

Simulation eines Festwalzprozesses unter Einbeziehung von Werkstoffmodellen



Diplomarbeit

Stefan Friedl

Betreuer:

Univ. Prof. Dipl. -Ing. Dr. Wilfried EICHLSEDER

Dipl. -Ing. Dr. Hubert KÖBERL

Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau
Montanuniversität Leoben

Juni 2011

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Zuge meines Studiums Montanmaschinenwesen mit dem Schwerpunkt Computational Design am Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau des Department Product Engineering an der Montanuniversität Leoben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Wilfried Eichlseder, Vorstand des Lehrstuhls für Allgemeinen Maschinenbau, für die Schaffung der dafür erforderlichen Rahmenbedingungen zur Durchführung dieser Arbeit und für seine Unterstützung.

Herrn Dipl. -Ing. Dr. Hubert Köberl möchte ich für die Betreuung und Förderung, die mir im Laufe dieser Arbeit entgegengebracht wurde, danken. Auch möchte ich mich bei Dipl. -Ing. Dr. Hans-Peter Gänser, Dipl. -Ing. Andreas Mösenbacher und Dipl. -Ing. Manuel Wohlfahrt bedanken, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen.

Weiters gilt mein Dank allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls Allgemeiner Maschinenbau sowie des CD-Labors für Betriebsfestigkeit, die mich in meiner Tätigkeit unterstützt haben.

Ganz besonders möchte ich mich bei meiner ganzen Familie bedanken, die mir dieses Studium ermöglicht und mich während dieser Zeit begleitet hat.

Eidesstattliche Erklärung

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

Leoben 6. Juni 2011

Stefan Friedl

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Erstellung eines Simulationsmodells für den Festwalzprozess anhand gekerbter Proben und der damit verbundenen Induzierung von Druckeigenstressungen, welche eine deutliche Erhöhung der Schwingfestigkeit mit sich ziehen. Sämtliche Simulationen werden mit dem *Finite-Elemente*-Programm, *Abaqus*, durchgeführt.

Für ein geeignetes Modell werden verschiedene Herangehensweisen an das Materialmodell, wie etwa die Betrachtung der duktilen Schädigung oder die Implementierung eines zyklischen Werkstoffmodells in die Simulation für den Festwalzprozess, gegenübergestellt und analysiert.

Es wird die inkrementelle Schädigung dD als Funktion des Vergleichsdehnungsincrements $d\epsilon_{eq}$ und der (über die Vergleichsspannung σ_{eq} normierten) hydrostatischen Spannung σ_h dargestellt.

Für das *Combined Hardening Modell*, durch welches ein zyklisches Werkstoffverhalten wiedergespiegelt werden kann, werden *LCF*-Versuche (*Low Cycle Fatigue*-Versuche) durchgeführt. Die experimentell ermittelten Materialdaten bzw. Hysteresen werden über das *Combined Hardening Modell* angenähert um so Werkstoffparameter für die Festwalzsimulation zu generieren.

Weiters werden röntgenographische Eigenspannungsmessungen bei festgewalzten Proben durchgeführt. Um die Vorgänge bei der Eigenspannungsmessung näher zu betrachten, wird in dieser Arbeit der Materialabtrag und die damit verbundenen Spannungsumlagerungen simuliert.

Auf Basis dieser Simulationsergebnisse wird auch die Theorie nach *Moore and Evans* behandelt. In *Moore and Evans* werden einfache Näherungen entwickelt, um aus dem gemessenen Eigenspannungsverlauf auf den ursprünglichen Verlauf zurück zurechnen.

Durch die bessere Abbildung des Werkstoffverhaltens kann eine Optimierung bei der Simulation der durch den Festwalzprozess eingebrachten Eigenspannungen bewirkt werden, was eine Aufwertung des Simulationsmodells mit sich zieht.

Abstract

This thesis deals with the set-up of a simulation model for the final expanding on notched specimen. It also describes the aligned induced residual compressive stress which causes a significant increase of the fatigue strength. All simulations were conducted with the finite element program *Abaqus*. For the set-up, different approaches towards the material model such as the analysis of the ductile cracks and the implementation of cyclic material models into the final expanding were compared and analysed.

The incremental damage dD is described as a function of the effective strain increment $d\epsilon_{eq}$ and the hydrostatic stress σ_h (standardised by the equivalent stress σ_{eq}).

Low Cycle Fatigue Assessment was conducted for the *Combined Hardening Model* by means of which a cyclic material behaviour can be shown.

The experimentally obtained material data and hysteresis respectively are approached via the *Combined Hardening Model* to generate material parameters for the final expanding simulation. In order to further analyse the processes of the residual stress measurement, the material removal and the related stress redistribution have been simulated in this thesis.

Based on these simulation results, the theory by *Moore and Evans* is also discussed. In this theory simple approximations have been developed in order to calculate the original residual stress distribution according to the measured stress.

A better illustration of the material behaviour considering residual stress caused by final expanding leads to a simulation optimisation.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Mechanisches Verhalten von Werkstoffen | 2 |
| 2.1 | Spannungen | 3 |
| 2.2 | Dehnungen | 3 |
| 2.3 | Plastisches Verhalten und Versagen | 4 |
| 2.3.1 | Wahre und technische Dehnung | 5 |
| 2.4 | Werkstoffverhalten bei zyklischer Beanspruchung | 6 |
| 2.4.1 | Die mechanische Hysterese | 7 |
| 2.4.2 | <i>Bauschinger</i> -Effekt | 8 |
| 2.4.3 | Zyklische Ver- und Entfestigung | 8 |
| 3 | Eigenspannungen | 11 |
| 3.1 | Eigenspannungen I. Art | 12 |
| 3.2 | Eigenspannungen II. Art | 13 |
| 3.3 | Eigenspannungen III. Art | 13 |
| 3.4 | Stabilität von Eigenspannungen | 13 |
| 3.4.1 | Thermischer Eigenspannungsabbau | 13 |
| 3.4.2 | Mechanischer Eigenspannungsabbau | 14 |
| 3.5 | Wirkungsweise von Druckeigenspannungen | 16 |
| 3.6 | Methoden zur Messung von Eigenspannungen | 17 |
| 3.6.1 | Mechanische Verfahren | 18 |
| 3.6.2 | Akustische Verfahren | 18 |
| 3.6.3 | Magnetische Verfahren | 19 |
| 3.6.4 | Beugungsverfahren | 19 |
| 3.6.5 | Sonstige Verfahren | 21 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 4 | Mechanische Oberflächenbehandlungen | 22 |
| 4.1 | Hochdruckwasserstrahlen | 23 |
| 4.2 | Ultraschall-Schlagbehandlung | 23 |
| 4.3 | Laser-Shock-Processing | 24 |
| 4.4 | Kugelstrahlen | 24 |
| 4.5 | Hämmern bzw. Rundkneten | 25 |
| 4.5.1 | Einstechrundkneten | 28 |
| 4.6 | Festwalzen | 28 |
| 4.6.1 | Parameter beim Festwalzen | 32 |
| 5 | Werkstoffmodelle | 34 |
| 5.1 | Modellierung der duktilen Schädigung während des Festwalzprozesses . . . | 35 |
| 5.2 | <i>Combined Hardening</i> Modell | 37 |
| 5.2.1 | Nichtlineare kinematische Verfestigung | 38 |
| 5.2.2 | Isotrope Verfestigung bzw. Entfestigung | 39 |
| 5.2.3 | Anwendungsbeispiel [2] | 40 |
| 6 | Modellerstellungen für Simulationen | 49 |
| 6.1 | Simulation des Festwalzprozesses | 49 |
| 6.1.1 | Probengeometrie | 50 |
| 6.2 | Vernetzung | 51 |
| 6.2.1 | Komponenten | 52 |
| 6.2.2 | Randbedingungen und Kräfte | 53 |
| 6.3 | Simulation der Hysterese | 55 |
| 6.4 | Simulation des elektrochemischen Abtrags | 59 |
| 7 | Experimentelles | 60 |
| 7.1 | Zugversuche | 60 |
| 7.2 | <i>LCF</i> -Versuche | 62 |
| 7.3 | Eigen Spannungsmessungen | 64 |
| 8 | Ergebnisse und Diskussion | 69 |
| 8.1 | Ergebnisse der Simulation des elektrochemischen Abtrags | 69 |
| 8.1.1 | Theorie nach <i>Moore and Evans</i> | 69 |
| 8.2 | Ergebnisse der Hysteresensimulation | 71 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 8.2.1 | Ergebnisse der Festwalzsimulation | 74 |
| 9 | Zusammenfassung und Ausblick | 78 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 2.1 | Schematische Darstellung der Spannungsarten [10] | 2 |
| 2.2 | Einfache Beanspruchungsarten [10] | 4 |
| 2.3 | Wahre und technische Dehnung [10] | 6 |
| 2.4 | Hystereseschleife mit zugehörigen Kennwerten [6] | 7 |
| 2.5 | Änderung der Elastizitätsgrenze auf Grund des <i>Bauschinger</i> -Effekts | 8 |
| 2.6 | Zyklische Verfestigung | 9 |
| 2.7 | Entfestigung | 9 |
| 2.8 | Zyklische Mittelspannungsrelaxation | 10 |
| 2.9 | Zyklisches Kriechen | 10 |
| 3.1 | Schematische Verteilung der Eigenspannungen I., II. und III. Art in den Körnern eines einphasigen, vielkristallinen Werkstoffes [19] | 12 |
| 3.2 | Abnahme der Makro- Eigenspannungsbeträge mit zunehmender Zeit bei 450°C [3] | 14 |
| 3.3 | Abbau von Strahleigenspannungen bei der Al-Legierung <i>AlCu5Mg2</i> durch Zug- bzw. Druckverformung [17] | 15 |
| 3.4 | Eigenspannungsabbau bei Biegewechselbeanspruchung von <i>AlCu5Mg2</i> [19] | 15 |
| 3.5 | Eigenspannungsabbau bei Biegewechselbeanspruchung normalisierter, gefräster Kerbproben aus Ck45 (Pfeile markieren das Auftreten erster Oberflächenrisse) [19] | 16 |
| 3.6 | Wirkungsweise von Druckeigenspannungen | 17 |
| 3.7 | Schematische Darstellung der Bragg'schen Interferenzbedingung [19] | 19 |
| 3.8 | Definition der makroskopischen Dehnungen und Gitterdehnungen [19] | 20 |
| 4.1 | Hochdruckwasserstrahlen [17] | 23 |
| 4.2 | Schematische Darstellung des Laser-Peenings [14] | 24 |
| 4.3 | Schleuderradstrahlanlage [17] | 25 |
| 4.4 | Druckluftstrahlanlage [17] | 25 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.5 | Verfahrensvarianten des Rundknetens [12] | 25 |
| 4.6 | Schematische Darstellung des Rundknetens [5] | 26 |
| 4.7 | Komponenten einer Rundknetmaschine [5] [4] | 27 |
| 4.8 | Funktionsprinzip einer Radialumformeinheit [5] | 27 |
| 4.9 | Prinzip des Einstechverfahrens [5] | 28 |
| 4.10 | Oberfläche von ungewalzten (a), und gewalzten Proben im Kerbgrund (b = 2200 N, c = 4100 N) | 29 |
| 4.11 | Steigerung der Schwingfestigkeit bei gekerbten und ungekerbten Proben durch den Festwalzprozess [9] | 30 |
| 4.12 | Reduzierung der Kerbwirkung [20] | 30 |
| 4.13 | Glattwalzen [20] | 31 |
| 4.14 | Maßwalzen [20] | 31 |
| 4.15 | Prinzip des Einstechverfahrens [20] | 32 |
| 5.1 | Fließkurve des Vergütungsstahls <i>34CrNiMo6V</i> | 34 |
| 5.2 | Vergleich der Eigenspannungsmessung mit bisherigen Simulationsergebnissen | 35 |
| 5.3 | Ermittlung der Kalibrationskonstante der Schädigungsfunktion | 36 |
| 5.4 | Vergleich der Ergebnisse von Zylinderstauchversuchen [15] | 37 |
| 5.5 | Parameter <i>C</i> und Verschiebung der Fließfläche auf Grund kinemat. Verfestigung [10] | 38 |
| 5.6 | Kinematische Verfestigung [10] | 39 |
| 5.7 | Isotrope Verfestigung [10] | 39 |
| 5.8 | Kinematische- und isotrope Verfestigung [2] | 40 |
| 5.9 | Experimentell ermittelte Daten [2] | 41 |
| 5.10 | Stabilisierter Zyklus [2] | 41 |
| 5.11 | Ende des elastischen Bereichs bzw. Fließbeginn [2] | 42 |
| 5.12 | Stabilisierter Zyklus und Kurve für <i>Abaqus</i> [2] | 43 |
| 5.13 | Kinematische Parameter aus dem <i>DAT-File</i> | 43 |
| 5.14 | Vergleich der simulierten und experimentell ermittelten Daten | 46 |
| 5.15 | Entfestigung über Prozesszeit | 47 |
| 5.16 | Verfestigung über Prozesszeit | 47 |
| 5.17 | Gemischtes Verhalten über Prozesszeit | 48 |
| 6.1 | Festwalzprozess in unterschiedlichen Prozessabschnitten | 50 |
| 6.2 | Probengeometrie | 50 |

| | | |
|------|---|----|
| 6.3 | Reduzierte Probengeometrie | 51 |
| 6.4 | Partitionierung der Geometrie | 51 |
| 6.5 | Integrationspunkte bei voller und reduzierter Integration | 52 |
| 6.6 | Probe verbunden mit <i>analytical rigid</i> durch <i>Tie</i> -Kontakt | 52 |
| 6.7 | Bild der Walze und als <i>analytical rigid surface</i> | 53 |
| 6.8 | Referenzpunkte der einzelnen Komponenten | 54 |
| 6.9 | Kennzeichnung der Symmetriebedingung der Probe | 54 |
| 6.10 | Verlauf der Festwalzkraft | 55 |
| 6.11 | Defintion der Knoten und Elemente im <i>Inputfile</i> | 56 |
| 6.12 | Dateneingabe bezüglich des stabilisierten Zykluses | 56 |
| 6.13 | Dateneingabe bezüglich des halben Zykluses | 57 |
| 6.14 | Dateneingabe über die Parameter σ_0, C, γ | 57 |
| 6.15 | Definition der Amplitude und der Randbedingungen | 57 |
| 6.16 | Definition des <i>Setps</i> und Angabe der Beanspruchung | 58 |
| 6.17 | Einheitswürfel für Hysteresensimulation | 58 |
| 6.18 | Code für Ausblendung von Elementen | 59 |
| 6.19 | Ausblenden der Elemente | 59 |
| 7.1 | Prüfmaschine für <i>LCF</i> - und Zugversuche | 61 |
| 7.2 | Zugversuche der Werkstoffe <i>34CrNiMo6V</i> und <i>ADI1000</i> | 61 |
| 7.3 | <i>LCF</i> -Versuch des Werkstoffes <i>34CrNiMo6V</i> | 63 |
| 7.4 | <i>LCF</i> -Versuch des Werkstoffes <i>ADI1000</i> | 63 |
| 7.5 | Axiale Druckeigenspannungsverläufe von gekerbten Proben im Kerbgrund bei unterschiedlichen Festwalzkraften | 64 |
| 7.6 | Stichprobenartige Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit unterschiedlich festgewalzten Proben | 65 |
| 7.7 | Eigenspannungsmessungen für d=6 mm (Braunschweig) | 66 |
| 7.8 | Vergleich von Eigenspannungsmessungen für d=6 mm aus unterschiedlichen Labors | 67 |
| 7.9 | Eigenspannungsverläufe einer größeren Probe mit d=25 mm | 68 |
| 8.1 | (a) Simulation des Materialabtrages nach der ersten Eigenspannungsmessung, (b) Spannungsumlagerung durch Materialabtrag | 70 |
| 8.2 | Anwendung der Theorie nach <i>Moore and Evans</i> | 71 |

| | | |
|-----|---|----|
| 8.3 | Vergleich von simulierten und experimentell ermittelten Hysteresen von <i>34CrNiMo6V</i> | 72 |
| 8.4 | Vergleich von simulierten und experimentell ermittelten Hysteresen von <i>ADI1000</i> | 73 |
| 8.5 | Vergleich von Simulation und Experiment | 74 |
| 8.6 | Vergleich der alten und neuen Simulationsergebnissen mit Messung | 75 |
| 8.7 | Ergebnisse der Eigenspannungsmessung für d=25 mm | 76 |
| 8.8 | Vergleich der experimentellen Daten mit den Simulationsergebniss der Bezugskraft $F = 7,5 \text{ kN}$ | 77 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|----|
| 5.1 | Werte für <i>Cyclic Hardening</i> | 45 |
| 7.1 | Auflistung der <i>LCF</i> -Versuche für den Werkstoff <i>34CrNiMo6V</i> | 62 |
| 7.2 | Auflistung der <i>LCF</i> -Versuche für den Werkstoff <i>ADI1000</i> | 62 |

Kapitel 1

Einleitung

Ziel dieser Arbeit ist es ein geeignetes FE-Modell für den Festwalzprozess von Wellenübergängen bzw. gekerbten Proben zu erstellen, um damit die Druckeigenspannungen die auf Grund des Festwalzens in die Probe bzw. das Bauteil eingebracht werden, simulieren zu können.

Die Schwierigkeit besteht darin, den Walzprozess möglichst realitätsnahe, jedoch mit einem den Gegebenheiten angepassten Rechenaufwand darzustellen. Auf Grund der immer besser werdenden Rechnerleistungen und einer geschickten Vernetzung ist es möglich, ein qualitativ ausreichendes Modell zu erzeugen.

Da die simulierten Eigenspannungen vorher gegangener FE-Rechnungen relativ weit von den experimentell ermittelten Eigenspannungen abweichen, wird versucht basierend auf dem Werkstoffmodell, Verbesserungen zu erreichen. Bisher wurde mit einer Fließkurve, die aus dem Druckversuch stammt, gerechnet. Um jedoch die Simulation induzierter Druckeigenspannungen auf Grund des Festwalzprozess zu verbessern werden im Verlauf dieser Arbeit verschiedene Ansätze betrachtet: zu einem die Berücksichtigung der eventuell auftretenden Schädigung durch das mehrmalige Überwalzen des Bauteils oder die Implementierung eines zyklischen Werkstoffverhaltens.

Des Weiteren wird auf die Problematik der röntgenographischen Eigenspannungsmessung in oberflächennahen Werkstoffschichten eingegangen. Durch Simulation der elektrochemischen Abtragung der einzelnen Oberflächenschichten wird es möglich die Umlagerungen der induzierten Spannungen darzustellen.

Kapitel 2

Mechanisches Verhalten von Werkstoffen

Wenn ein Werkstoff bzw. ein Bauteil mit einer Kraft beansprucht wird, treten Verformungen auf, die eine Verschiebung der Atome im Werkstoff mit sich zieht. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen reversiblen und irreversiblen Verformungen. Die reversiblen Verformungen, wie zum Beispiel bei Federn, sind jene bei denen der Werkstoff nach der Entlastung wieder seine ursprüngliche Form annimmt. Hingegen bleibt bei einer irreversiblen Verformung, wie sie zum Beispiel beim Schmiedeprozess vorkommt, nach Beendigung der Belastung die geänderte Form des Werkstoffs erhalten. Allgemein werden die reversiblen Verformungen als elastisch, die irreversiblen Verformungen als plastisch bezeichnet. Weiters wird zwischen zeitabhängigen und zeitunabhängigen Verformungen unterschieden. Bei einer zeitabhängigen Verformung reagiert das Material verzögert auf die Änderung der Belastung und bei einer zeitunabhängigen Verformung reagiert das Material praktisch sofort [10].

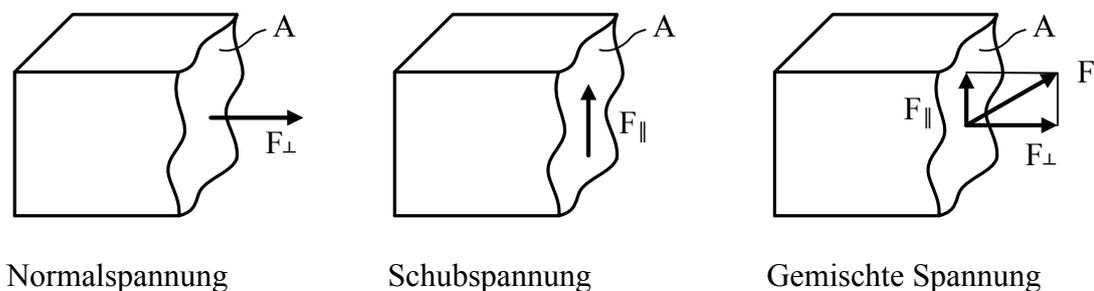


Abb. 2.1: Schematische Darstellung der Spannungsarten [10]

2.1 Spannungen

Belastungen von Bauteilen entstehen durch Kräfte und Momente. Die Beanspruchungen des Materials hängen hierbei von der Größe des belasteten Querschnitts ab. Wird der Querschnitt vergrößert, so vermindert sich die Beanspruchung. Um eine normierte Größe zu erhalten, wird die Spannung σ (Kraft F pro Fläche A), eingeführt. Die Spannungen werden durch die Orientierung der Kraft zur Fläche differenziert.

Wirkt zum Beispiel die Kraft normal auf die Fläche, siehe Abb. 2.1 links, so spricht man von der Normalspannung σ . (Glg. 2.1)

$$\sigma = \frac{F_{\perp}}{A} \quad (2.1)$$

Wirkt sie hingegen parallel zur Fläche (Abb. 2.1), so wird die Spannung als Schubspannung τ bezeichnet. (Glg. 2.2)

$$\tau = \frac{F_{\parallel}}{A} \quad (2.2)$$

Alle anderen auftretenden Fälle können in diese beiden Spannungen zerlegt und damit auch beschrieben werden.

2.2 Dehnungen

Wenn eine Belastung auf ein Bauteil wirkt, verschieben sich Punkte innerhalb des Bauteils. Diese Verschiebungen können durch unterschiedliche Ursachen hervorgerufen werden:

- Durch Bewegung des gesamten Bauteils. Dies wird als Starrkörperverschiebung bezeichnet.
- Durch Drehung des Bauteils ohne Verformung (Starrkörperrotation).

In beiden Fällen werden Abstände und Winkel der Punkte innerhalb des Materials nicht verändert und somit findet keine Verformung des Bauteils statt. Wenn man also die Verformung eines Bauteils beschreiben möchte, so ist eine Betrachtung der Verschiebung allein nicht sinnvoll. Somit ist es erforderlich, die Längenänderungen und die Winkelverzerrungen innerhalb eines Bauteils zu beschreiben. Dies wird durch die Angabe der Änderung der Verschiebung mit dem betrachteten Ort erreicht.

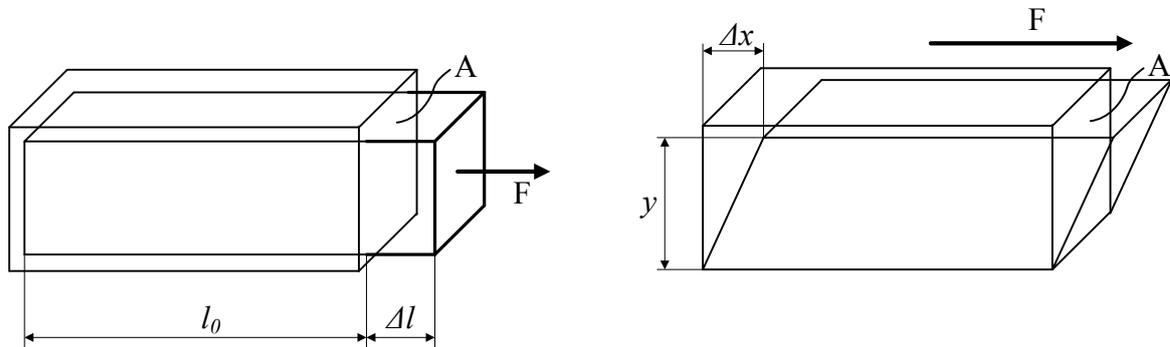


Abb. 2.2: Einfache Beanspruchungsarten [10]

Alle Änderungen der Form eines Bauteils können durch die Längenänderungen und die Winkelverzerrungen (Scherungen) beschrieben werden. Die Normaldehnung ϵ ist für den Fall von Längenänderungen als die Differenz (Δl) zwischen der Länge nach der Verformung (l_1) und der Ausgangslänge (l_0) bezogen auf die Ausgangslänge definiert (Glg. 2.3).

