möglichkeiten und Grenzen der Planheitsregelung mit einem Vierwalzen-Kaltwalzgerüst mit seitlicher Abstützung der Arbeitswalzen.", *Techn. Ber.*, Max-Planck-Institut für Eisenforschung, Düsseldorf, 1976.
- [69] DIN: "DIN 10131 Kaltgewalzte Flacherzeugnisse ohne Überzug und mit elektrolytischem Zink- oder Zink-Nickel-Überzug aus weichen Stählen sowie aus Stählen mit höherer Streckgrenze zum Kaltumformen - Grenzabmaße und Formtoleranzen; Deutsche Fassung EN 10131:2006", 2006.
- [70] DIN: "DIN EN 10202 Kaltgewalzte Verpackungsblecherzeugnisse - Elektrolytisch verzinnter und spezialverchromter Stahl; Deutsche Fassung EN 10202:2001 Ausgabe : 2001-07 , Deutsch", 2002.
- [71] J. Hirsch: *Walzen von Flachprodukten*, Wiley-VCH Verlag GmbH, D-Weinheim, 2001.
- [72] O. Buchholtz: *Beitrag zu Frage der Eigenspannungen und der Planheit von kaltgewalzten Feinblechen.*, Dissertation, Technische Universität Hannover, 1973.
- [73] F. Fischer, F. Rammerstorfer, N. Friedl und W. Wieser: "Buckling phenomena related to rolling and levelling of sheet metal", *International Journal of Mechanical Sciences* **42**:1887–1910, 2000.
- [74] ASEA: "Stressometer Planheits-Mess und Regelsystem QUSM 200", ASEA-Handbuch, 1985.

-
- [75] BFI: “http://www.bfi.de/de/arbeitsgebiete/systemtechnik_und_verfahrensentwicklung/bfi_shapemeter_roll_type_a”, 2011.
- [76] BFI: “http://www.bfi.de/de/arbeitsgebiete/systemtechnik_und_verfahrensentwicklung/neue_planheitsmesstechnik_beim_streckbiegerichten.htm”, 2011.
- [77] BFI: “<http://www.bfi.de/de/leistungenundprodukte/beitraege/topplan.htm>”, 2010.
- [78] Siemens: “<http://info.industry.siemens.com/data/presse/docs/isfb03033229.pdf>”, 2011.
- [79] E. Neuschütz: *Walzen von Flachprodukten*, Kap. Planheitsmessung und -regelung beim Warm- und Kaltwalzen von Bändern, S. 7–26, Oberursel: Dt. Ges. für Metallkunde, 1987.
- [80] T. Hatzenbichler: *Vorhersage und Minimierung des Innenfehlerbereichs beim Blockauf-Block Strangpressen.*, Dissertation, Montanuniversität Leoben, 2005.