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.3)$$

Für Winkelverzerrungen ist die Scherung γ , die der Änderung eines Winkels eines anfänglich rechten Winkels entspricht, definiert als (Glg. 2.4)

$$\gamma = \frac{\Delta x}{y} \quad (2.4)$$

wobei hier Δx und y senkrecht aufeinander stehen.

2.3 Plastisches Verhalten und Versagen

Wenn ein Körper durch eine Belastung plastisch verformt wird, so bleibt die Verformung nach Ende der Belastung erhalten. Dem zufolge sind plastische Verformungen irreversibel. Jeder plastischen Verformung ist eine elastische Formänderung überlagert. Somit ergibt sich die Herausforderung die experimentell erhaltenen Dehnungen in einen elastischen und einen plastischen Anteil zu zerlegen. Man spricht ähnlich wie bei der Elastizität von einer zeitunabhängigen oder von einer zeitabhängigen Form von plastischen Verformungen. Im Folgenden ist mit Plastizität immer die zeitunabhängige und mit Kriechen bzw. Viskoplastizität die zeitabhängige Form gemeint.

Auf Grund von plastischen Verformungen können Bauteile beispielsweise durch Tiefziehen, Walzen oder Schmieden in eine neue Form gebracht werden, was natürlich für die Herstellung verschiedener Produkte elementar ist. Im Einsatz selbst ist plastische Formänderung meist unerwünscht, da sie große Deformationen mit sich bringt. Jedoch erhält man durch das Auftreten plastischer Verformung vor dem Versagen eine gewisse Sicherheit, da das Versagen erkannt und somit Abhilfe geleistet werden kann. In Crashbauteilen wird die plastische Deformation verwendet, um bei einem etwaigen Crash kinetische Energie zu verbrauchen und somit eine Art Verzögerung, zum Beispiel eines Fahrzeugs, zu erreichen. Bei Verformungen im plastischen Bereich werden Atome im Material bleibend umverteilt. Somit ist es durchaus sinnvoll Dehnungen für den aktuell herrschenden Zustand zu berechnen und nicht alle Formänderungen auf den Anfangszustand zu beziehen. Wenn ein Bauteil plastisch verformt wird und anschließend wieder in die Ausgangsform gebracht wird, so könnte man meinen es besitze wieder den Originalzustand, jedoch wandern die Atome meist nicht mehr in die Ausgangslage zurück. Wegen diesem Verhalten ist der aktuell herrschende Werkstoffzustand bei plastischer Verformung auch von der Vorformungsgeschichte und nicht von der gerade vorliegenden Dehnung abhängig. Um die Verformungsgeschichte eines Metalls beschreiben zu können, wird die plastische Vergleichsdehnung ϵ_v verwendet, bei der alle plastischen Dehnungen unabhängig der Richtung positiv sind und im Zuge der Verformungsfolge addiert werden.

2.3.1 Wahre und technische Dehnung

Wird die Dehnung auf den Originalzustand bezogen, so spricht man von der Nenndehnung bzw. von der technischen Dehnung. Treten nur kleine Verformungen auf, so ist die technische Dehnung ausreichend genau.

Bei der wahren Dehnung bzw. Umformgrad φ wird die Dehnung in unendlich kleine Bereiche aufgeteilt und auf die aktuellen Abmessungen bezogen (Glg. 2.5). Es gilt also:

$$d\varphi = \frac{(l + dl) - l}{l} = \frac{dl}{l} \quad (2.5)$$

Um die Gesamtdehnung zu bekommen, müssen die einzelnen Teildehnungen aufsummiert beziehungsweise aufintegriert werden (Glg. 2.6):

$$\varphi = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0} = \ln \left(1 + \frac{\Delta l}{l_0} \right) = \ln(1 + \epsilon) \quad (2.6)$$

In Abb. 2.3 wird anhand eines Zugversuches die wahre und die technische Dehnung, bezogen auf die gesamte Messlänge, dargestellt. Wie man erkennen kann, sind die Spannungen der wahren Dehnung höher als die der technischen, da sich während des Zugversuchs der Probenquerschnitt verringert. Im letzten Teil des Versuches nimmt die Spannung der wahren Dehnung wieder ab. Dies resultiert aus großen Einschnürungen und der dadurch zu groß angenommenen Querschnittsflächen. Der reale Verlauf muss somit abgeschätzt werden [10].

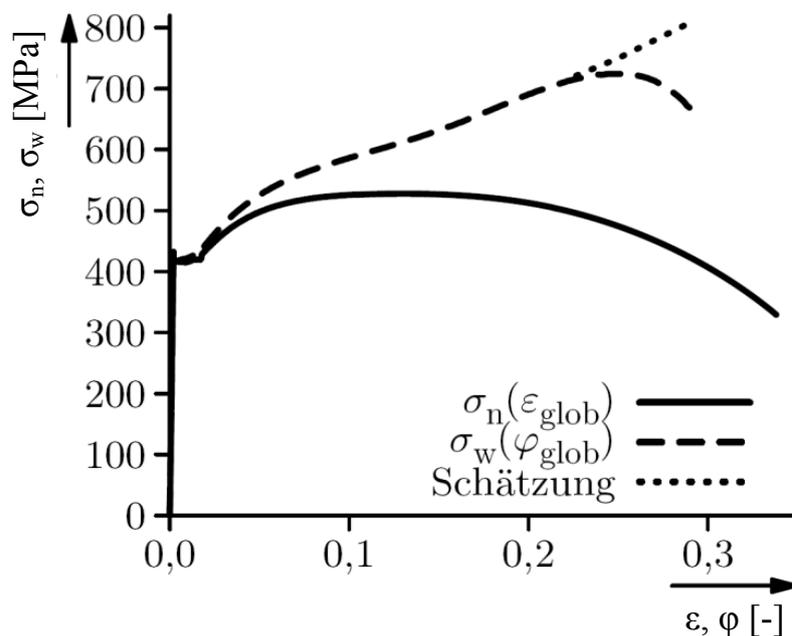


Abb. 2.3: Wahre und technische Dehnung [10]

2.4 Werkstoffverhalten bei zyklischer Beanspruchung

Die während der gesamten Belastungszeit auftretenden Werkstoffveränderungen können auf Grund von Änderungen physikalischer Eigenschaften beobachtet werden. Es kommt zum Beispiel zu einem Anstieg des elektrischen Widerstandes, einer Abnahme der Wärmeleitfähigkeit und wie schon zuvor erwähnt zur Abnahme von induzierten Eigenspannungen.

Bei all diesen Veränderungen zeigt sich, dass in den ersten Prozent der Lebensdauer die größten Eigenschaftsänderungen stattfinden, dann aber eine gewisse Stabilisierung bzw. Sättigung der signifikanten Eigenschaften beobachtet werden kann. Erst am Ende der Lebensdauer kommt es wieder zu großen Änderungen, nun aber als Folge makroskopischer

Rissbildung [7].

2.4.1 Die mechanische Hysterese

Der nichtlineare Zusammenhang von Spannung und Dehnung, der bei elastisch-plastischer Belastung im Wöhler-Versuch mit ungekerbten Proben auftritt, wird in Form einer Hystereseschleife abgebildet. Es sind die Spannungs- und Dehnungsamplituden, die entsprechenden Schwingbreiten, als auch die Unterteilung der Dehnungsschwingbreiten in einen elastischen und plastischen Anteil ersichtlich. (Abb. 2.4)

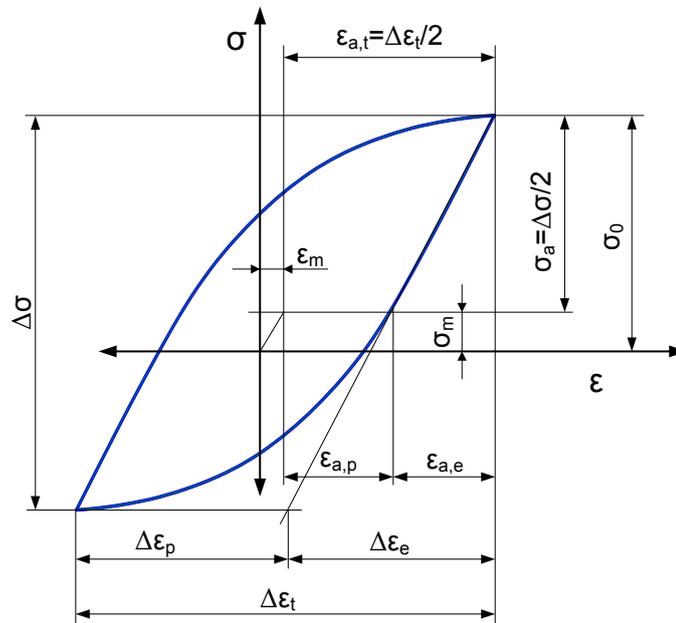


Abb. 2.4: Hystereseschleife mit zugehörigen Kennwerten [6]

Die von der Hysterese aufgespannte Fläche beschreibt die pro Volumenelement geleistete Verformungsarbeit und ergibt sich aus dem Produkt der Konstanten C , der Gesamtspannungsbreite $\Delta\sigma$ und der plastischen Dehnungsamplitude $\epsilon_{a,p}$. (Glg. 2.7)

$$W_H = \oint \sigma d\epsilon = C \cdot \Delta\sigma \cdot \epsilon_{a,p} \quad (2.7)$$

Wobei der größte Teil dieser Verformungsarbeit in Wärmeenergie übergeht und nur ein wesentlich kleinerer Teil gespeichert wird. [7] [13]

2.4.2 *Bauschinger*-Effekt

Das Auftreten einer Hystereseschleife ist eng mit dem *Bauschinger-Effekt* verbunden. Dieser besagt, dass die zur Weiterverformung erforderliche Spannung bzw. die Elastizitätsgrenze kleiner ist, siehe Abb. 2.5, wenn generell plastische Verformung und die Vorverformung bzw. Weiterverformung durch Änderung der Belastungsrichtung erfolgt. Dieser Effekt ist vom Werkstoff abhängig und besonders ausgeprägt bei ausscheidungsgehärteten Legierungen, wie zum Beispiel Al-Legierungen [7].

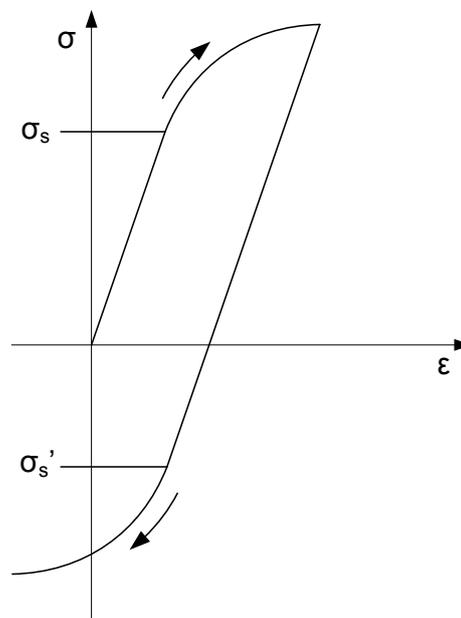


Abb. 2.5: Änderung der Elastizitätsgrenze auf Grund des *Bauschinger*-Effekts

2.4.3 Zyklische Ver- und Entfestigung

Durch zyklische Belastungen kommt es zu mikrostrukturellen Veränderungen im Material, was eine Abänderung der Hysterese mit sich zieht. Im weiteren Verlauf der Beanspruchung kann es zur zyklischen Verfestigung, zyklischen Entfestigung oder zu einer Mischform der beiden Verfestigungsarten kommen. Die Versuche können spannungs- oder dehnungsgeregelt durchgeführt werden.

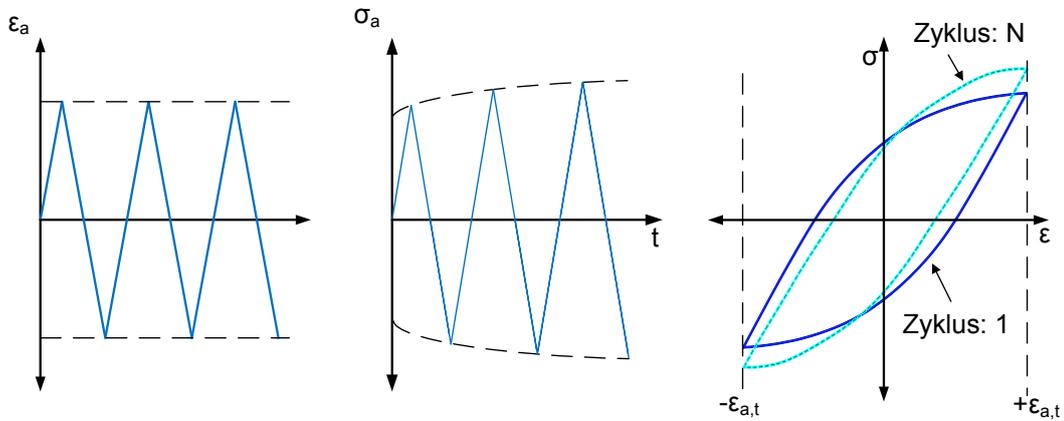


Abb. 2.6: Zyklische Verfestigung

In Abb. 2.6 ist eine zyklische Verfestigung abgebildet. In dehnungsgeregelten Versuchen äußert sich die Verfestigung in Form einer Spannungszunahme. Der Zyklus 1 bezeichnet den Ersten und Zyklus N einen nach mehreren Verformungsschritten.

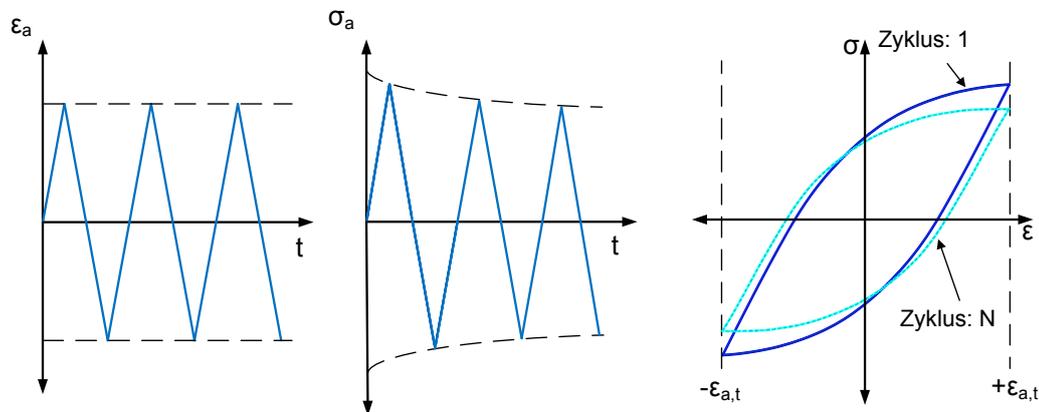


Abb. 2.7: Entfestigung

Bei zyklischer Entfestigung tritt hingegen beim dehnungsgeregeltem Versuch eine Abnahme der Spannungsamplitude auf, siehe Abb. 2.7.

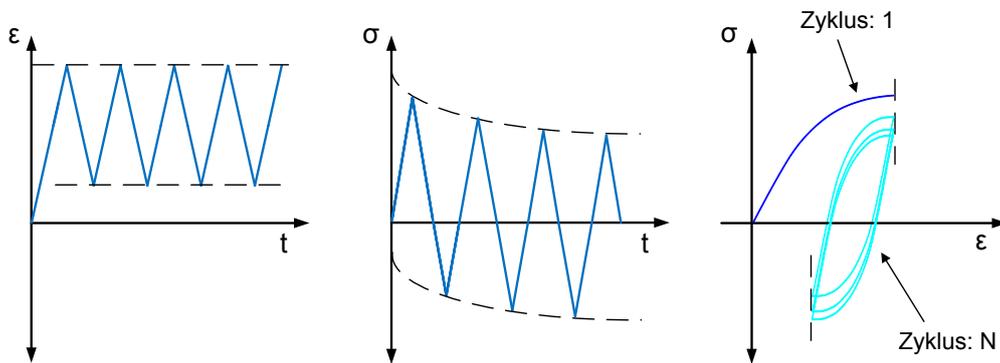


Abb. 2.8: Zyklische Mittelspannungsrelaxation

Bei zyklischer Belastung mit einer von null verschiedenen vorgegebenen Mitteldehnung kommt es zu einer Mittelspannungsrelaxation, siehe Abb. 2.8, die sich in Form einer Verschiebung der Hysterese in Richtung $\sigma_m = 0$ äußert.

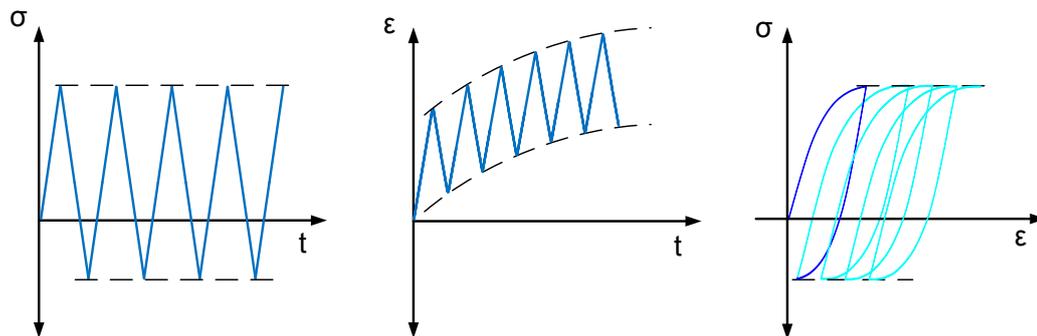


Abb. 2.9: Zyklisches Kriechen

Zyklisches Kriechen, siehe Abb. 2.9, zeichnet sich durch Zunahme während der zyklischen Belastung der Mitteldehnung ab. Die Hysterese verschiebt sich entlang der Dehnungsachse. Kriechen und Mittelspannungsrelaxation hängen von Werkstoffeigenschaften und Belastung ab.

Diese bei zyklischer Beanspruchung auftretenden Vorgänge konzentrieren sich auf den Anfangsbereich. Nach einer gewissen Schwingspielanzahl erfährt die Werkstoffreaktion eine Sättigung, welche den überwiegenden Lebensdauerbereich umfasst. Durch Erhöhung der Beanspruchungsamplitude nimmt die Schwingspielzahl bis zum Erreichen der Sättigung und der Bruchschwingspielzahl ab. Erst im Endstadium, der Rissinizierung, treten starke Veränderungen der Hystereseschleife auf [7] [22].

Kapitel 3

Eigenspannungen

Eigenspannungen sind mechanische Spannungen, die in einem Festkörper vorhanden sind, der von außen durch keine Kräfte belastet wird. Das heißt, dass die inneren Kräfte die durch die Eigenspannungen hervorgerufen werden, im Gleichgewicht stehen. Das System des Festkörpers ist als abgeschlossen zu betrachten. Spannungen, die von außen durch nichtmechanische Einwirkungen entstehen (wie zum Beispiel durch Temperaturgradienten), werden als Lastspannungen bezeichnet. Vollkommen eigenspannungsfreie Festkörper existieren grundsätzlich nicht. Es gibt eine Vielzahl von Ursachen für die Entstehung von Eigenspannungen, wie zum Beispiel durch:

- Bearbeiten (Schleifen, Drehen, Bohren)
- Fügen (Schweißen, Löten, Kleben)
- Umformen (Festwalzen, Schmieden, Kugelstrahlen)
- Wärmebehandeln (Härten, Einsatzhärten, Nitrieren)
- Beschichten (Verzinken, Spritzen, Galvanisieren)

Da die Einteilung nach verfahrensbezogener oder ursachenbezogener Entstehung nicht immer eindeutig ist, hat man sich auf folgende Definitionen festgelegt. Grundsätzlich setzen sich die lokal herrschenden Eigenspannungen aus drei Eigenspannungsanteilen zusammen. Um die resultierenden Eigenspannungen zu erhalten werden die drei Spannungsanteile aufsummiert [19]. (Glg. 3.1)

$$\sigma_{ES} = \sigma_{ES,I} + \sigma_{ES,II} + \sigma_{ES,III} \quad (3.1)$$

In Abb. 3.1 sind die drei Eigenspannungsanteile dargestellt.

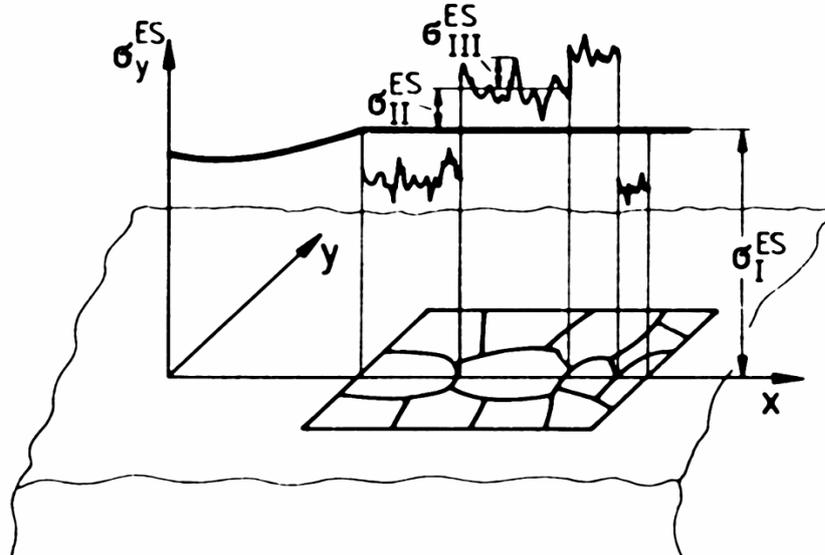


Abb. 3.1: Schematische Verteilung der Eigenspannungen I., II. und III. Art in den Körnern eines einphasigen, vielkristallinen Werkstoffes [19]

3.1 Eigenspannungen I. Art

Eigenspannungen I. Art sind über größere Werkstoffbereiche, das heißt mehrere Körner, als nahezu homogen anzusehen. Der größere Werkstoffbereich kann dabei flächenhaft ausgedehnt und von infinitesimaler Dicke sein. Vertikal dazu sind steile Gradienten der Eigenspannungen I. Art zulässig. Innere Kräfte, die mit den Eigenspannungen I. Art verbunden sind, sind bezogen auf alle Schnittflächen durch den gesamten Körper im Gleichgewicht. Das gilt auch für die mit ihnen verbunden inneren Momente bezüglich jeder Achse. Durch Einwirken in das Kräfte-Momentengleichgewicht von Körpern, in denen Eigenspannungen I. Art vorhanden sind, resultieren immer makroskopische Maßänderungen. Mathematisch bedeutet dies:

$$\sigma_{ES,I} = \frac{\int \sigma_{ES} dA}{\int dA} \quad (3.2)$$

In Glg. 3.2 wird der Bereich über mehrere Körner ($A = n \cdot A_K$) betrachtet.

3.2 Eigenspannungen II. Art

Eigenspannungen II. Art sind über kleine Werkstoffbereiche, das heißt ein Korn oder Kornbereiche, annähernd homogen. Die mit diesen Eigenspannungen in Beziehung stehenden inneren Kräfte und Momente sind über einige Körner im Gleichgewicht. Durch Eingriff in dieses Gleichgewicht können makroskopische Maßänderungen beobachtet werden.

$$\sigma_{ES,II} = \frac{\int \sigma_{ES} dA_K}{\int dA_K} - \sigma_{ES,I} \quad (3.3)$$

Für die Eigenspannungen II. Art wird der Bereich eines Kornes (A_K) betrachtet. (Glg. 3.3)

3.3 Eigenspannungen III. Art

Eigenspannungen III. Art sind über kleinste Werkstoffbereiche, damit sind mehrere Atomabstände gemeint, inhomogen. Die mit dieser Art von Eigenspannungen verbundenen inneren Kräfte beziehungsweise Momente sind in kleinen Bereichen im Gleichgewicht. Durch Einwirken in dieses Gleichgewicht treten keine makroskopischen Maßänderungen auf.

$$\sigma_{ES,III} = \sigma_{ES} - (\sigma_{ES,I} + \sigma_{ES,II}) \quad (3.4)$$

Hier wird auf den Punkt x eines Kornes Bezug genommen. (Glg. 3.4)

3.4 Stabilität von Eigenspannungen

3.4.1 Thermischer Eigenspannungsabbau

Der temperaturbedingte Abbau von Eigenspannungen kann durch unterschiedliche Mechanismen verursacht werden. Generell führt eine genügend lange Auslagerung des Werkstoffes bei einer Temperatur oberhalb von $0,5 \cdot T_S$ (Schmelztemperatur) zu einem vollständigen Abbau der Makroeigenspannungen auf Grund von Rekristallisation beziehungsweise Kornneubildung. Jedoch auch bei niedrigeren Temperaturen findet schon ein Eigenspannungsabbau statt. Dieser Abbau ist auf mit Versetzungsbewegungen verbundenen Prozessen, die durch den Einfluss von Wärme begünstigt werden, zurückzuführen. Grundsätzlich hängt die Stabilität, der durch mechanische Oberflächenverfestigungsverfahren eingebrachten Eigenspannungen, von der im System wirkenden Temperatur bzw. der Dauer

welcher der Werkstoff dieser Temperatur ausgesetzt ist, vom Werkstoff selbst und des gewählten Bearbeitungsverfahrens ab.

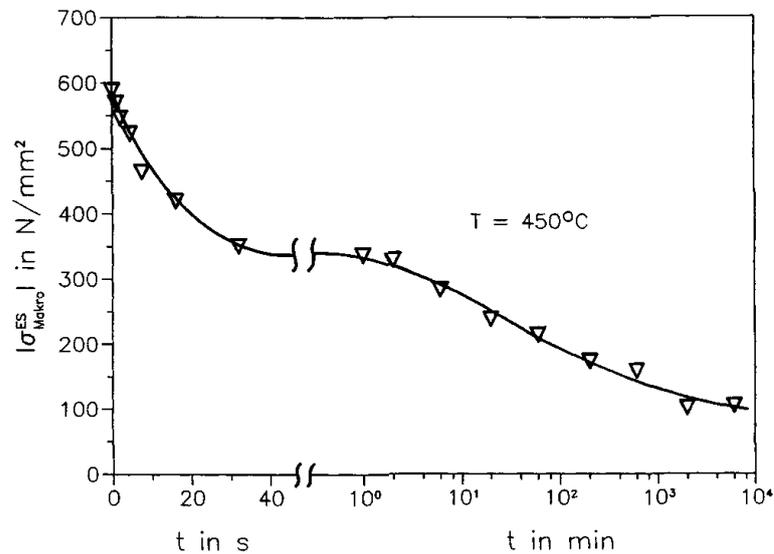


Abb. 3.2: Abnahme der Makro- Eigenspannungsbeträge mit zunehmender Zeit bei 450°C [3]

In Abb. 3.2 ist die Abnahme der Eigenspannungen mit zunehmender Zeit über einer anfangs linearen und anschließend logarithmischen Zeitachse eines Vergütungsstahls *42Cr-Mo4* abgebildet. Die Spannungen wurden zuvor durch Kugelstrahlen eingebracht [3].

3.4.2 Mechanischer Eigenspannungsabbau

Quasistatisch

Verformt man randschichtverfestigte Werkstoffe bis in den plastischen Bereich, so folgen charakteristische Änderungen der in den oberflächennahen Bereichen vorliegenden Eigenspannungen. Dies kann beispielsweise durch Umform- oder Nachformvorgänge verursacht werden. In Abb. 3.3 wird die Auswirkung von homogener Zug (links)- bzw. Druckbeanspruchung (rechts) auf eine kugelgestrahlte Probe aus *AlCu5Mg2* abgebildet. Es zeigt sich, dass sich die Eigenspannungen auf Grund von Zug- bzw. Druckbelastung unterschiedlich verhalten [19] [17] [1].

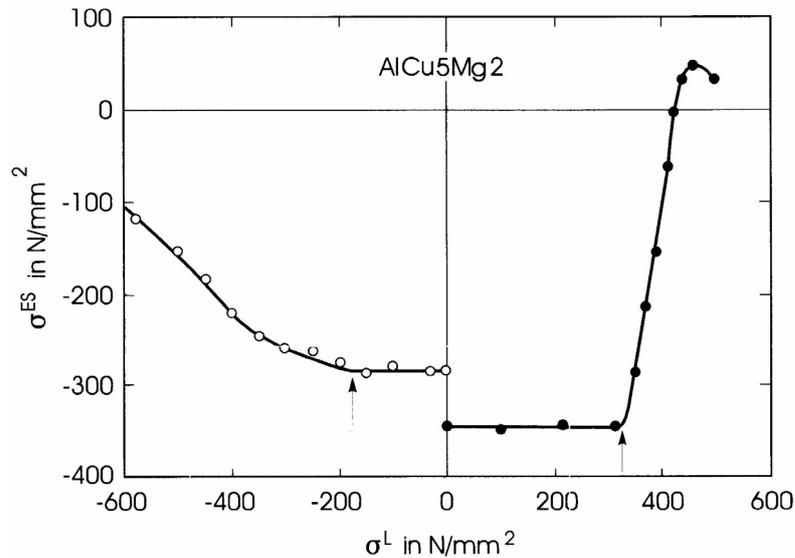


Abb. 3.3: Abbau von Strahl eigenspannungen bei der Al-Legierung *AlCu5Mg2* durch Zug- bzw. Druckverformung [17]

Zyklisch

Bei zyklischer Belastung ist die Stabilität der eingebrachten Eigenspannungen abhängig von der Beanspruchungsart, dem durch die Mittelspannung und die Spannungsamplitude charakterisierten zeitlichen Verlauf der Belastung, der Höhe der eingebrachten Eigenspannungen und dem Werkstoffzustand.

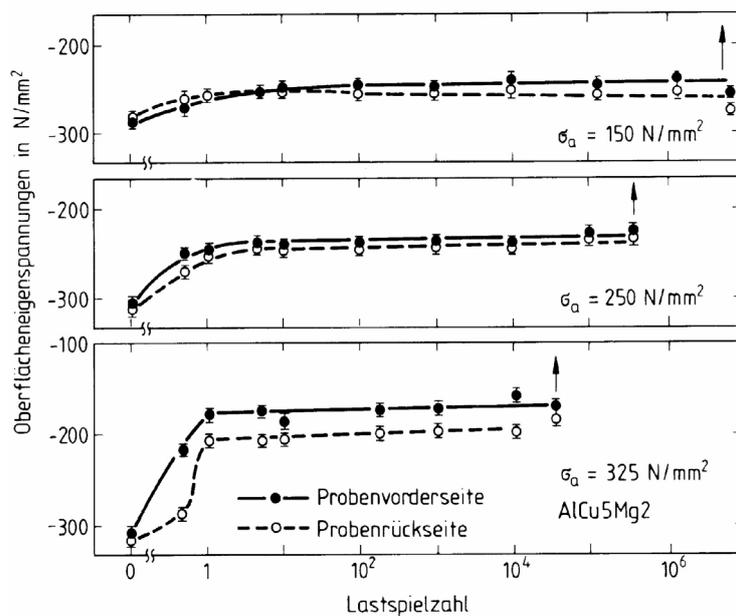


Abb. 3.4: Eigenspannungsabbau bei Biegewechselbeanspruchung von *AlCu5Mg2* [19]

In Abb. 3.3 wird der Einfluss der Spannungsamplitude auf den Abbau der Eigenspannungen anhand einer kugelgestrahlten Legierung AlCu5Mg2 dargestellt. Die gezeigten Ergebnisse dienen als Beispiel für den Einfluss der Spannungsamplituden auf den Abbau der Eigenspannungen. Abgebildet sind die Resultate von mittelspannungsfreien Wechselbiegeversuchen an der kugelgestrahlten Legierung AlCu5Mg2. Für drei verschiedene Spannungsamplituden sind die auf der zug- bzw. druckbeanspruchten Probenseite nach bestimmten Lastspielzahlen vorliegenden Eigenspannungen wiedergegeben. Die Bruchlastspielzahlen werden durch die Pfeile gekennzeichnet. Wie man sieht treten die größten Eigenspannungsänderungen schon während der ersten Zyklen auf. Anschließend bleiben die Eigenspannungen annähernd konstant. Der Spannungsabbau ist umso stärker, je größer die wirksame Spannungsamplitude ist [19].

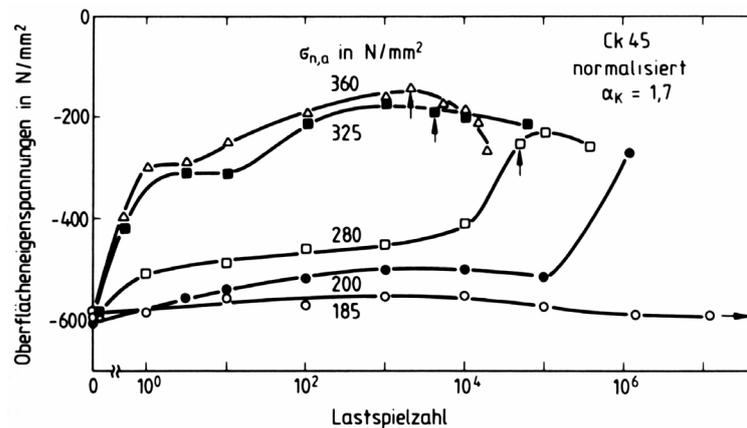


Abb. 3.5: Eigenspannungsabbau bei Biegewechselbeanspruchung normalisierter, gefräster Kerbproben aus Ck45 (Pfeile markieren das Auftreten erster Oberflächenrisse) [19]

Wie im Bild (Abb. 3.5) ersichtlich wurden vergleichbare Ergebnisse an gekerbten Proben aus normalisierten Ck45 erzielt. Bei der kleinsten Amplitude, die ungefähr der Dauerfestigkeit entspricht, wird fast kein Abbau der Eigenspannungen festgestellt. Jedoch bei steigender Spannungsamplitude und zunehmender Lastwechselanzahl nimmt der Einfluss stark zu [19].

3.5 Wirkungsweise von Druckeigenspannungen

Für die Verbesserung der Dauerfestigkeit von Bauteilen, welche auf Torsion und/ oder Biegung beansprucht werden, werden durch mechanische Oberflächenbehandlungen (wie in diesem Fall durch Festwalzen bestimmter Werkstoffbereiche) Druckeigenspannungen

induziert. Durch Überlagerung dieser Spannungen mit den durch die jeweilige Belastung resultierenden Spannungen kann eine Verbesserung des Spannungszustandes erreicht werden. Zugleich wird durch die Oberflächenbehandlung die Randschichthärtte erhöht und somit die lokale Festigkeit gesteigert.

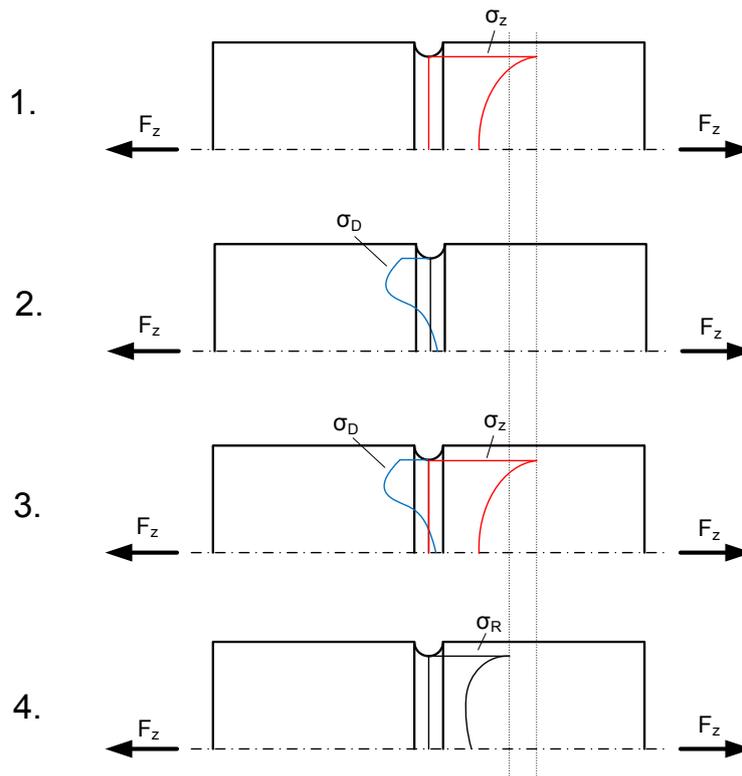


Abb. 3.6: Wirkungsweise von Druckeigenstressungen

In Abb. 3.6 ist ein Halbschnitt einer gekerbten Probe zu sehen. Sie wird durch eine Zugkraft (F_z) belastet, woraus eine Zugspannung (σ_z) resultiert (1.). Durch eine mechanische Oberflächenbehandlung werden Druckeigenstressungen induziert (2.). Es kommt zu einer Überlagerung von Zug- und Druckspannungen (3.). Wie man in der Abb. sieht, vermindern sich dadurch die herrschenden Zugspannungen (σ_R) (4.).

3.6 Methoden zur Messung von Eigenstressungen

Es gibt eine Vielzahl von verschiedenen Methoden, Eigenstressungen experimentell oder theoretisch zu ermitteln. Die experimentellen Methoden, wie:

- mechanische Verfahren
- akustische Verfahren
- magnetische Verfahren
- Beugungsverfahren
- sonstige Verfahren

können in zerstörungsfreie, quasi-zerstörungsfreie (nur minimaler Eingriff an der Messstelle notwendig) und zerstörende eingeteilt werden. Auch wird zwischen rein qualitativen, quantitativen und halbquantitativen Methoden unterschieden [19].

3.6.1 Mechanische Verfahren

Bei den mechanischen Eigenspannungsmessverfahren sind die durch mechanischen bzw. zerstörenden Eingriff hervorgerufenen makroskopischen Formänderungen die Indikatoren für die Messung. Die auftretenden Verformungen werden über Dehnungsmesseinrichtungen ermittelt und so auf den anfangs herrschenden Eigenspannungszustand zurück gerechnet.

Ermittelt werden nur Eigenspannungen I. Art. Der apparative Aufwand hält sich in Grenzen. Die zerstörende Vorgehensweise erweist sich natürlich als Nachteil. Man versucht durch sehr kleine Eingriffe auf die Bauteilgeometrie dies zu minimieren und so eine quasi-zerstörungsfreie Messung zu erreichen [19].

3.6.2 Akustische Verfahren

Eigenspannungen haben auch Einfluss auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schallwellen in kristallinen Festkörpern. Die Eigenschaft wird als akustoelastischer Effekt bezeichnet und resultiert wiederum aus den von Eigenspannungen verursachten Deformationen.

Diese Spannungsmessungen können innerhalb oder außerhalb des Labors erfolgen und sind mit nur vergleichsweise geringem Zeitaufwand verbunden [19].

3.6.3 Magnetische Verfahren

Das magnetische Eigenspannungsmessverfahren ist nur bei ferromagnetischen Materialien einsetzbar. Als Messgrößen werden spannungssensitive Kenngrößen der magnetischen Hystereseschleifen verwendet. Durch vorliegende Spannungsfelder beziehungsweise Eigenstressungen werden beim Durchlaufen der magnetischen Hystereseschleife die Ummagnetisierungsprozesse auf unterschiedliche Art und Weise beeinflusst. Messgrößen sind die Koerzitivfeldstärke, die Überlagerungspermeabilität, die dynamische Magnetostriktion und das magnetische und akustische Barkhausenrauschen.

Leider sind die Zusammenhänge der magnetischen Messgrößen und der Mikrostruktur nicht trivial, jedoch ist dieses Verfahren zerstörungsfrei und nur mit eher geringem Zeitaufwand verbunden [19].

3.6.4 Beugungsverfahren

Prinzip des Röntgendiffraktometers

Wenn ein monochromatischer Röntgenstrahl J_0 (siehe Abb. 3.7) der Wellenlänge λ unter dem Winkel θ in der Zeichenebene auf ein Kristallgitter mit dem Gitterebenenabstand D_0 trifft, dann entsteht symmetrisch zur Normalen N der Netzebenen ein abgebeugter Röntgenstrahl J mit dem gleichen Winkel θ (entspricht dem Bragg-Winkel). Dies tritt unter der Bedingung auf, dass der Gangunterschied der abgebeugten Strahlen ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlänge λ ist.

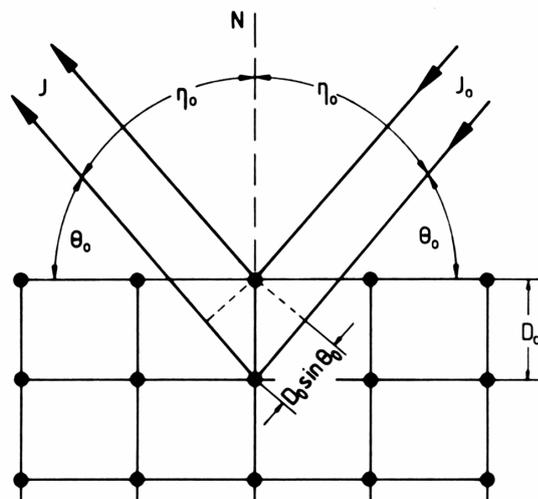


Abb. 3.7: Schematische Darstellung der Bragg'schen Interferenzbedingung [19]

Mathematisch wird dies durch Glg. 3.5 beschrieben:

$$2 \cdot D_0 \cdot \sin(\theta_0) = n \cdot \lambda \quad (3.5)$$

Diese mathematische Formulierung wird auch als Bragg'sche Gleichung bezeichnet.

Ermittlung der Gitterdeformationen

Durch Anwendung der Bragg'schen Gleichung (Glg. 3.5) lassen sich die Gitterdeformationen über Glg. 3.6 bestimmen:

$$\epsilon^G = \frac{\Delta D}{D_0} = \frac{D_\psi - D_0}{D_0} \quad (3.6)$$

Hierfür werden Messungen bei eigenspannungsfreien Proben und bei Proben mit Eigenspannungen vorgenommen, damit die Gitterdeformationen bestimmt werden können. (Abb. 3.8)

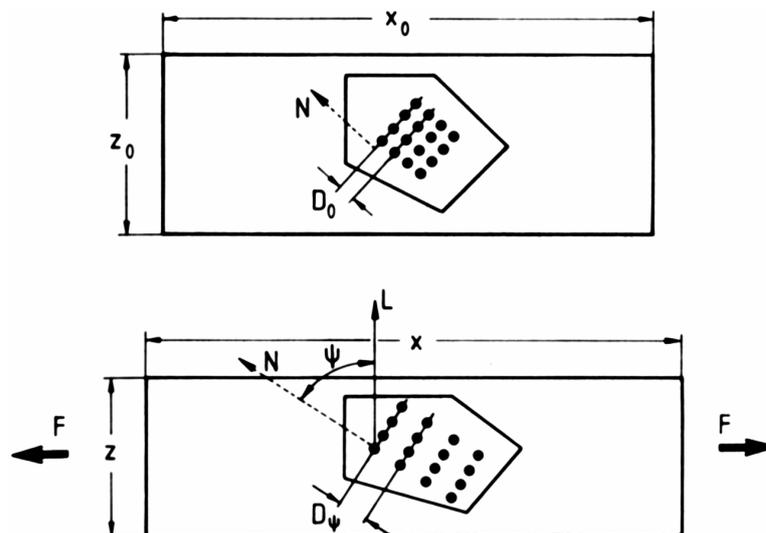


Abb. 3.8: Definition der makroskopischen Dehnungen und Gitterdehnungen [19]

Der Winkel ψ ist der Inklinationswinkel in einem Kugelkoordinatensystem. Er beschreibt die Neigung der Netzebenennormalen N zu der Oberflächennormalen L . Die Messebene selbst wird durch den Azimutwinkel φ' beschrieben.

Verfahren für die Auswertung

Für die Auswertung bei der röntgenographischen Eigenspannungsanalyse können entweder Gitterdeformationen in bestimmten Ebenen, wobei gilt $\varphi'_i = const$, als Funktion von ψ , oder die Gitterdeformationen in bestimmten Richtungen, wobei gilt $\psi_i = const$, als Funktion von φ aufgezeichnet werden. Die erste Variante wird als ψ -Verfahren und die zweite als φ -Verfahren bezeichnet. Weiters wird auch zwischen Integral- und Differentialverfahren unterschieden [19].

3.6.5 Sonstige Verfahren

Es gibt auch Messmethoden die auf bestimmten nuklearphysikalischen Effekten basieren, wie z.B.: magnetische Kernresonanz oder Positronenannihilation. Jedoch sind diese Verfahren noch nicht Praxis relevant [19].

Kapitel 4

Mechanische Oberflächenbehandlungen

Bei den mechanischen Oberflächenbehandlungsverfahren werden durch verschiedene Methoden wie Hämmern bzw. Schmieden, Festwalzen, Kugelstrahlen etc. die oberflächennahen Schichten elastisch-plastisch kaltverformt. Die im Bereich der Oberfläche liegenden Werkstoffschichten werden plastisch und die tiefer liegenden elastisch verformt. Dadurch resultieren nach der mechanischen Oberflächenbehandlung Verfestigungsbereiche und Druckeigenspannungen in der Randzone. Diese Phänomene dienen der Erhöhung des Widerstandes gegen Schwingrissbildung bzw. Schwingrissausbreitung, Reibkorrosion, Schwingrisskorrosion und somit einer wesentlichen Verbesserung der Dauerfestigkeit.

Die mechanischen Oberflächenverfestigungsverfahren sind bei nahezu allen metallischen Werkstoffen anwendbar und erreichen die Steigerung der Schwingfestigkeit durch:

- Verfestigung der außenliegenden Werkstoffschichten und somit Behinderung von Rissbildung
- induzierte Druckeigenspannungen
- Verringerung der Oberflächenrauigkeit (nicht bei allen Verfahren z.B.: Kugelstrahlen).

Die durch die verschiedenen Verfahren verursachte Zunahme der Härte hängt von den Verfestigungseigenschaften und den Ausgangszuständen der zu bearbeiteten Werkstoffe ab. Bei großer Härte im Ausgangszustand kann keine große Härtesteigerung mehr erfolgen, es kann sogar zu Entfestigungserscheinungen kommen [17].

Im folgenden werden einige Verfahren der Oberflächenbehandlung näher beschrieben, wobei der Hauptaugenmerk bei Festwalzen liegt.

4.1 Hochdruckwasserstrahlen

Beim Hochdruckwasserstrahlen wird mittels eines Wasserstrahls mit hoher Geschwindigkeit, der auf die Werkstückoberfläche gerichtet ist, die plastische Verformung beziehungsweise die Verfestigung der Oberflächenrandschicht erreicht. Der wesentliche Vorteil im Vergleich zum Kugelstrahlen besteht darin, dass die Druckeigenspannungen ohne die Oberflächenfeingestalt zu verändern und die Oberflächenrauigkeit zu erhöhen, induziert werden.

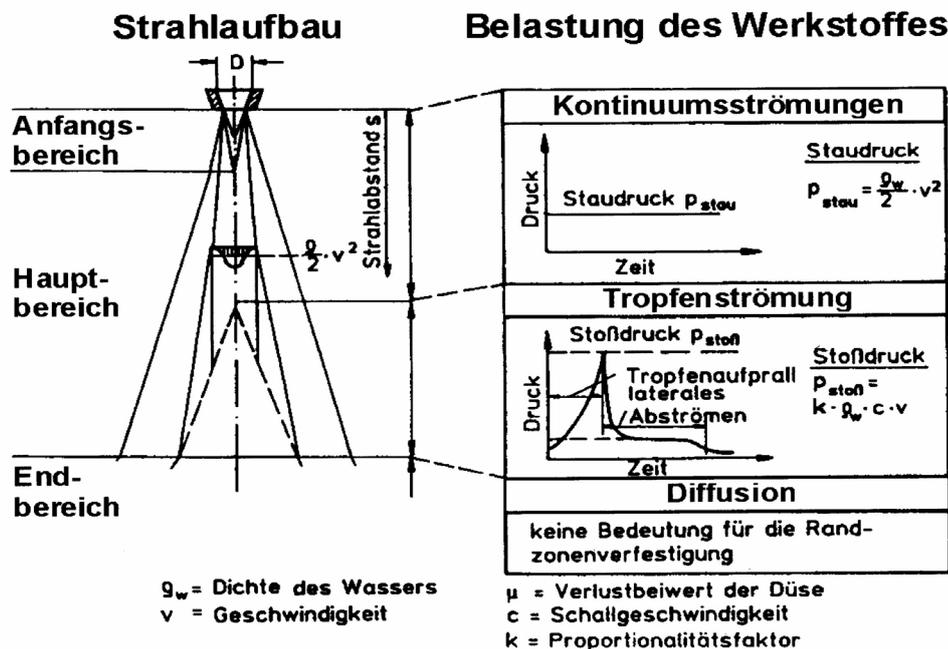


Abb. 4.1: Hochdruckwasserstrahlen [17]

4.2 Ultraschall-Schlagbehandlung

Bei der Ultraschall-Schlagbehandlung wird die Werkstückoberfläche durch Stöße eines Werkzeuges mit geringer Masse mit hoher Frequenz (ca. 27 Hz) bearbeitet. Daraus resultieren Druckeigenspannungen in den oberflächennahen Schichten. Vorteile gegenüber dem konventionellen Hämmern ist die bessere Anpassungsfähigkeit an weiche oder harte Werkstoffe, geringere Lärmbelastung und größere Steuerbarkeit.

4.3 Laser-Shock-Processing

Hier werden die Randschichten auf Grund von laserstrahlinduzierten Druckstößen plastisch verformt, was die Einbringung von Druckeigenspannungen mit sich trägt.

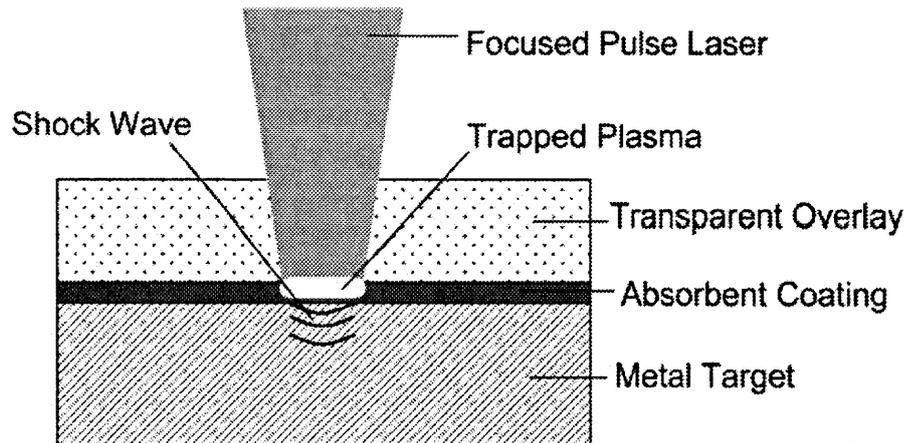


Abb. 4.2: Schematische Darstellung des Laser-Peenings [14]

4.4 Kugelstrahlen

Generell werden bei Strahlverfahren verschiedene Strahlmittel beschleunigt und auf die zu bearbeitende Oberfläche des Bauteils geschleudert. Es wird zwischen Verfestigungsstrahlen (Kugelstrahlen), Reinigungsstrahlen, Oberflächenveredelungsstrahlen, Strukturstrahlen und Umformstrahlen unterschieden. Wenn auch bei den zuletzt genannten Verfahren Verfestigung beziehungsweise Druckeigenspannungen in die Bauteile eingebracht werden, sind die Eigenschaftsänderungen des Werkstoffes beim Kugelstrahlen um einiges höher. Aus diesem Grund ist nur das Verfestigungsstrahlen für diese Arbeit wesentlich.

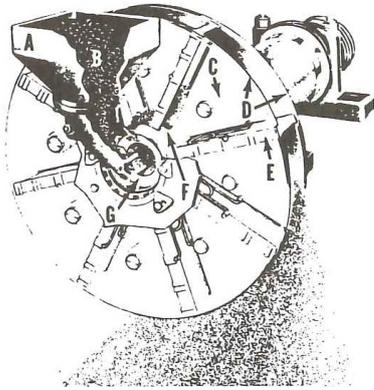


Abb. 4.3: Schleuderradstrahlanlage [17]

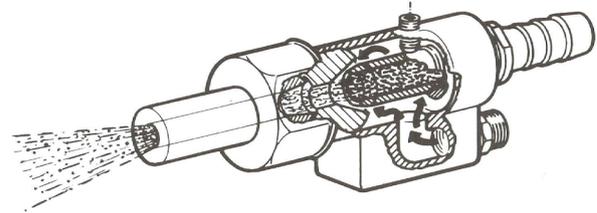


Abb. 4.4: Druckluftstrahlanlage [17]

Die Strahlbehandlungen werden durch Druck- oder Schleudernanlagen realisiert. Bei Schleuderradanlagen werden die Strahlmittelkörner durch die Zentrifugalkraft und bei Druckluftstrahlanlagen pneumatisch beschleunigt.

4.5 Hämmern bzw. Rundkneten

Das Rundkneten kann in folgende Verfahren unterteilt werden. Abb. 4.5

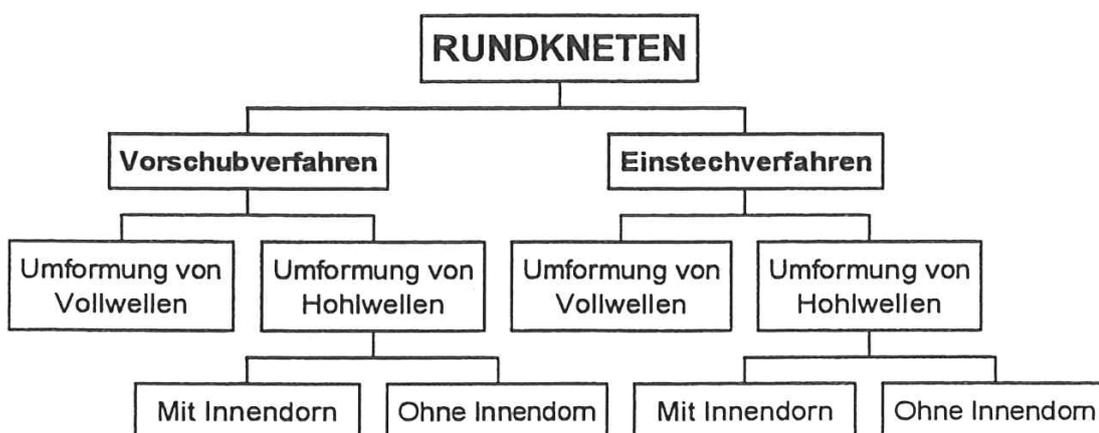


Abb. 4.5: Verfahrensvarianten des Rundkneten [12]

Rundkneten wird in der Praxis auch als Hämmern beziehungsweise Rundhämmern bezeichnet. Haupteinsatzgebiet dieses Umformverfahrens ist die Automobilindustrie. Es ist

ein spanloses Fertigungsverfahren bei dem eine Reduzierung des Querschnittes und oder eine Formgebung bei Rundstäben, Drähten und Rohren (zylindrische Flächen) stattfindet. Die Kraft für die Verformung wird hierbei von zwei bis sechs Werkzeugen über den Umfang des Werkstücks verteilt eingeleitet (siehe Abb. 4.6).

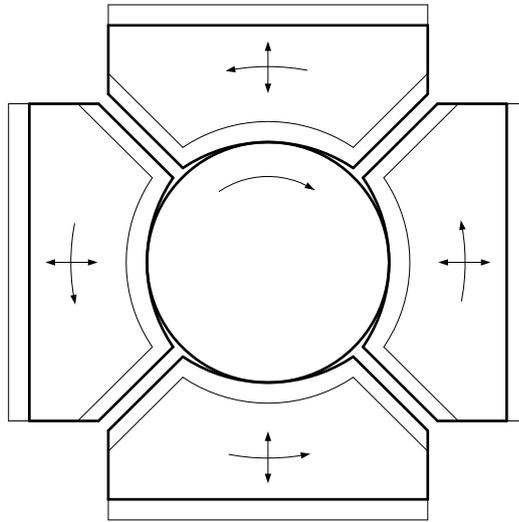


Abb. 4.6: Schematische Darstellung des Rundknetens [5]

Die Umformung des Werkstückes findet nicht in einem Werkzeughub statt. Die Knetwerkzeuge führen gleichzeitig kleine radiale Hübe aus, also ein inkrementelles Druckumformverfahren. Um rotationssymmetrische Werkstücke zu erhalten, ist eine relativ Drehbewegung der Werkzeuge zum Bauteil notwendig.

Die Umformung wird im wesentlichen durch das Zusammenwirken von Werkzeuggeometrie und Kinematik bestimmt. Die Kinematik setzt sich aus drei Einzelbewegungen zusammen:

- Hubbewegung der Knetwerkzeuge
- Vorschub des Werkzeugs in radialer Richtung (Einstechverfahren) bzw. Vorschub des Bauteils in axialer Richtung (Vorschubverfahren)
- Relativbewegung zwischen Werkzeug und Bauteil,

sondern in vielen kleinen Einzelschritten. Darum handelt es sich beim Rundkneten um ein inkrementelles Verfahren.

In Abb. 4.7 sind die wesentlichen Komponenten einer Rundknetmaschine dargestellt. Die wichtigste Baugruppe einer solchen Anlage ist der Reduzierkopf beziehungsweise die Radialumformeinheit. Hier finden die wesentlichen Verfahrensvorgänge statt.

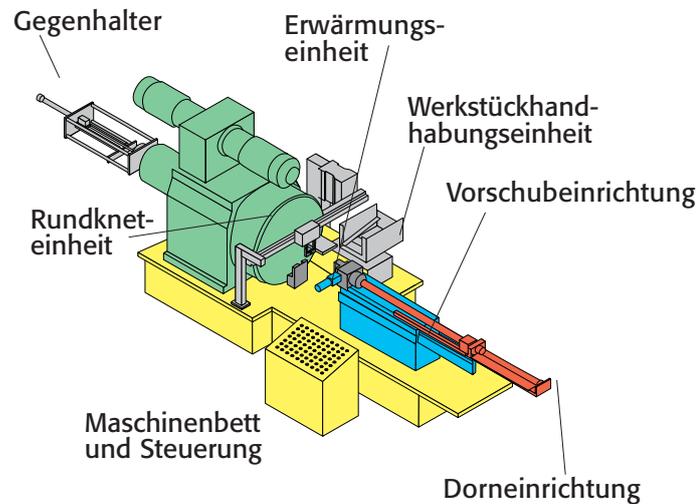


Abb. 4.7: Komponenten einer Rundknetmaschine [5] [4]

Als Antriebskonzept hat sich das Kurvengetriebe, siehe Abb. 4.8, speziell für Kaltumformung durchgesetzt, bei Warmumformung eher Kurbelgetriebe. Unterschieden wird die Radialumformeinheit mit Kurvengetriebe nach:

- der Bauart (Gegen-, Außen-, oder Innenläufer)
- der Verfahrensvariante (Vorschub- oder Einstechverfahren)
- der Anzahl der Werkzeugsegmente

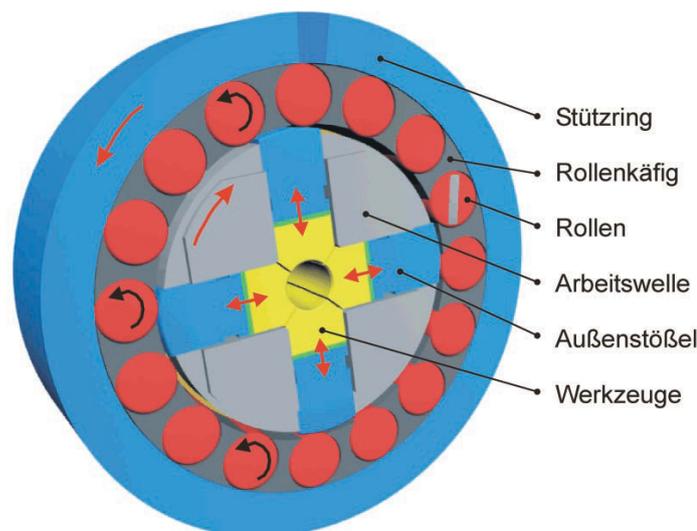


Abb. 4.8: Funktionsprinzip einer Radialumformeinheit [5]

4.5.1 Einstechrundkneten

Der oszillierenden Bewegung der Werkzeuge ist eine in radialer Richtung wirkende Zustellbewegung überlagert (Abb. 4.9). Durch diese radiale Zustellung können große örtliche Querschnittsreduzierungen und Schulterwinkel des Werkzeugs bis zu ca. 90° erreicht werden.

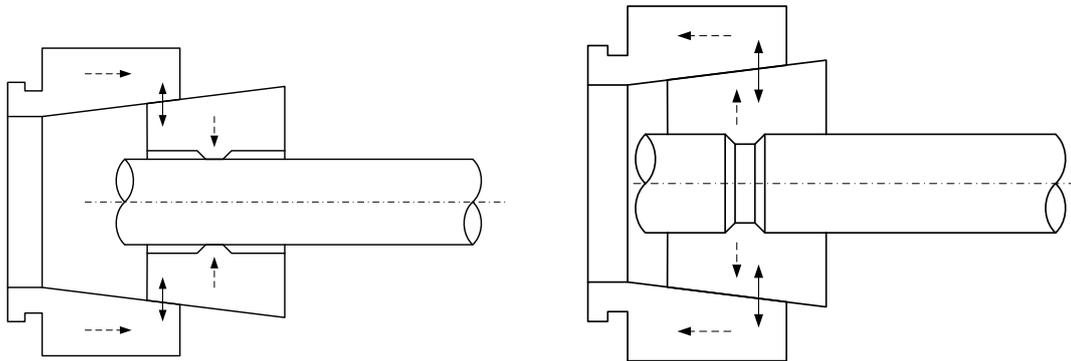


Abb. 4.9: Prinzip des Einstechverfahrens [5]

4.6 Festwalzen

Bei diesem spanlosen Oberflächenverfestigungsverfahren wird die Randschicht eines Bauteils durch mehrfaches Überrollen mit speziellen Werkzeugen bzw. Rollwerkzeugen elastisch - plastisch kaltverformt. Dabei wird, wie bei fast allen dieser Oberflächenbehandlungsverfahren, eine Verfestigung und ein induzieren von Druckeigenstressen in den oberflächennahen Randschichten erreicht, was eine beträchtliche Steigerung der Schwingfestigkeit mit sich trägt.

Hier nochmal eine genauere Gliederung der Wirkungen des Festwalzens:

- Eigenspannungen:
 - Druckeigenstressen durch elast.- plast. Verformung der Randschicht
- Randhärte:
 - Steigerung der Härte durch Kaltverfestigung

- Randgefüge:
 - Bildung von Umformmartensit

- Oberflächengüte:
 - Verbesserung durch Verminderung der Rauhigkeit
 - Verschlechterung durch Ermüdung der Oberfläche

- Dichte:
 - Die Dichte kann bei porösen Materialien erhöht werden.

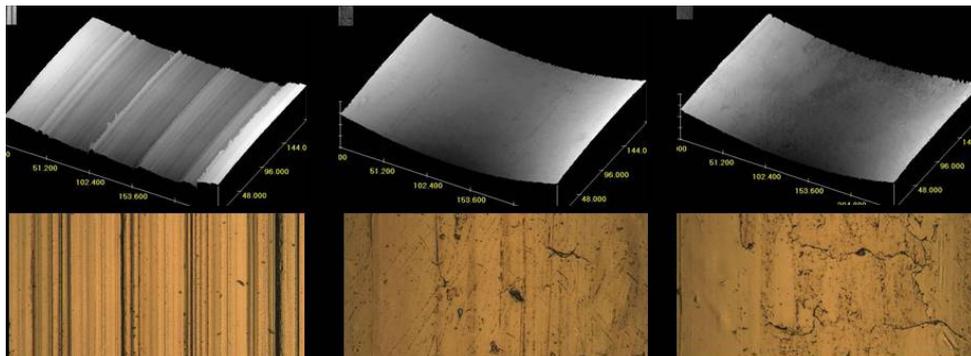


Abb. 4.10: Oberfläche von ungewalzten (a), und gewalzten Proben im Kerbgrund ($b = 2200 \text{ N}$, $c = 4100 \text{ N}$)

In Abb. 4.10 sind die Oberflächen einer ungewalzten Probe (links), einer mit der Festwalzkraft $F_W = 2200 \text{ N}$ (Mitte) und einer mit der Kraft von $F = 4100 \text{ N}$ (rechts) festgewalzten Probe, dargestellt.

Die mikroskopische Untersuchung der Oberfläche der festgewalzten Proben zeigt die Wirkung des Festwalzens auf die Rauheit. Bei den ungewalzten Proben sind die Drehriefen auf Grund der CNC-Probenfertigung klar erkennbar (Abb. 4.10 a). Durch das Festwalzen bei 2200 N erfolgt eine deutlich erkennbare Einebnung der Oberflächenrauheit (Abb. 4.10 b). Bei Steigerung der Festwalzkraft auf 4100 N zeigt sich kein maßgeblicher Unterschied hinsichtlich des Erscheinungsbildes der Oberfläche mehr. Tendenziell weisen die mit 4100 N festgewalzten Proben eine erhöhte Rauigkeit im Vergleich zu den 2200 N festgewalzten Proben was auf eine beginnende Schädigung der Oberfläche hinweist (Abb. 4.10 c).

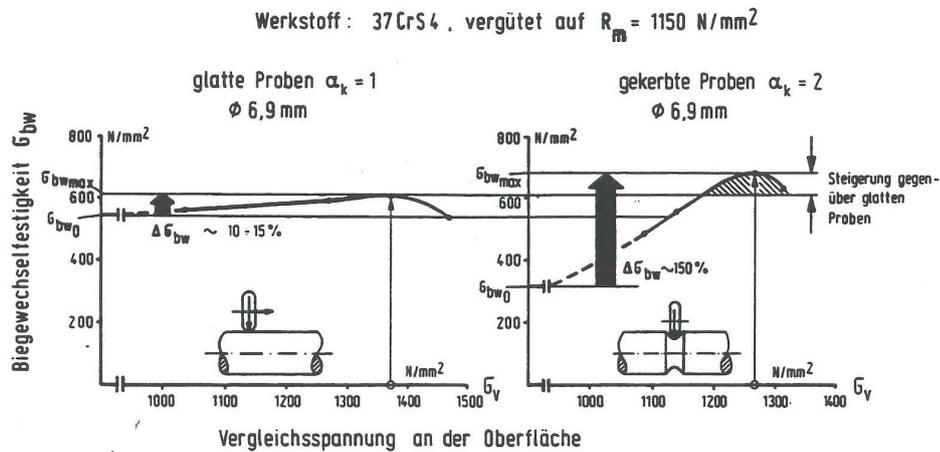


Abb. 4.11: Steigerung der Schwingfestigkeit bei gekerbten und ungekerbten Proben durch den Festwalzprozess [9]

In Abb. 4.11 ist die Auswirkung des Festwalzens auf die Biegeschwelligkeit einer ungekerbten und einer gekerbten Probe zu sehen.

Die Schwingfestigkeit von Stufenkerbenproben kann so weit erhöht werden, dass es bis zur Kompensierung der Kerbwirkung kommt.

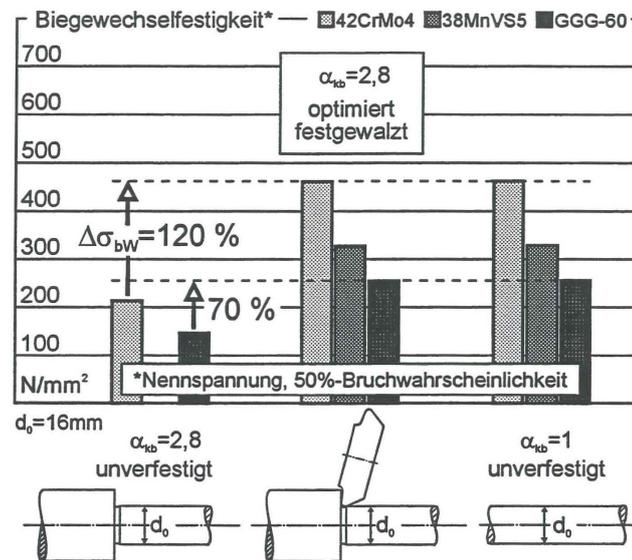


Abb. 4.12: Reduzierung der Kerbwirkung [20]

Hierbei haben die gekerbten Rundproben die gleiche Dauerfestigkeit wie die ungekerbten. Die Schwingfestigkeit gekerbter und gewalzter Rundproben aus Kugelgraphitguss ist höher

als die Schwingfestigkeit der gekerbten, nicht festgewalzten Proben aus Stahl (Abb. 4.12). Somit ist es möglich Guss an Stelle von Stahl für verschiedene Verwendungen einzusetzen [?].

Es gibt verschiedene Formen des Festwalzens, wie:

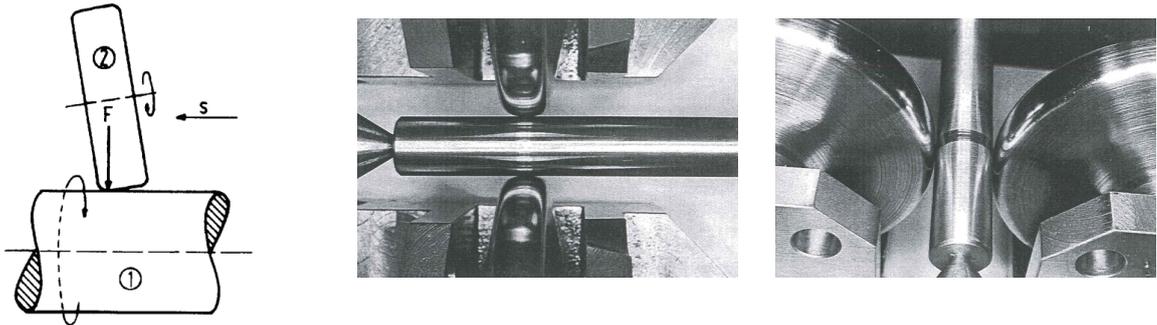


Abb. 4.13: Glattwalzen [20]

- Glattwalzen und Festwalzen im Vorschubverfahren: hier werden ohne wesentliche Formänderungen besonders glatte Oberflächen erreicht. Dadurch können die Lauf- und Gleiteigenschaften verbessert und eine Verringerung des Verschleiß bewirkt werden.

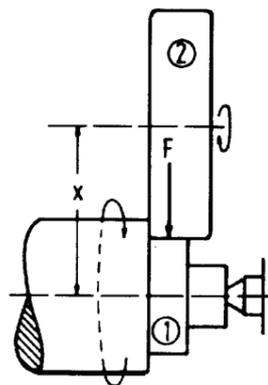


Abb. 4.14: Maßwalzen [20]

- Beim Maßwalzen werden passungsgenaue Werkstücke gefertigt

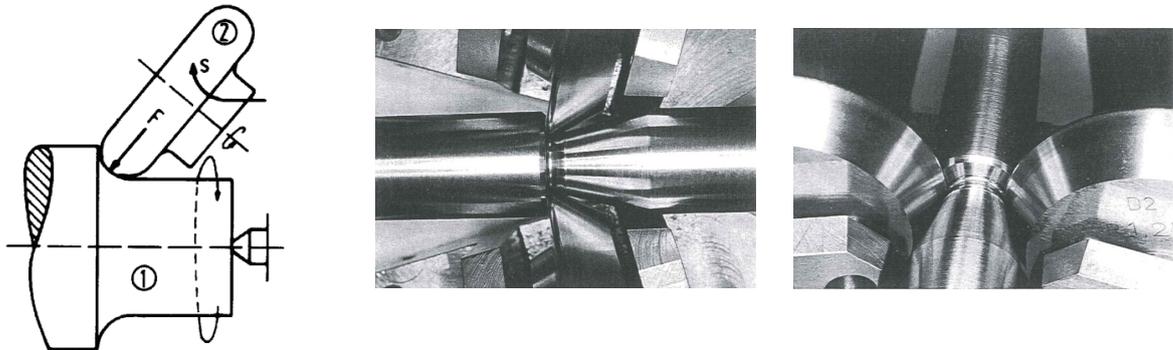


Abb. 4.15: Prinzip des Einstechverfahrens [20]

- Dieses Verfahren wird eingesetzt um Kerben, Gewinde oder Wellenabsätze zu verfestigen und Druckeigenspannungen zu induzieren. Es wird dabei eine definierte Walzkraft innerhalb einer bestimmten Anzahl von Überrollungen aufgebracht, einige Umdrehungen konstant gehalten und anschließend wieder abgebaut.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird nur das Festwalzen im Einstechverfahren näher betrachtet und schlicht als Festwalzen bezeichnet.

4.6.1 Parameter beim Festwalzen

Dieses Oberflächenverfestigungsverfahren wird durch eine Vielzahl von verschiedenen Verfahrensparametern beeinflusst.

- | | |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Bauteil <ul style="list-style-type: none"> – Bauform – Elast.-plastische Verformungsverhalten – Welligkeit, Rauigkeit – Materialeigenschaften (Festigkeit) – Bearbeitung, Wärmebehandlung | <ul style="list-style-type: none"> • Werkzeug <ul style="list-style-type: none"> – Geometrie – Elast. Verformungsverhalten – Oberflächentopographie – Prozessablauf – Rundlauf |
|---|---|

- Verfahren
 - Walzkraft, Flächenpressung
 - Vorschub
 - Anzahl der Überrollungen
 - Reibung
- Vorrichtung
 - Steifigkeit
 - Antrieb
 - Steuerung

Beim Festwalzen wird durch das Werkzeug, wie zum Bsp. eine Walzrolle oder eine Kugel, eine Kraft auf die Bauteiloberfläche übertragen. Die Festwalzkraft entspricht in etwa dem Strahldruck beim Kugelstrahlen. Durch zu groß gewählte Festwalzkraften kann eine Schädigung bzw. Zerstörung des Materials auftreten und so kommt es nicht zu einer Verbesserung sondern zu einer Verschlechterung der Materialeigenschaften und des Spannungszustandes. Die Fließgrenze kann hierfür als limitierende Werkstoffeigenschaft angesehen werden [17].

Kapitel 5

Werkstoffmodelle

Materialmodelle sind die gesetzmäßige Beschreibung des Werkstoffverhaltens, wenn eine äußere Belastung wirkt. Es werden die komplexen Abläufe im inneren des Materials durch vereinfachte Annahmen beschrieben. Daraus lässt sich ableiten, dass die Modelle auf phänomenologischen Ansätzen beruhen und sich teilweise grundlegend unterscheiden. Es muss auch festgehalten werden, dass es sich bei Materialmodellen um eine Art Annäherung an die realen Vorgänge handelt und somit immer mit einer Abweichung zur Realität gerechnet werden muss [21].

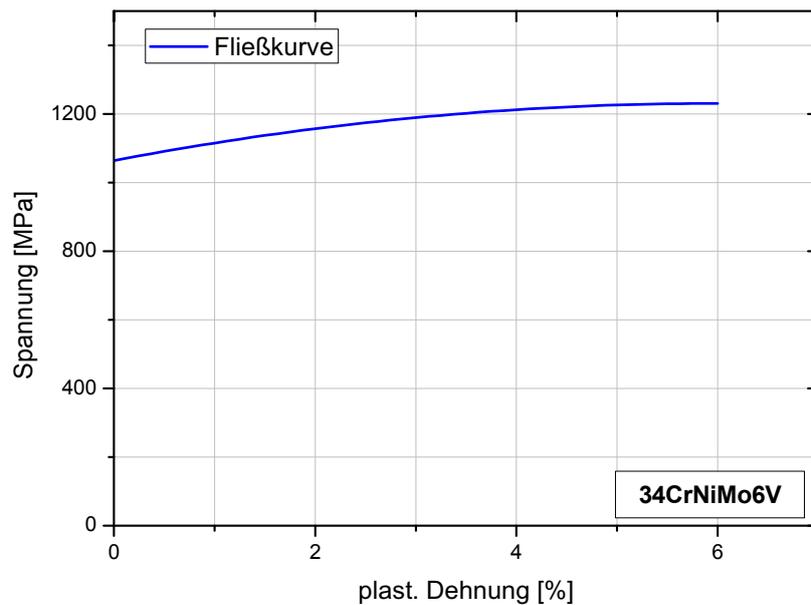


Abb. 5.1: Fließkurve des Vergütungsstahls $34CrNiMo6V$

Für die ersten Simulationen wurde die Fließkurve (Abb. 4.13) des Vergütungsstahls $34Cr-NiMo6V$ als Materialmodell verwendet.

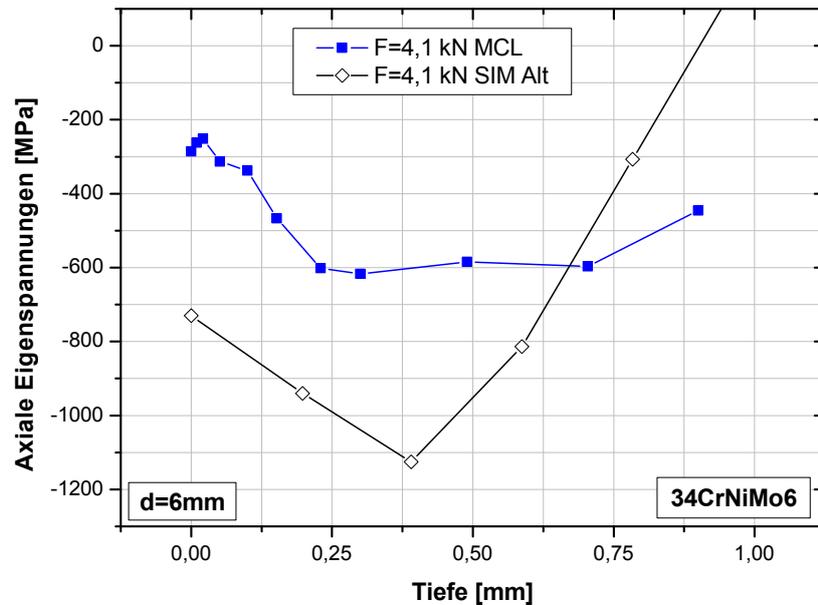


Abb. 5.2: Vergleich der Eigenspannungsmessung mit bisherigen Simulationsergebnissen

Da es sich hier eher um ein vereinfachtes Werkstoffmodell handelt und die Ergebnisse erster Festwalzsimulationen ($F=4,1kN SIM Alt$) basierend auf diesem Werkstoffmodell im Vergleich zu den experimentell ermittelten Eigenspannungsergebnissen ($F=4,1kN MCL$) noch relativ große Abweichungen besitzen (Abb. 5.2), geht man im Zuge dieser Arbeit davon aus, dass im Bereich des Werkstoffmodells, Verbesserungspotential vorhanden ist. Aus diesem Grund werden verschiedene Ansätze gesucht um ein realistisches Materialverhalten und somit bessere Eigenspannungsergebnisse zu erhalten und abbilden zu können.

5.1 Modellierung der duktilen Schädigung während des Festwalzprozesses

Aus der Erfahrung weiß man, dass bei Umformprozessen die Umformbarkeit des Werkstoffes mit zunehmendem hydrostatischem Druck steigt. Die Schädigung baut sich also abhängig von der aufgetragenen Formänderung und der hydrostatischen Spannung auf. Es liegt nahe, die inkrementelle Schädigung dD als Funktion des Vergleichsdehnungs-

inkrements $d\epsilon_{eq}$ und der (über die Vergleichsspannung σ_{eq} normierten) hydrostatischen Spannung σ_h darzustellen,

$$dD = f\left(\frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}}, d\epsilon_{eq}\right) \quad (5.1)$$

Eine solche Schädigungsfunktion wurde von *Hancock* und *Mackenzie* vorgeschlagen und später für die Anwendung in *Finite-Elemente*-Simulationen von *Fischer* [18] verallgemeinert; sie lautet:

$$D = C \int_0^{\epsilon_{eq}} \exp\left[\frac{3}{2} \frac{\sigma_h}{\sigma_{eq}}\right] d\epsilon_{eq} \quad (5.2)$$

Die Konstante $3/2$ bewirkt, dass im einachsigen Zugversuch der Exponentialterm zu 1 wird und somit die Kalibrationskonstante C als Kehrwert jener Dehnung erhalten wird, bei welcher vollständige Schädigung (Rissinitiierung, $D = 1$) eintritt. Die Kalibrierung im aktuellen Fall erfolgt entsprechend der vorwiegenden Druckbeanspruchung bei der Überrollung - durch Zylinderstauchversuche. Die Kalibrationskonstante C wird so gewählt, dass in der Simulation die Schädigung $D = 1$ bei genau jener Stauchung erreicht wird, bei welcher im Versuch die ersten Risse festgestellt werden. Die Werte sind in Tab. 1 festgehalten; auf Grund des unterschiedlichen Gefüges unterscheiden sie sich für den vergüteten und den gehärteten Wärmebehandlungszustand.

| Wärmebehandlungszustand | Probengeometrie $\varnothing D \times h$ | Probenhöhe h bei Rissinitiierung | Vergleichsformänderung ϵ_{eq} bei Rissinitiierung | Kalibrationskonstante C |
|-------------------------|--|------------------------------------|--|---------------------------|
| vergütet | $\varnothing 12 \times 18$ | $9,1 \pm 0,7$ | $0,69 \pm 0,07$ | $\approx 2,6$ |
| gehärtet | $\varnothing 12 \times 16$ | $12,7 \pm 0,2$ | $0,23 \pm 0,015$ | $\approx 7,8$ |

Abb. 5.3: Ermittlung der Kalibrationskonstante der Schädigungsfunktion

Um die Rückwirkung auf den Spannungszustand zu berücksichtigen, reicht es nicht aus, die Schädigungsfunktion nur im Nachhinein als Schädigungsindikator auszuwerten; vielmehr ist der Wert der Schädigung als Schädigungsparameter bei der Spannungsberechnung während der Simulation mit zu berücksichtigen. In den aktuellen Rechnungen geschieht dies über ein elastisches Schädigungsgesetz, in welchem der aktuelle Elastizitätsmodul E aus dem Elastizitätsmodell des ungeschädigten Werkstoffes E_0 und dem Schädigungsparameter D über

$$E = \frac{E_0}{D} \quad (5.3)$$

errechnet wird.

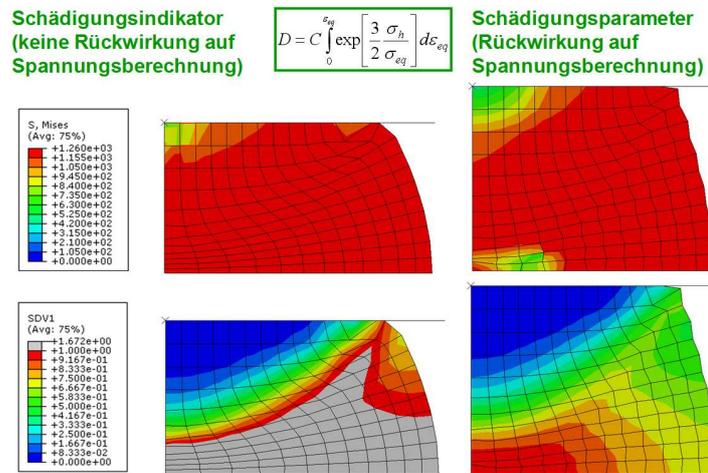


Abb. 5.4: Vergleich der Ergebnisse von Zylinderstauchversuchen [15]

In Abb. 5.4 werden die Ergebnisse von Zylinderstauchversuchen aus ungekoppelter Rechnung (Schädigungsindikator, unten links) und gekoppelter Rechnung (Schädigungsparameter, unten rechts) verglichen. Im oberen Bereich ist Vergleichsspannung nach *Mises* abgebildet [15].

Die Berücksichtigung der Schädigung zeigt keine wesentlichen Verbesserungen der Simulationsergebnisse. Aus diesem Grund wird im folgenden ein Werkstoffmodell untersucht, dass zyklisches Materialverhalten abbilden kann.

5.2 *Combined Hardening* Modell

Dieses Materialmodell ist in *Abaqus* implementiert und basiert auf den Arbeiten von *Chaboche* und *Lemaitre* [11]. Es dient zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens unter zyklischer Belastung, wie etwa das Auftreten zyklischer Ver- bzw. Entfestigung. Da die Werkstoffoberfläche bzw. die Probe mehrmals plastisch verformt wird innerhalb eines Festwalzprozesses, nimmt man an, dass die Verformungsgeschichte des Materials für die Simulation der induzierten Eigenspannungen wesentlich ist.

Die Gesetzmäßigkeit dieses Modells besteht aus zwei Komponenten:

- der kinematischen Verfestigung, welche die Verschiebung der Fließfläche im Spannungsraum beschreibt.

- und der isotropen Ver- bzw. Entfestigung, welche die Änderung der Fließfläche als Funktion der plastischen Deformation charakterisiert [2].

5.2.1 Nichtlineare kinematische Verfestigung

Die nichtlineare kinematische Verfestigung kann für die Simulation tabellarisch durch Angabe einzelner Punkte oder durch folgende drei Parameter beschrieben:

- σ_0 ist die Spannung bei der der Werkstoff zu fließen bzw. sich plastisch zu verformen beginnt. Durch diese Spannung wird die Anfangsgröße der Fließfläche beschrieben.
- Der Parameter C beschreibt die Anfangssteigung des plastischen Bereiches im Spannungs-Dehnungs-Diagramm. (Abb. 5.5)
- γ ist der Wert, der die Änderung des Parameters C mit zunehmender Dehnung charakterisiert.

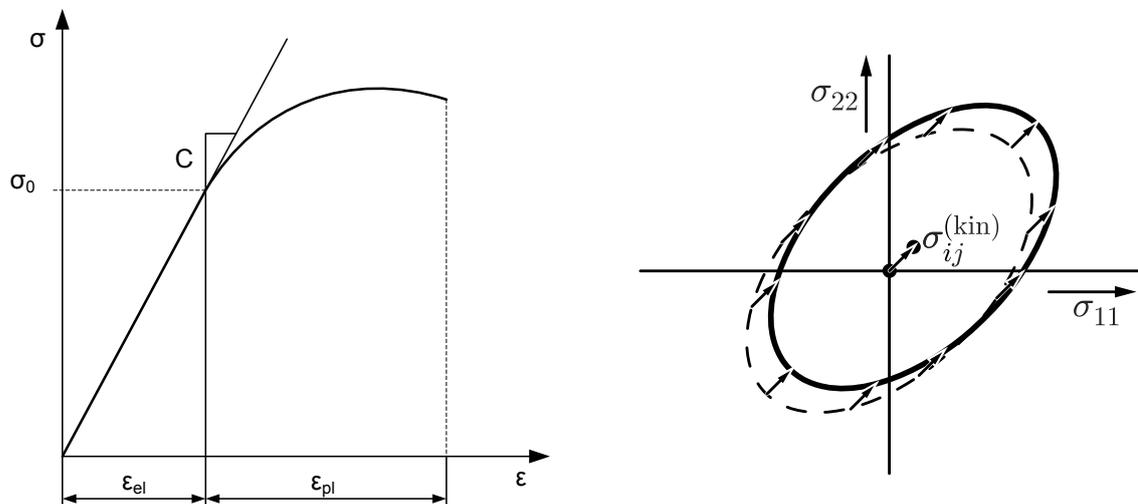


Abb. 5.5: Parameter C und Verschiebung der Fließfläche auf Grund kinemat. Verfestigung [10]

Wie aus Abb. 5.5 ersichtlich, ändert sich die Form und Größe der Fließfläche bei der kinematischen Verfestigung nicht. Jedoch findet eine Bewegung der Fließfläche im Spannungsraum statt. Durch diese Verschiebung wird der Werkstoff während der Verformung anisotrop, da sich die Größe der Fließfläche bezogen auf das Koordinatensystem ändert.

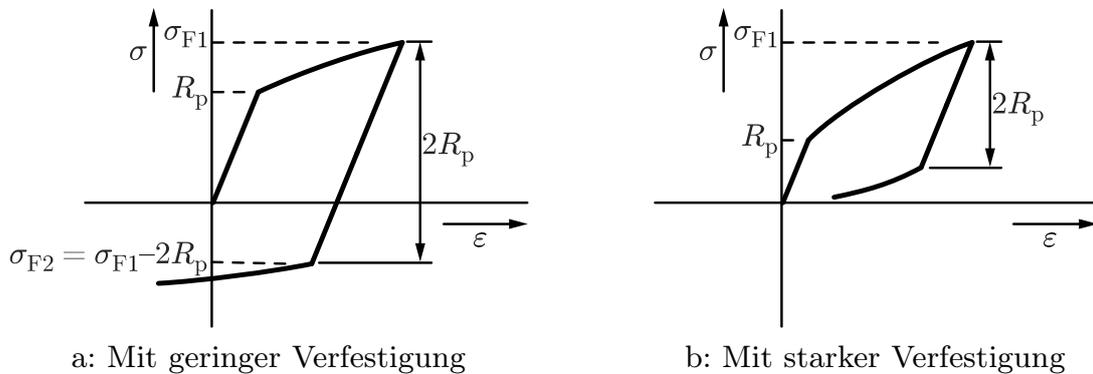


Abb. 5.6: Kinematische Verfestigung [10]

In Abb. 5.6 wird die kinematische Verfestigung anhand eines zweidimensionalen σ - ϵ -Diagramm nochmals gezeigt.

5.2.2 Isotrope Verfestigung bzw. Entfestigung

Bei der Isotropen Verfestigung bzw. Entfestigung ändert sich die Größe der Fließfläche. Je nachdem ob es sich um eine Verfestigung oder um eine Entfestigung handelt, wird die Fläche des elastischen Bereichs größer oder kleiner.

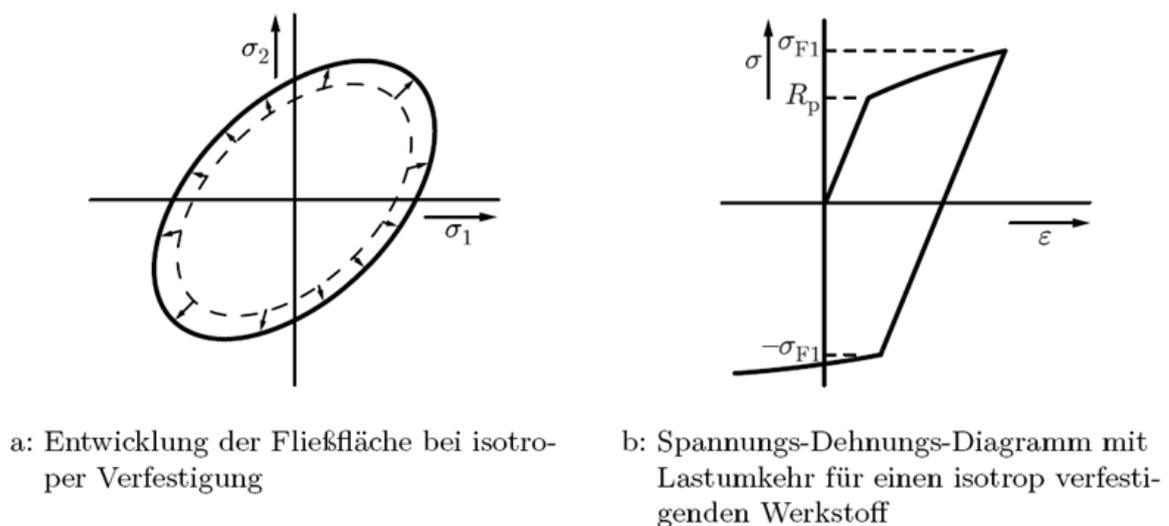


Abb. 5.7: Isotrope Verfestigung [10]

Hier in Abb. 5.7 ist eine isotrope Verfestigung dargestellt.

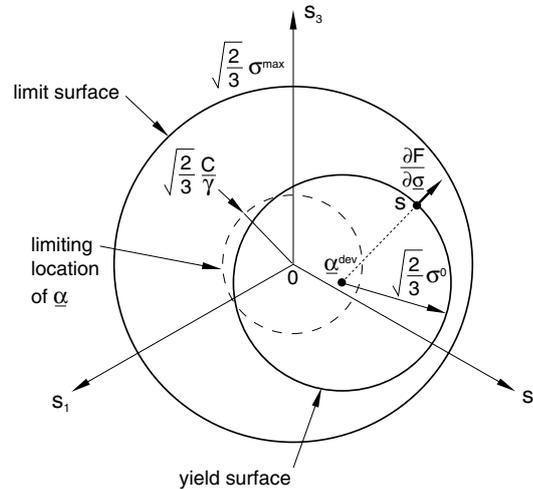


Abb. 5.8: Kinematische- und isotrope Verfestigung [2]

Diese beiden Verfestigungsarten werden kombiniert für das *Combined Hardening Modell* verwendet. Wie in (Abb. 5.8) gezeigt findet in diesem Modell eine Verschiebung und Größenänderung der Fließfläche statt.

5.2.3 Anwendungsbeispiel [2]

Das folgende Beispiel zeigt den Ablauf für die Bestimmung eines nichtlinearen isotropen/kinematischen Materialmodells basierend auf zyklischen Versuchdaten und stammt aus der Beispielsammlung des *User Manual* von *Abaqus*. Als Geometrie wird ein Rohr aus Kupfer mit Einheitsmaßen verwendet um auch für weitere Simulationen, wie die Simulation eines zyklischen Torsions-Spannungsversuchs, ein geeignetes Modell zu generieren. Die Werte für den E-Modul (E) und der Querkontraktionszahl (ν) lauten:

$$E = 140000 \frac{N}{mm^2} \text{ und } \nu = 0.3$$

Folgende Werte stammen aus dehnungskontrollierten zyklischen Versuchen mit einer Dehnungsamplitude von $\Delta\epsilon = 1.5\%$.

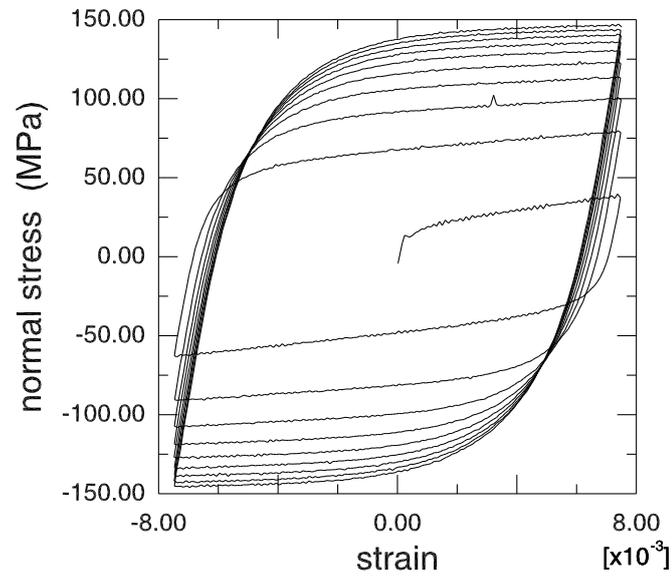


Abb. 5.9: Experimentell ermittelte Daten [2]

Bestimmung des kinematischen Anteils

Für die Kalibrierung des kinematischen Anteils wird in diesem Bsp. der sogenannte stabilisierte Zyklus verwendet. Der in diesem Fall dem letzten Zyklus der angegebenen Versuchsdaten entspricht, siehe Abb. 5.10.

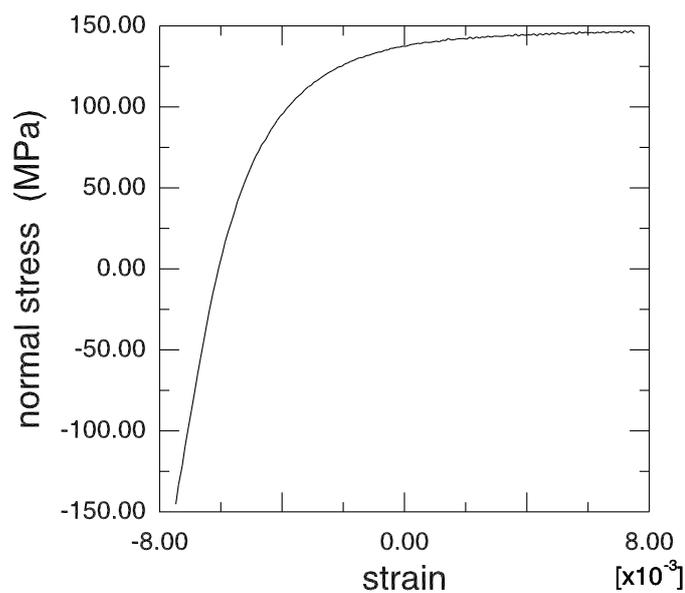


Abb. 5.10: Stabilisierter Zyklus [2]

Der Wert für den Beginn des Fließens bzw. der Fließspannung beträgt hier, $\sigma_1^0 = 46,9 \text{ MPa}$.
 Siehe Abb. 5.11.

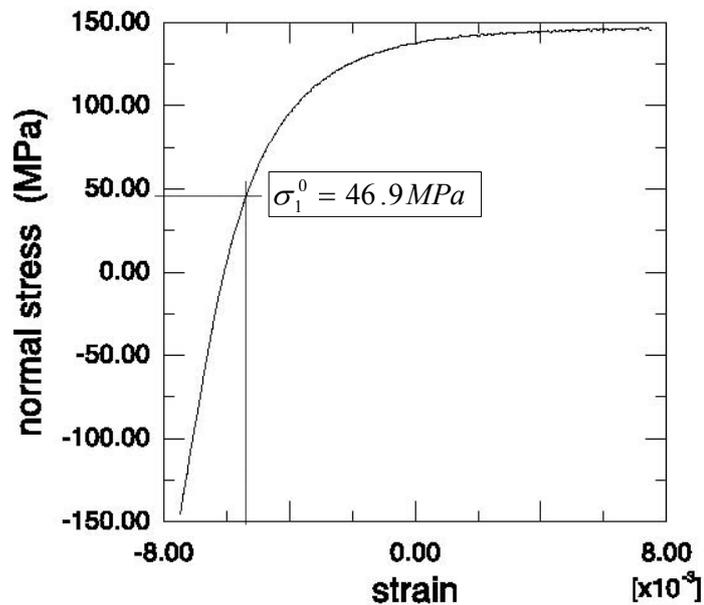


Abb. 5.11: Ende des elastischen Bereichs bzw. Fließbeginn [2]

Um die Kurve, die für Abaqus nötig ist, zu bekommen muss die plastische Dehnung berechnet werden. Um die plastische Dehnung, siehe Glg. 5.5, zu erhalten, müssen der elastische Anteil ($\frac{\sigma_i^0}{E}$) der Gesamtdehnung und die plastische Anfangsdehnung (ϵ_p^0), siehe Glg. 5.4, abgezogen werden.

$$\epsilon_p^0 = \epsilon_1 - \frac{\sigma_i^0}{E} \quad (5.4)$$

$$\epsilon_i^{pl} = \epsilon_i - \frac{\sigma_i^0}{E} - \epsilon_p^0 \quad (5.5)$$

Daraus resultiert der Kurvenverlauf für die kinematische Komponente des *Combined Hardening Modells*, siehe Abb. 5.12

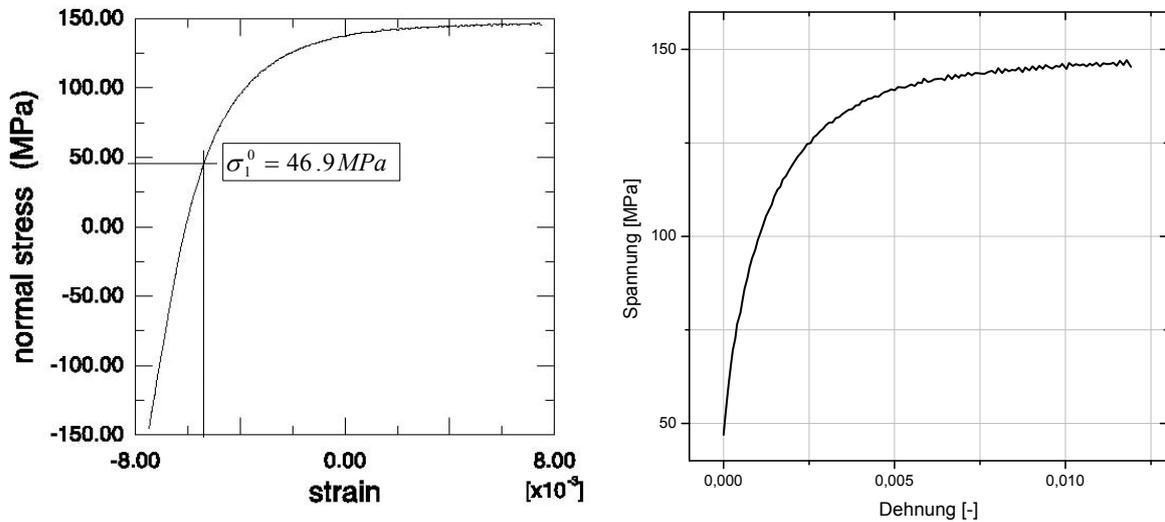


Abb. 5.12: Stabilisierter Zyklus und Kurve für *Abaqus* [2]

Durch die tabellarische Eingabe werden vom Programm *Abaqus* drei Parameter gefittet mit denen die kinematische Verfestigung beschrieben werden kann. Die Werte können dann dem *DAT-File* entnommen werden. In Abb. 5.13 sind die Parameter wie sie im *DAT-File* vorkommen, abgebildet.

| CURVE FITTING OF THE TEST DATA | | | | |
|--------------------------------|--------------|-------------|-----------------|-----------------------------|
| CURVE FIT ERROR | YIELD STRESS | PARAMETER C | PARAMETER GAMMA | TEMPERATURE FIELD VARIABLES |
| 0.43535 | 96.155 | 33543. | 701.23 | |

Abb. 5.13: Kinematische Parameter aus dem *DAT-File*

Wenn Testdaten mit vielen Lastzyklen vorliegen ist es sinnvoll die Adaptierung am letzten bzw. stabilisierten Zyklus vorzunehmen. Wird das Modell jedoch genutzt um nur wenige Zyklen zu simulieren, ist es angebracht die Kalibrierung anhand der ersten Lastzyklen durchzuführen.

Bestimmung des isotropen Anteils

Die isotrope Verfestigung beschreibt die Entwicklung des elastischen Bereiches bzw. die Größe der Fließfläche (σ_i^0) als Funktion der plastischen Vergleichsdehnung ($\bar{\epsilon}^{pl}$). Zuerst wird der plastische Anteil der Gesamtdehnung berechnet, siehe Glg. 5.6.

$$\Delta\epsilon^{pl} = \Delta\epsilon - 2 \cdot \frac{\bar{\sigma}}{E} \quad (5.6)$$

$\Delta\epsilon$ entspricht wie schon zuvor erwähnt der Gesamtdehnungsamplitude des Versuches. $\bar{\sigma}$ ist ein Durchschnittswert der Fließfläche für alle Zyklen und entspricht für dieses Bsp. dem Wert $\bar{\sigma} = 75 \text{ MPa}$. E steht für den E-Modul.

Für symmetrische dehnungskontrollierte Versuche kann folgende Vereinfachung getroffen werden (Glg. 5.7):

$$\Delta\epsilon^{pl} \approx \Delta\epsilon - 2 \cdot \frac{\sigma_1^t}{E} \quad (5.7)$$

Die plastische Vergleichsdehnung wird dann nach folgendem Zusammenhang bestimmt, siehe Glg. 5.8.

$$\bar{\epsilon}^{pl} = \frac{1}{2} \cdot (4i - 3) \cdot \Delta\epsilon^{pl} \quad (5.8)$$

Die Bezeichnung i steht für die Zyklusnummer.

Die Fließspannung für die isotrope Ver- bzw. Entfestigung wird durch Glg. 5.9 bestimmt. Wobei der kinematische Anteil von der Fließspannung isoliert wird.

$$\sigma_i^0 = \sigma_i^t - \alpha_i \quad (5.9)$$

Wenn der Wert für den *back stress* annähernd gleich bleibt kann folgende Vereinfachung getroffen werden (Glg. 5.11):

$$\alpha_i = \frac{\sigma_i^t + \sigma_i^c}{2} \quad (5.10)$$

Der *back stress* beschreibt die richtungsabhängigen Spannungsfelder aufgrund von Versetzungsaufbau an Ausscheidungen und Korngrenzen und lokale Spannungsfelder an Hindernissen [?].

$$\alpha_i \approx \frac{\sigma_1^t + \sigma_1^c}{2} \quad (5.11)$$

In Tabelle 5.1 sind die Werte die in *Abaqus* für die istrope Komponente angegeben werden ersichtlich.

| σ_i^0 | $\bar{\epsilon}^{pl}$ |
|--------------|-----------------------|
| 13. | 0.000 |
| 13. | 0.0068 |
| 29.37 | 0.034 |
| 50.13 | 0.0612 |
| 63.91 | 0.0884 |
| 73.01 | 0.1156 |
| 80.76 | 0.1428 |
| 86.25 | 0.1700 |
| 90.498 | 0.1972 |
| 93.95 | 0.2244 |
| 96.155 | 0.2516 |

Tabelle 5.1: Werte für *Cyclic Hardening*

Ergebnisse

Wie man anhand des Vergleichs der experimentell ermittelten und der durch Simulation erhaltenen Daten in Abb. 5.14 erkennen kann, halten sich die Abweichungen der Näherungen in Grenzen. Besonders gut sind die letzteren Zyklen angeglichen. Dies ist nicht weiter verwunderlich, da ja der stabilisierte Zyklus der für die Kalibrierung der kinematischen Komponente verwendet wird, der letzte Zyklus der experimentellen Daten ist.

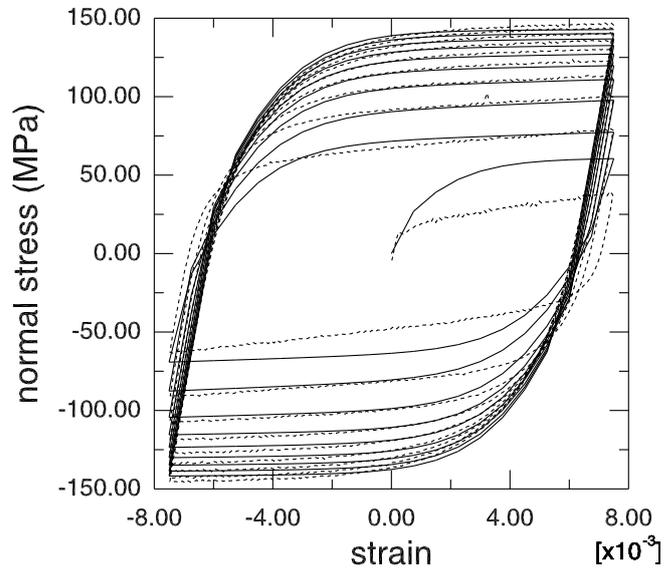


Abb. 5.14: Vergleich der simulierten und experimentell ermittelten Daten

Um sich ein besseres Bild der einzelnen Materialverhalten, welche durch dieses Werkstoffmodell möglich sind zu generieren, machen zu können, wird in Form von Spannung über Prozesszeit bzw. voranschreitender Zyklen ein verfestigendes (Abb. 5.15) und ein entfestigendes (Abb. 5.16) Verhalten gezeigt.

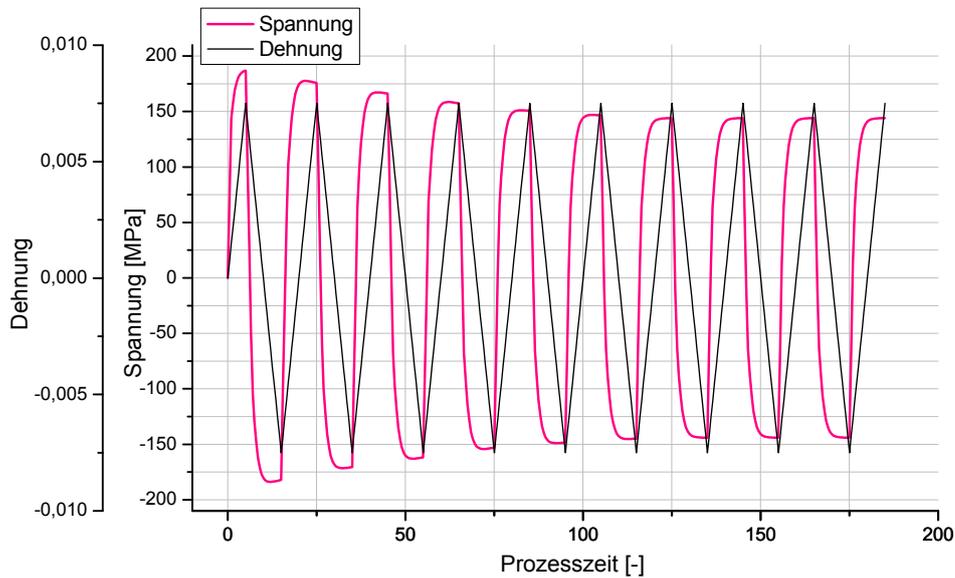


Abb. 5.15: Entfestigung über Prozesszeit

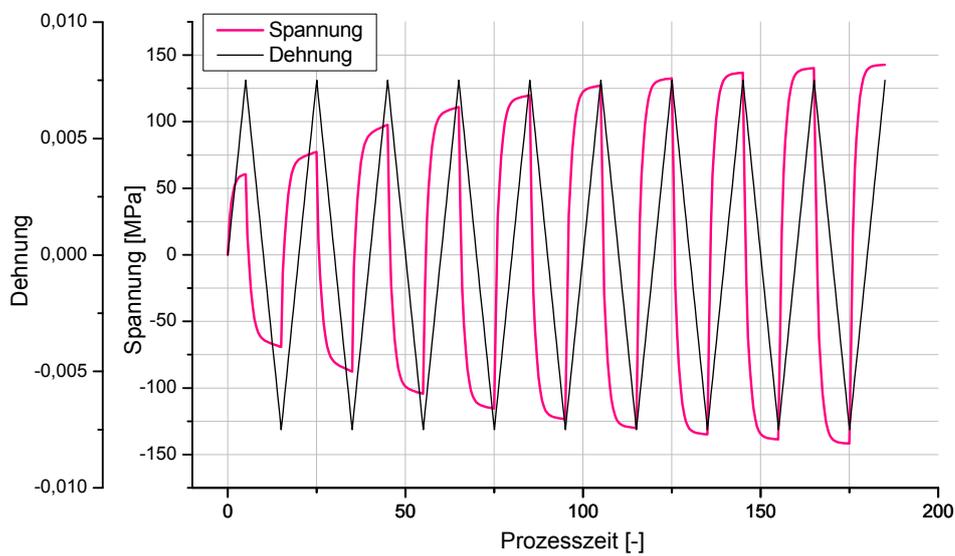


Abb. 5.16: Verfestigung über Prozesszeit

Es gibt aber auch Werkstoffe die eine Kombination aus Verfestigung und Entfestigung aufweisen, siehe Abb. 5.17.

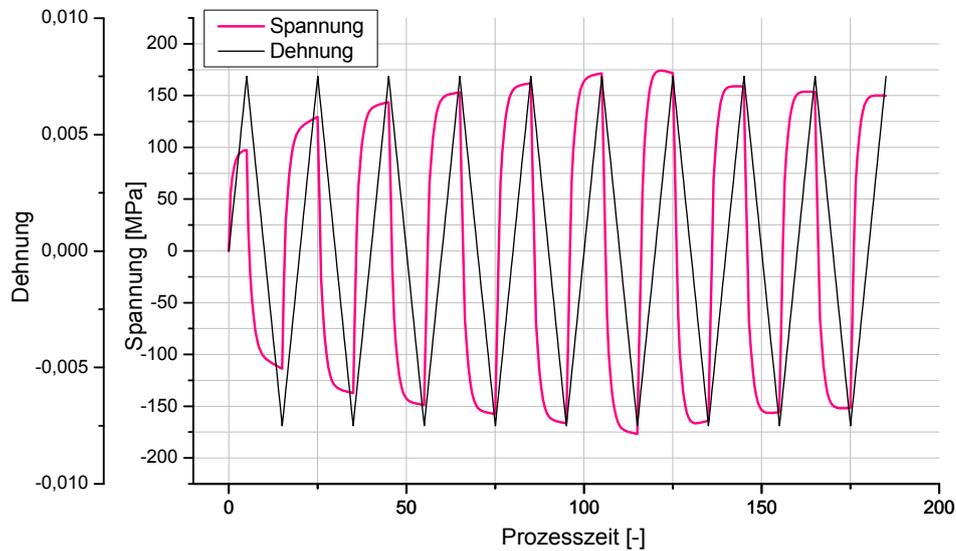


Abb. 5.17: Gemischtes Verhalten über Prozesszeit

Durch die Vielfalt der Möglichkeiten verschiedene Materialverhalten basierend auf zyklischer Beanspruchung darzustellen ist dieses Werkstoffmodell geeignet um das Verhalten unterschiedlicher Werkstoffe in die Simulation des Festwalzprozesses einzubinden. Die Implementierung in das Simulationsmodell wird im Kapitel, *Modellerstellungen für Simulationen*, näher behandelt.

Kapitel 6

Modellerstellungen für Simulationen

In diesem Kapitel werden verschiedene Simulationsmodelle für folgende Themen behandelt:

- Simulationsmodell für einen Festwalzprozess
- Simulationsmodell für die Nachbildung von Hystereseschleifen aus dem LCF-Versuch
- Simulationsmodell für den elektrochemischen Abtrag bei einer röntgenographischen Eigenspannungsanalyse

Alle Simulationen werden mit dem FEM- Programm (*Finite-Elemente-Methode*-Programm) *Abaqus* der Version 6.9 durchgeführt.

Da bei der Messung von Eigenspannungen durch das röntgenographische Verfahren ein Materialabtrag an der jeweiligen Messstelle stattfindet, wird durch ausblenden einzelner Elemente im *FE*-Modell dieser mechanische Eingriff simuliert. Somit ist es möglich die dabei auftretenden Spannungsumlagerungen zu betrachten.

6.1 Simulation des Festwalzprozesses

Im Folgenden wird der Aufbau eines *FE*-Modells für den Walzprozess beschrieben. Anschließend werden die Simulationsergebnisse den Ergebnissen der röntgenographischen Eigenspannungsmessung im Kapitel, *Ergebnisse und Diskussion*, gegenübergestellt und diskutiert.

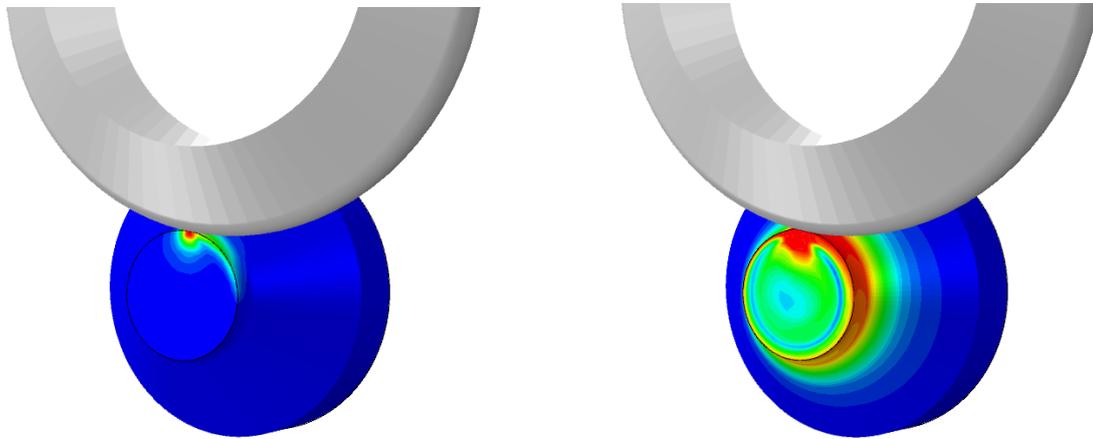


Abb. 6.1: Festwalzprozess in unterschiedlichen Prozessabschnitten

In Abbildung 6.1 ist das Simulationsmodell bei der ersten Überrollung und am Ende des Walzprozesses zu sehen. Wie man erkennen kann ist das Modell für die Simulation optimiert bzw. die Geometrie reduziert, natürlich wird auf diesen Sachverhalt im weiteren Verlauf dieses Kapitels eingegangen.

6.1.1 Probengeometrie

Die Geometrie für die Probe wurde nach Abb. 6.2 erstellt.

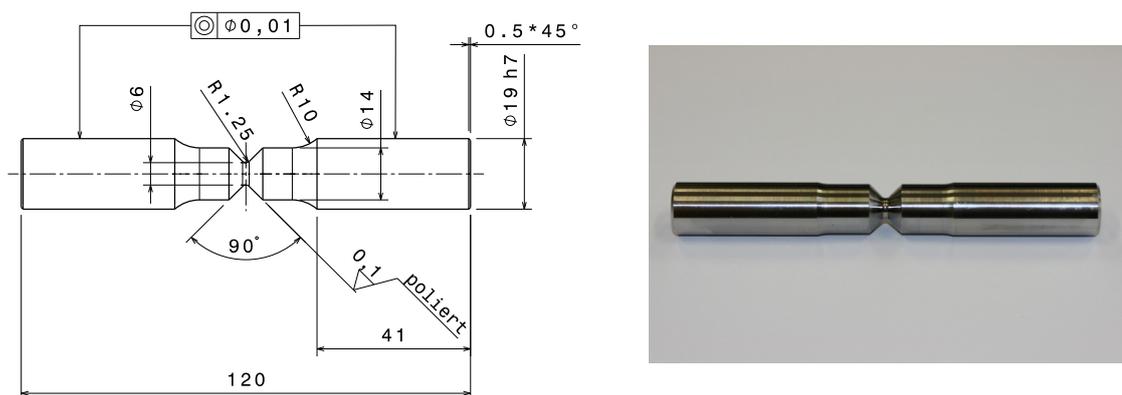


Abb. 6.2: Probengeometrie

Um die Größe der Rechenzeit und des Datenvolumens zu senken, wurde das Modell auf den für die Simulation wesentlichen Teil reduziert (Abb. 6.3), da man davon ausgeht, dass der restliche Teil keinen Einfluss auf die Eigenspannungssimulationen hat. Damit erreicht

man ein effizientes *FE*- Modell, um die Simulationen in einem überschaubaren Zeitraum durchführen zu können. Des weiteren wird sich bei der Vernetzung, im besonderen bei der Wahl der Elemente, die Reduktion als Vorteilhaft erweisen.

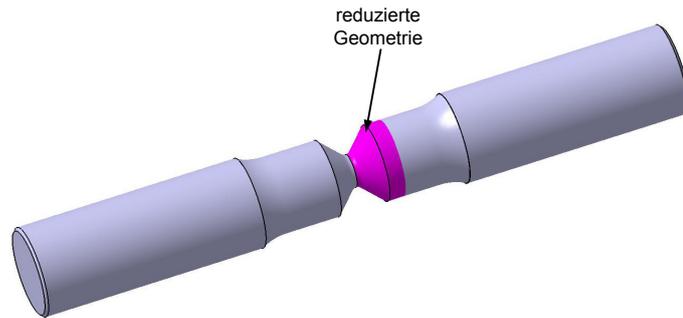


Abb. 6.3: Reduzierte Probengeometrie

6.2 Vernetzung

Um geeignete Elemente zu erhalten, wurde die Probe für die Simulation entsprechend partitioniert. Durch diese Vorgehensweise, wie in Abb. 6.4 ersichtlich (grüner Bereich), ist es möglich, die Bereiche, die von größerer Bedeutung sind, mit *Hex*-Elementen zu vernetzen.

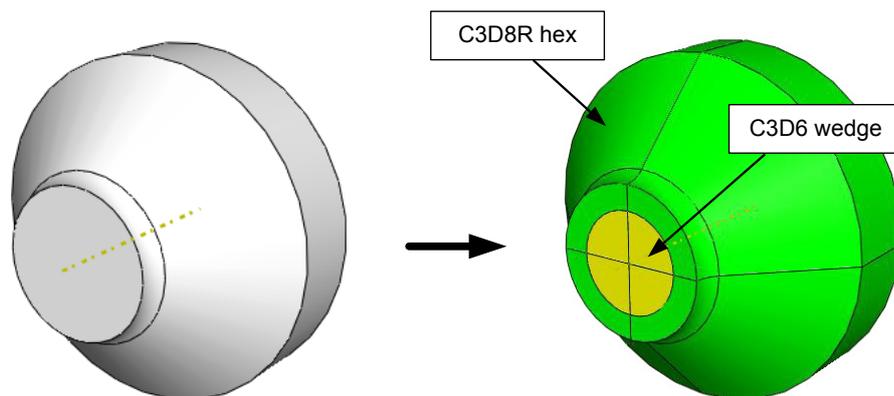


Abb. 6.4: Partitionierung der Geometrie

Man beschränkt sich bei der Wahl der Elemente auf lineare, da dies für eine qualitative

Simulation der Eigenspannungen ausreichend ist und enorm an Rechenzeit spart. Des Weiteren wird die reduzierte Integration beim Großteil der Elemente verwendet. Wie in Abb. 6.5 dargestellt wird die Integration nicht in allen vier Integrationspunkten durchgeführt, sondern nur in einem. Diese Vorgehensweise führt zu einem etwas weicheren Verhalten der FE-Struktur. Dies hat aber keine großen Auswirkungen, da sich die FE-Struktur normalerweise steifer verhält als das reale Bauteil. [Abaqus]

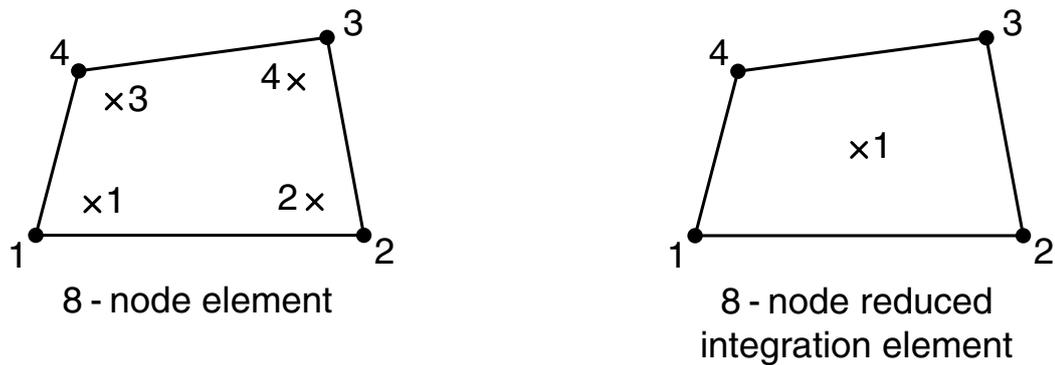


Abb. 6.5: Integrationspunkte bei voller und reduzierter Integration

6.2.1 Komponenten

Das Modell für die Festwalzsimulation besteht grundsätzlich aus zwei Teilen: aus der Walze und dem vorher gezeigten Probenausschnitt. Die Probe ist ein *deformable solid* (deformierbarer Vollkörper). Um die einzelnen Randbedingung aufbringen zu können, wird der Probenkörper mit einer *analytical rigid surface* (nicht verformbar), siehe Abb. 6.6, durch einen festen *Tie*-Kontakt verbunden.

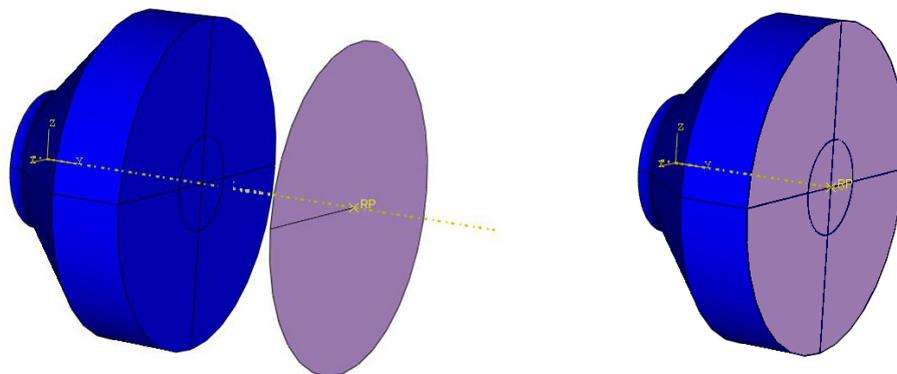


Abb. 6.6: Probe verbunden mit *analytical rigid* durch *Tie*-Kontakt

Die Walze wird als starr angenommen und somit mittels einer *analytical rigid surface* realisiert (Abb. 6.7).



Abb. 6.7: Bild der Walze und als *analytical rigid surface*

6.2.2 Randbedingungen und Kräfte

Die jeweiligen Randbedingungen bzw. Kräfte werden über Referenzpunkte, die starr mit den einzelnen Flächen verbunden sind, aufgegeben. Der Referenzpunkt der Walze (Abb. 6.8) wird im ersten *Step (Initial)* in allen sechs Freiheitsgraden gesperrt.

Hauptrichtungen (U1, U2, U3)

Verdrehungen (UR1, UR2, UR3)

- $U1 = U2 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$

Bei der Probe werden folgende Verschiebungen bzw. Drehungen gesperrt:

- $U1 = U3 = UR1 = UR2 = UR3 = 0$

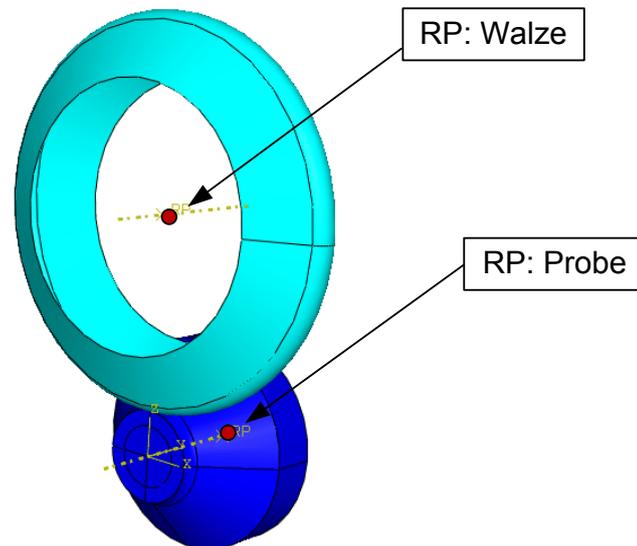


Abb. 6.8: Referenzpunkte der einzelnen Komponenten

Da es sich um ein Halbmodell handelt, muss zusätzlich eine Symmetriebedingung definiert werden. Dies bedeutet, wie in Abb. 6.9 zu sehen ist, dass die Verschiebung in U2 bzw. die Verdrehung um UR1 und UR3 gesperrt sind.

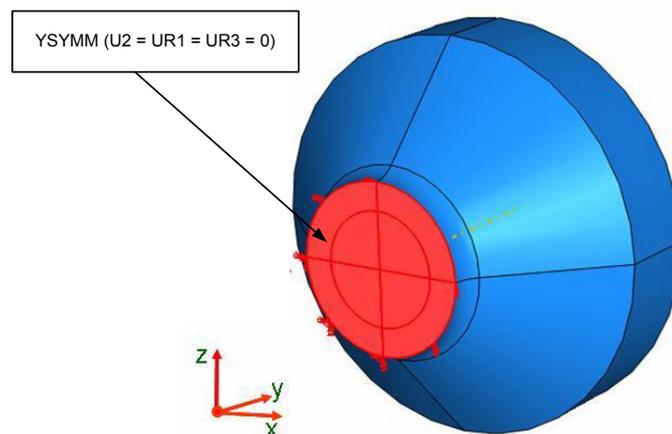


Abb. 6.9: Kennzeichnung der Symmetriebedingung der Probe

Die beiden Teile, Werkstück und Walze, werden schließlich über eine Kontaktbedingung in Verbindung gebracht.

Die Simulation besteht insgesamt aus zwei Schritten (*Steps*):

Der Erste *Step (Initial)*, wie zuvor erwähnt, wird vom Programm Abaqus vorgegeben. Hier werden alle Anfangsbedingungen definiert.

Im Zweiten, *Step (Walzen)* werden Modifikationen vorgenommen, um den Walzprozess bzw. die Kraftaufbringung zu simulieren. Er ist in drei Teilabschnitte gegliedert. Während des ersten Drittels wird die Kraft aufgebracht, siehe Abb. 6.10. Anschließend wird im zweiten Drittel der Prozesszeit mit der maximalen Kraft nachgerollt und schlussendlich wieder auf null gesetzt.

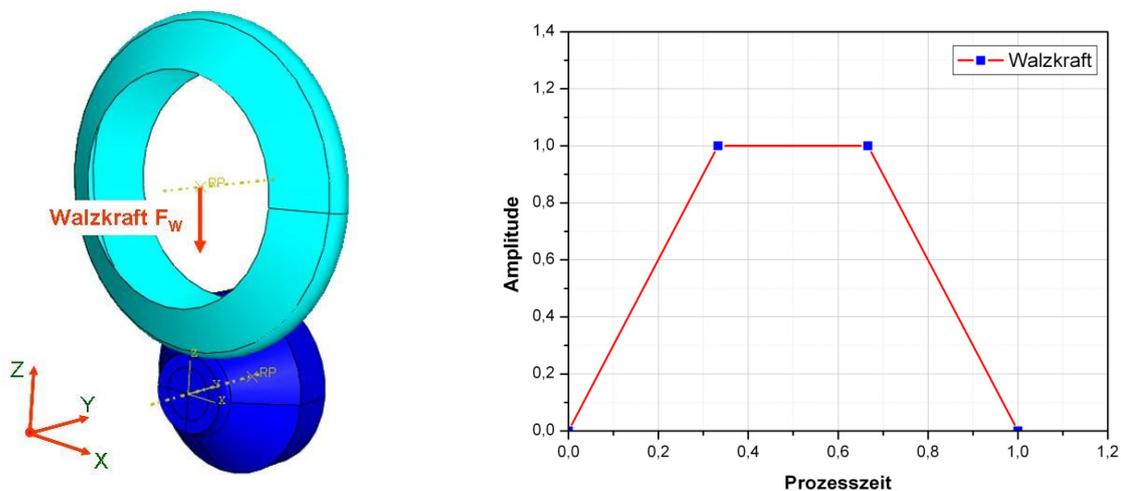


Abb. 6.10: Verlauf der Festwalzkraft

6.3 Simulation der Hysterese

Um mit dem Werkstoffmodell *Combined Hardening* besser und schneller arbeiten zu können wird in dieser Arbeit ein *Single Element* Modell erstellt. Ziel dieses einfachen Modells ist es die im LCF-Versuch experimentell ermittelten Daten nachbilden zu können und somit sinnvolle Parameter für das Werkstoffmodell, für die Simulation des Festwalzprozesses, zu generieren.

Im folgenden wird der Syntax für das *Single Element* Modell näher erläutert. Ebenfalls werden die verschiedenen Eingabevarianten für das Werkstoffmodell, *Combined Hardening*, beschrieben. Kurz sei noch erwähnt, da auf dieses Materialmodell im Kapitel, *Werkstoffmodelle*, näher eingegangen wird, dass es sich grundsätzlich aus zwei Teilen zusammensetzt, die auch im Code ersichtlich sind:

- *plastic, hard*: steht für die kinematische Verfestigung
- *cyclic hardening*: für die isotrope Ver-oder Entfestigung

```

*heading
Test
*preprint, model=YES
*node
1, 0., 0., 0.
2, 1., 0., 0.
3, 1., 1., 0.
4, 0., 1., 0.
5, 0., 0., 1.
6, 1., 0., 1.
7, 1., 1., 1.
8, 0., 1., 1.
*element, type=C3D8R, elset=all
1, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8
*solid section, elset=all, material=steel
1.
  
```

Definition der Knoten

Definition des Elementes

Materialzuweisung an das Element

Abb. 6.11: Definition der Knoten und Elemente im *Inputfile*

Im ersten Teil des *Input-Files*, siehe Abb. 6.11 wird der Name der Simulation festgelegt. Der Befehl **preprint, model=YES* ermöglicht die Ausgabe der Werkstoffparameter für das *Combined Hardening* Modell im *DAT-File*. Weiters werden die Knoten und anschließend das Element definiert. Danach wird dem Element das Material zugewiesen.

```

*material, name=steel
*elastic
195000., 0.3
*PLASTIC,HARDENING=COMBINED,DATA TYPE=STABILIZED, N
202. , 0.
:
:
987. , 0.0141
*CYCLIC HARDENING
545. , 0.
:
:
367. , 0.05
  
```

Abb. 6.12: Dateneingabe bezüglich des stabilisierten Zyklus

In Abb. 6.12 wird dem Material ein Name zugewiesen. Anschließend werden die Werte für den elastischen Teil in Form des E-Moduls und der Querkontaktionszahl angegeben.

Der kinematische Verfestigungsanteil wird in diesem Fall über den stabilisierten Zyklus angegeben. Der isotrope Verfestigungsanteil wird im Bereich **CYCLIC HARDENING* definiert.

Grundsätzlich stehen für die Eingabe des kinematischen Anteils noch zwei weitere Eingabemöglichkeiten zur Verfügung:

```
|| *PLASTIC,HARDENING=COMBINED,DATA TYPE=HALF CYCLE, N ||
```

Abb. 6.13: Dateneingabe bezüglich des halben Zykluses

Zum einen über den halben Zyklus. Wird genutzt wenn nur begrenzt Versuchsdaten vorhanden sind. (Abb. 6.13)

```
|| *PLASTIC,HARDENING=COMBINED,DATA TYPE=PARAMETERS, N ||  
|| 594.88, 83040., 184.89 ||
```

Abb. 6.14: Dateneingabe über die Parameter σ_0 , C , γ

Zum anderen über die Parametereingabe, siehe Abb. 6.14. Wobei der erste Wert, σ_0 , den Beginn des Fließens beschreibt. C und γ den weiteren Verlauf des plastischen Verhaltens.

```
|| *AMPLITUDE,NAME=CYCLE ||  
|| 0,0,10,-1,20,0,30,-1, ||  
|| 40,0,50,-1,60,0,70,-1, ||  
|| 80,0,90,-1, ||  
|| *boundary ||  
|| 1, 1, 3 ||  
|| 2, 2, 3 ||  
|| 3, 3, 3 ||  
|| 4, 1, 1 ||  
|| 4, 3, 3 ||  
|| 5, 1, 2 ||  
|| 6, 2, 2 ||  
|| 8, 1, 1 ||
```

Abb. 6.15: Definition der Amplitude und der Randbedingungen

In Abb. 6.15 werden die Amplitude und die Randbedingungen definiert. Hier wird festgelegt ob eine wechselnde oder schwellende Belastung simuliert wird. In diesem Fall handelt es sich um eine druckschwellende Belastung. Weiters werden die Randbedingungen für die einzelnen Punkte definiert.

```

*STEP,INC=1000, name=10x0.1, nlgeom=yes
*STATIC,DIRECT
0.1,90.
*boundary, amplitude=cycle
5, 3, 3, .03
6, 3, 3, .03
7, 3, 3, .03
8, 3, 3, .03
*OUTPUT,FIELD,FREQ=10
*ELEMENT OUTPUT
S,E,PE,ALPHA
*NODE OUTPUT
U,RF
*OUTPUT,HISTORY,FREQ=1
*ELEMENT OUTPUT,ELSET=ALL
S,E,PE,ALPHA
*end step
  
```

Abb. 6.16: Definition des *Steps* und Angabe der Beanspruchung

Im letzten Teil des *Input*-Files werden der *Step* und die Dehnungen angegeben.

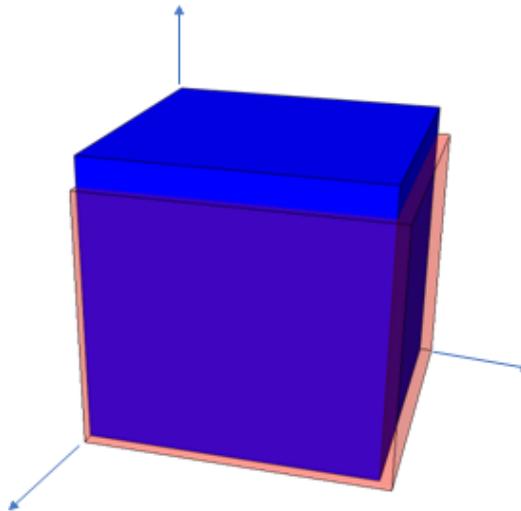


Abb. 6.17: Einheitswürfel für Hysteresensimulation

In Abb. 6.17 ist die dreidimensionale Darstellung des *Single Element* Modells zu sehen. Die blaue Darstellung zeigt den Einheitswürfel wenn keine Belastung vorhanden ist. Die Rote Schattierung zeigt den Würfel unter Druckbeanspruchung.

6.4 Simulation des elektrochemischen Abtrags

Um die Vorgänge bei der röntgenographischen Eigenspannungsmessung näher zu betrachten, werden in dieser Arbeit der Materialabtrag und die damit verbundenen Spannungsumlagerungen mit Hilfe von *Abaqus* simuliert. Der Materialabtrag ist nötig um einen Tiefenverlauf (in radialer Richtung) der induzierten Eigenspannungen zu erhalten.

Der schrittweise erfolgende Werkstoffabtrag wird durch seriell ausblenden der Elemente erreicht. Dafür wird im *Input-File* folgender Text hinzugefügt:

```
*MODEL CHANGE, TYPE=ELEMENT, REMOVE
```

Abb. 6.18: Code für Ausblendung von Elementen

Dieser Befehl ist jeweils in die für die Ausblendungen geschriebenen *Steps* eingefügt. In Abb. 6.19 ist der simulierte Materialabtrag dargestellt.

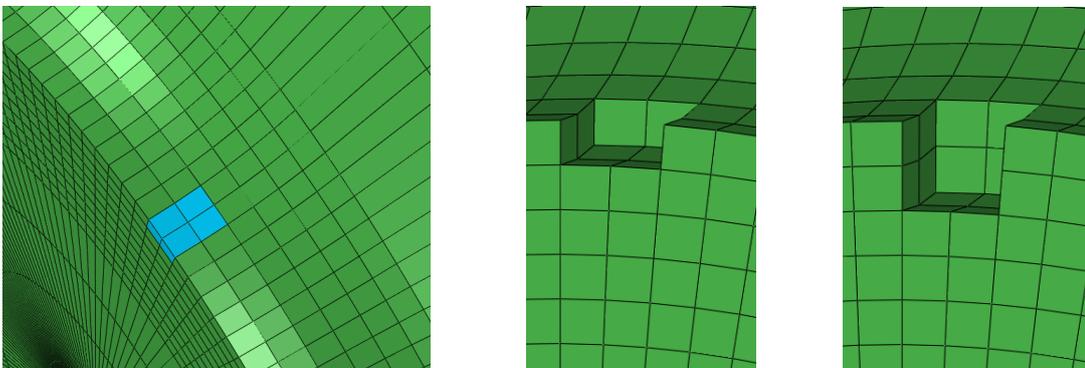


Abb. 6.19: Ausblenden der Elemente

Die Resultate der Simulation werden im Kapitel, *Ergebnisse und Diskussion*, behandelt, wobei die damit in Verbindung stehende Theorie nach *Moore and Evans* ebenfalls näher betrachtet wird.

Kapitel 7

Experimentelles

Alle experimentellen Untersuchungen für den Erhalt von Materialdaten werden an dem Vergütungsstahl $34CrNiMo6V$ durchgeführt. Des weiteren werden Versuche mit dem Eisengusswerkstoff $ADI1000$ vorgenommen. Es werden folgende Experimente beziehungsweise Versuche getätigt:

- Zugversuche
- *LCF*- Versuche
- Eigenspannungsmessungen

Die Probenfertigung, nach den entsprechenden Normen, findet am AMB (Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau) statt. Die Prüfbereiche der verschiedenen Proben werden poliert und genau vermessen. Die experimentellen Untersuchungen bezüglich der Eigenspannungsmessungen werden bei zwei verschiedenen Instituten, dem MCL (*Materials Center Leoben Forschung GmbH*) und der Universität Braunschweig, vorgenommen.

7.1 Zugversuche

Die Zugversuche werden auf einer servohydraulischen Prüfmaschine *INSTRON 8802 (100kN)* durchgeführt. Die Versuche werden bei Raumtemperatur durchgeführt und die Dehnungen werden mit einem INSTRON-Extensometer (Typ 2828) gemessen. [8]

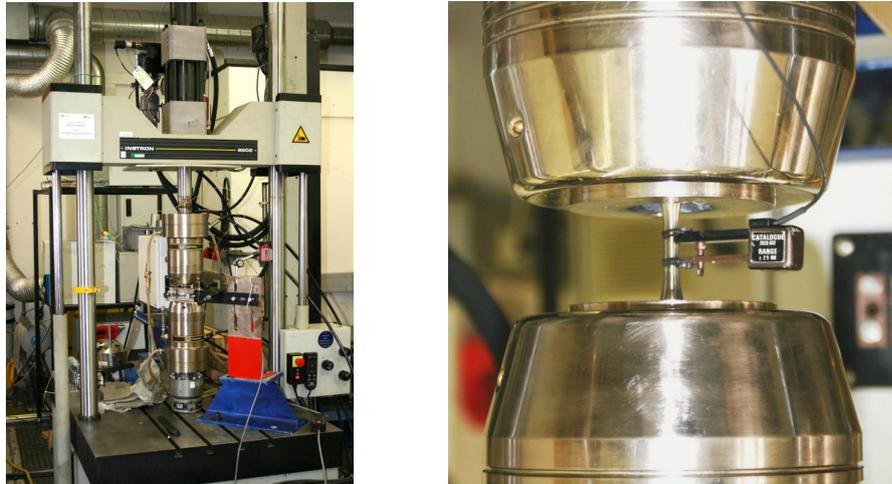


Abb. 7.1: Prüfmaschine für *LCF*- und Zugversuche

In Abb. 7.2 sind die Zugversuchsergebnisse für den Vergütungsstahl $34CrNiMo6V$ und dem Eisengusswerkstoff *ADI1000* zu sehen.

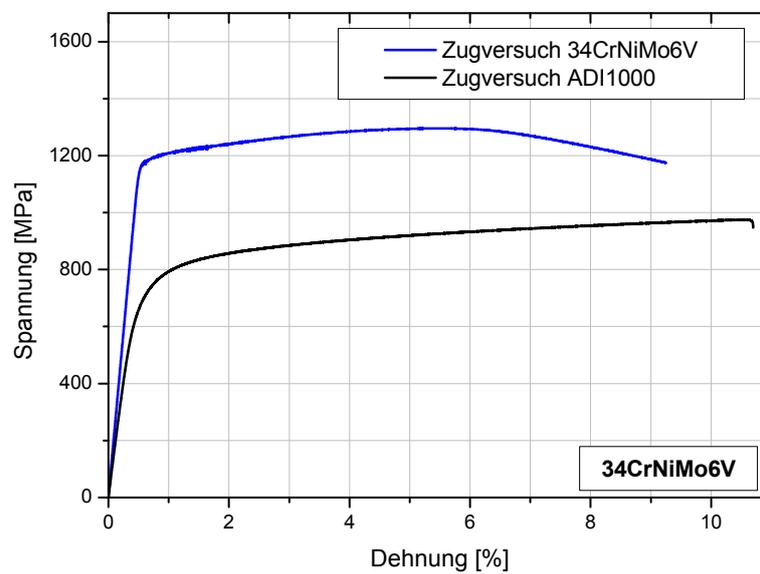


Abb. 7.2: Zugversuche der Werkstoffe $34CrNiMo6V$ und *ADI1000*

7.2 LCF-Versuche

Die *LCF* (*Low Cycle Fatigue*)-Versuche werden ebenfalls mit der oben genannten Prüfmaschine durchgeführt. Es handelt sich um dehnungsgeregelte Prüfungen mit verschiedenen Dehnungsamplituden und Dehnungsverhältnissen (R_ϵ), die in Tab. 7.2 angeführt sind.

| Versuchsnr. | Dehnungsampl. [%] | Dehnungsverh. R_ϵ | Prozessgeschw. [%/min] |
|-------------|-------------------|----------------------------|------------------------|
| LCF_02 | 0.75 | -1 | 60 |
| LCF_03 | 1 | -1 | 60 |
| LCF_05 | 0.75 | $-\infty$ | 60 |
| LCF_06 | 1 | $-\infty$ | 60 |
| LCF_07 | 1 | $-\infty$ | 6 |

Tabelle 7.1: Auflistung der *LCF*-Versuche für den Werkstoff $34CrNiMo6V$

| Versuchsnr. | Dehnungsampl. [%] | Dehnungsverh. R_ϵ | Prozessgeschw. [%/min] |
|-------------|-------------------|----------------------------|------------------------|
| C4_L1_31 | 0.5 | -1 | 60 |
| C4_L1_32 | 0.75 | -1 | 60 |
| C4_L1_33 | 0.25 | -1 | 60 |
| C4_L1_34 | 0.375 | -1 | 60 |
| C4_L1_35 | 0.5 | $-\infty$ | 60 |
| C4_L1_36 | 1 | $-\infty$ | 60 |
| C4_L1_37 | 0.75 | $-\infty$ | 60 |
| C4_L1_38 | 0.375 | $-\infty$ | 60 |

Tabelle 7.2: Auflistung der *LCF*-Versuche für den Werkstoff *ADI1000*

In dieser Arbeit werden nur die druckschwellenden Versuche mit der größten Dehnungsamplitude abgebildet (7.3 und 7.4), da diese für das weitere Vorgehen als wesentlich erachtet werden.

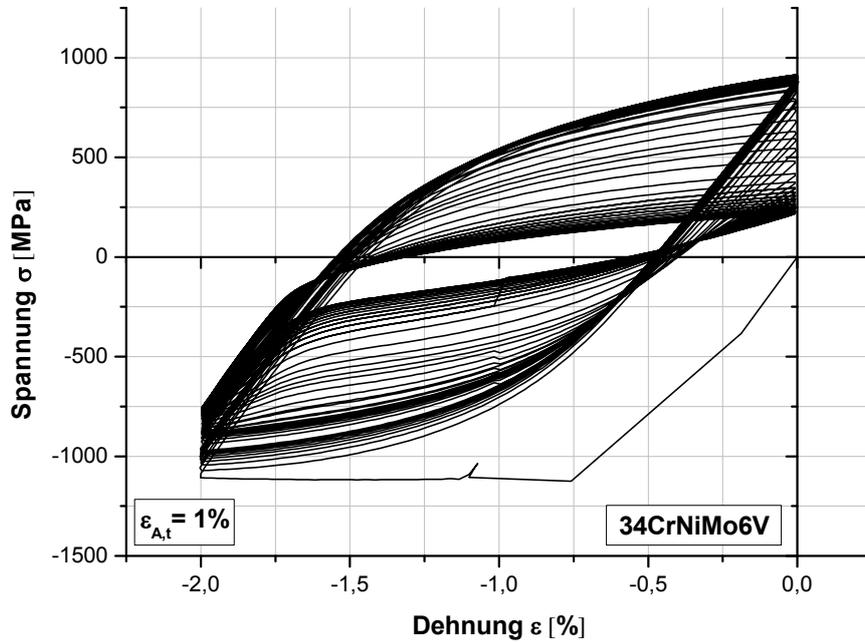


Abb. 7.3: LCF-Versuch des Werkstoffes $34CrNiMo6V$

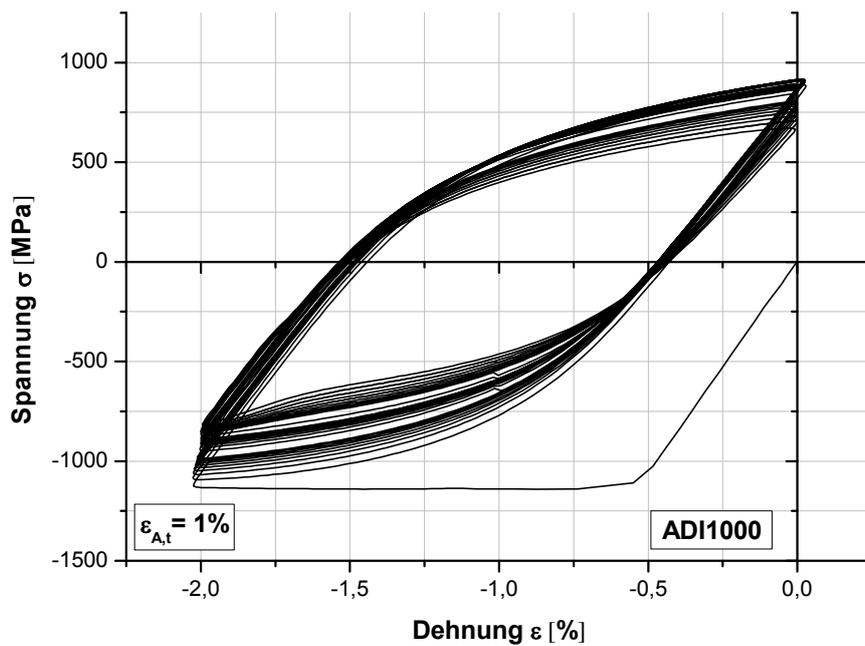


Abb. 7.4: LCF-Versuch des Werkstoffes $ADI1000$

7.3 Eigenspannungsmessungen

Im folgenden werden die Ergebnisse der röntgenographischen Eigenspannungsmessungen gezeigt. Die Daten stammen aus eigens für diese Arbeit getätigten Experimente, sowie aus vorhergegangenen Projekten. Es werden die Eigenspannungen von zwei verschiedenen Werkstoffen, wie des Vergütungsstahls $34CrNiMo6V$ und des Eisengusswerkstoffes $ADI1000$, in den Diagrammen abgebildet.

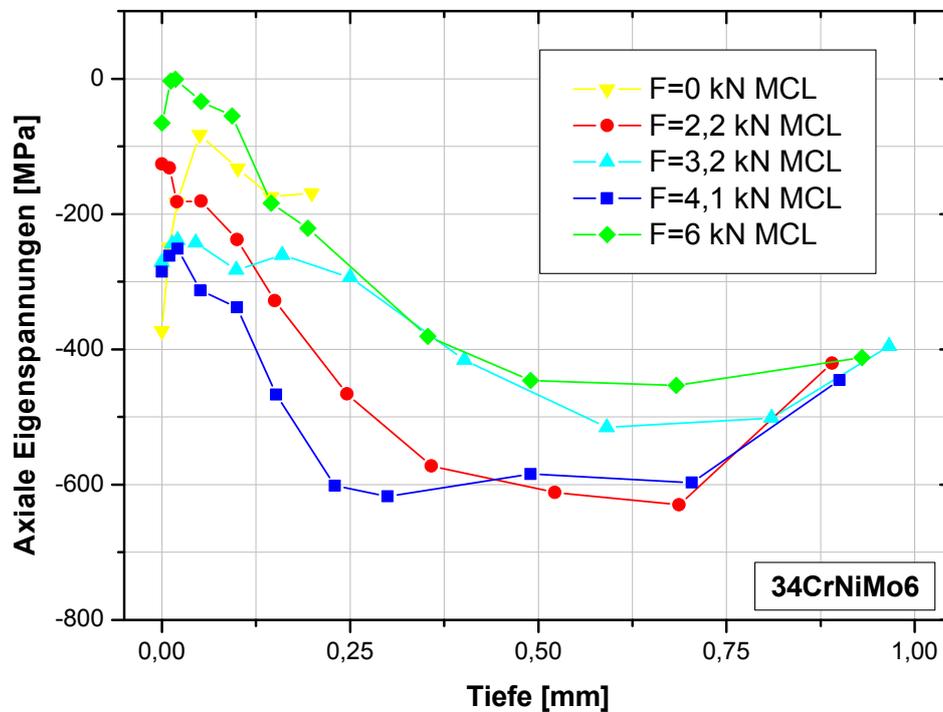


Abb. 7.5: Axiale Druckeigenspannungsverläufe von gekerbten Proben im Kerbgrund bei unterschiedlichen Festwalzkräften

Die ersten hier gezeigten Eigenspannungsverläufe (Abb. 7.5) wurden im Zuge eines anderen Projektes am *Materials Center Leoben Forschung GmbH* erstellt. Wie im Diagramm ersichtlich wurden die Eigenspannungen für 5 verschiedene Festwalzkräfte gemessen. Bei der kleinsten Festwalzkraft von 2200 N werden bereits beträchtliche Druckeigenspannungen in der Höhe von ca. 600 MPa bis zu einer Tiefe von ca. 0,7 mm induziert. Da der gemessene Druckeigenspannungsverlauf bei 3200 N Festwalzkraft nicht plausibel erscheint, da er unterhalb von jenem von 2200 N liegt, wurde die Festwalzkraft von 4100 N als geeignet erachtet um maximale Druckeigenspannungen in das Material zu induzieren.

Anhand von stichprobenartigen Festigkeitsuntersuchungen und mikroskopischen Betrachtungen der festgewalzten Oberflächen wurde die geeignete Festwalzkraft bestimmt

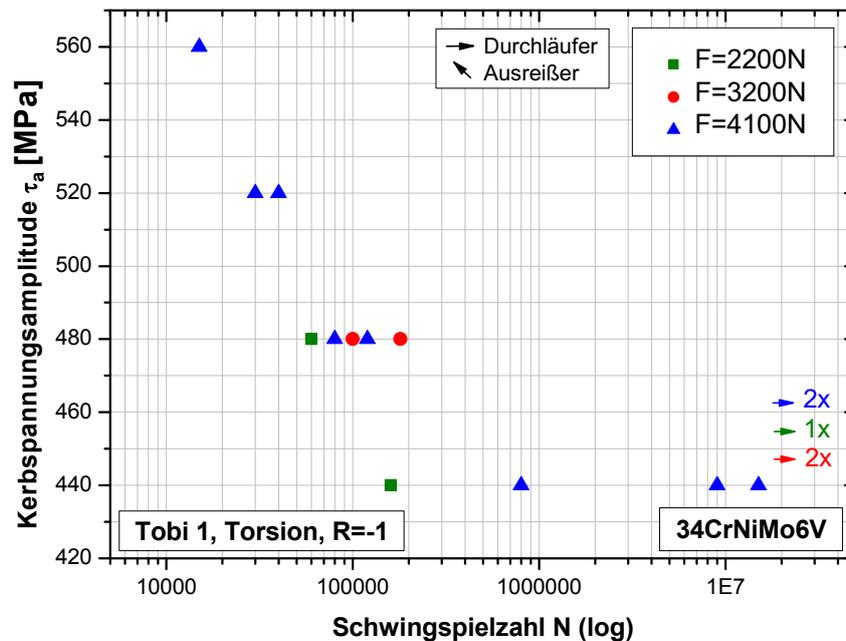


Abb. 7.6: Stichprobenartige Schwingfestigkeitsuntersuchungen mit unterschiedlich festgewalzten Proben

Bei den stichprobenartigen Festigkeitsuntersuchen zeigte sich kein signifikanter Einfluss der Festwalzkraft im Dauerfestigkeitsbereich. Tendenziell zeigte im Zeitfestigkeitsbereich die Festwalzkraft 4100 N Vorteile, weshalb die weiteren Untersuchungen mit 4100 N festgewalzten Proben durchgeführt wurden.

Um die Aussagekraft bzw. die Richtigkeit der von den Experimenten erhaltenen Eigenspannungen ansatzweise abschätzen zu können wurden weitere Eigenspannungsmessungen an einem anderen Institut vorgenommen.

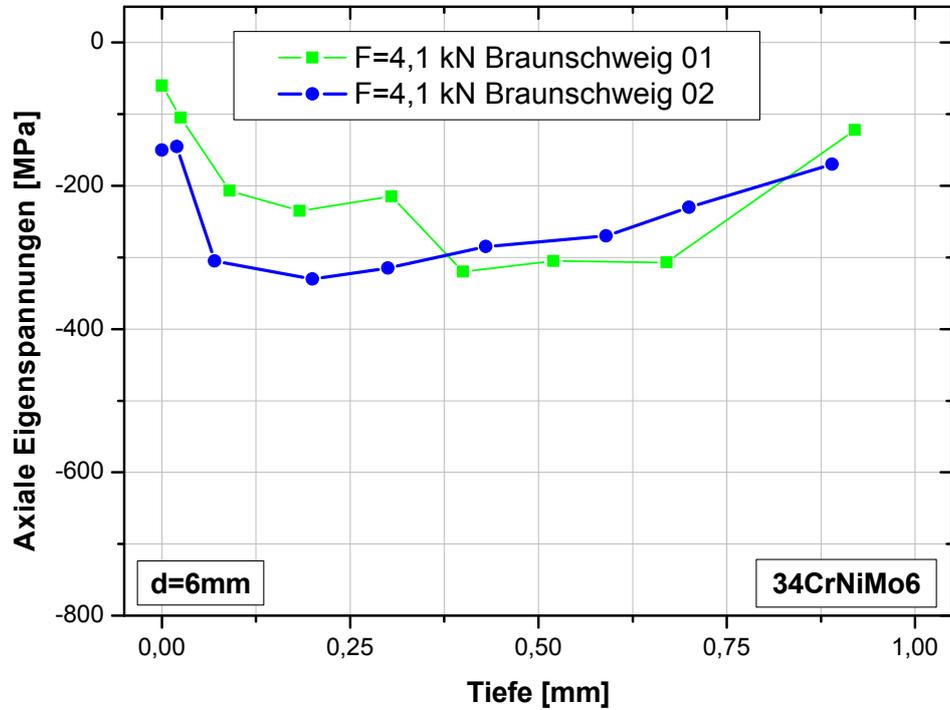


Abb. 7.7: Eigenspannungsmessungen für $d=6$ mm (Braunschweig)

Die Ergebnisse werden in Abb. 7.7 gezeigt. Wie schon zuvor erwähnt werden gekerbten Proben mit der Festwalzkraft $F = 4100N$ auf die durch den Festwalzprozess induzierten Druckeigenspannungen untersucht.

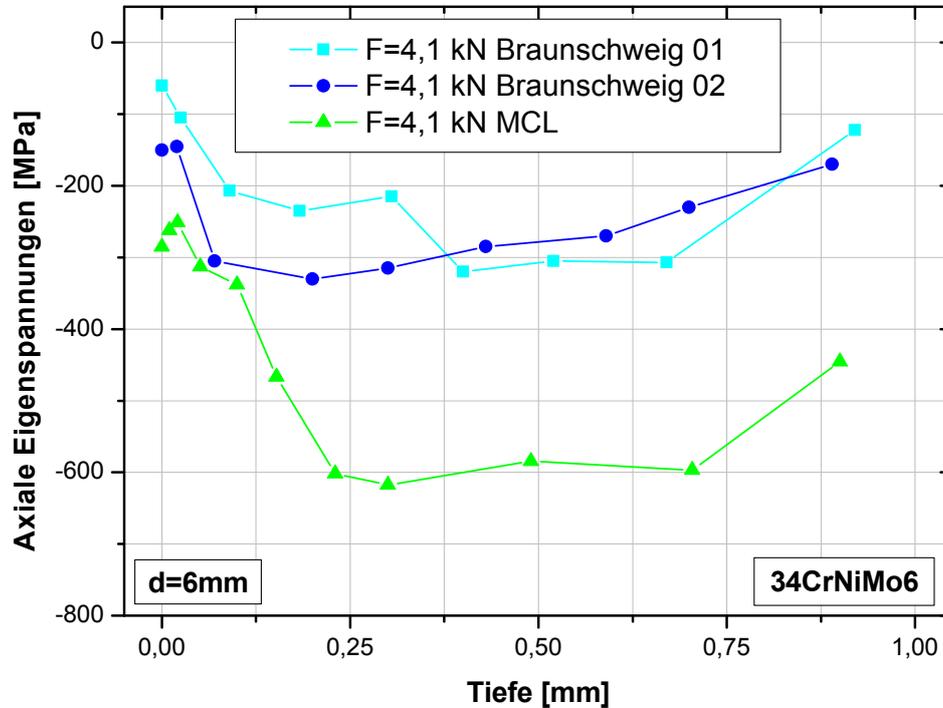


Abb. 7.8: Vergleich von Eigenspannungsmessungen für $d=6$ mm aus unterschiedlichen Labors

Wie man Anhand der Gegenüberstellung feststellen kann liegt ein großer Unterschied zwischen den Messergebnissen vor (Abb. 7.8).

Um auf diese Problematik der variierenden Messergebnisse bei gleichem Vorgehen eingehen zu können, würde eine größere Versuchsreihe von Eigenspannungsmessungen nötig sein. Jedoch auf Grund sehr hoher Kosten für die röntgenographische Eigenspannungsmessung wird im Zuge dieser Arbeit nicht näher auf dieses Problem eingegangen.

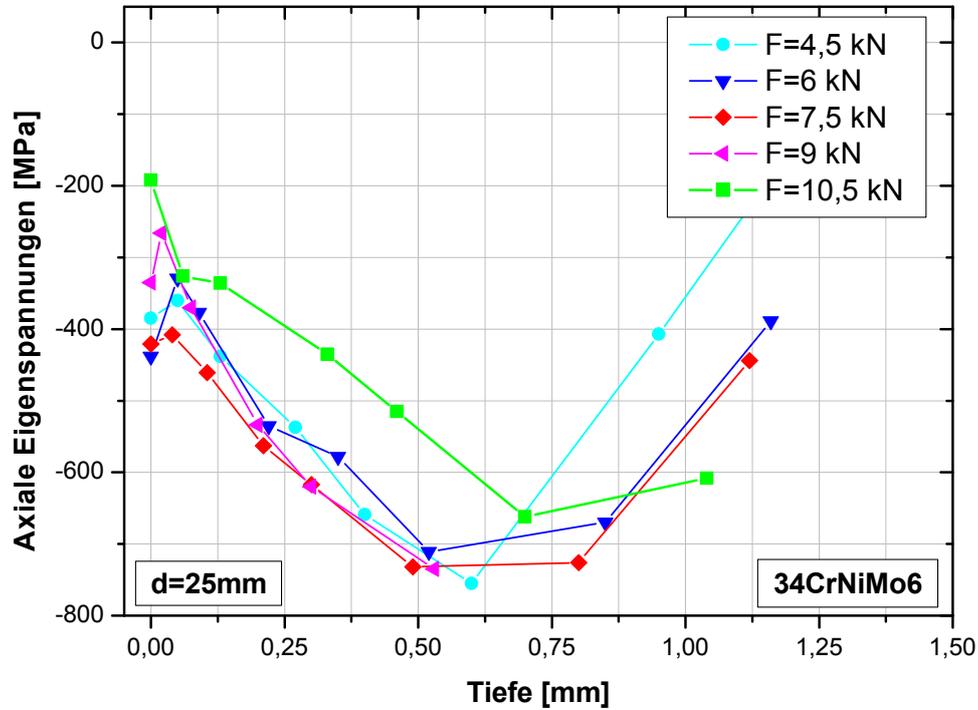


Abb. 7.9: Eigenspannungsverläufe einer größeren Probe mit $d=25\text{ mm}$

Da man auf Grund der sehr kleinen Probengeometrie bzw. Kerbradius von schwierigen Bedingungen bei dem Festwalzen ausgehen kann. Werden weiters Werte von Eigenspannungsmessungen bei einer größeren Geometrie verwendet (Abb. 7.9).

Kapitel 8

Ergebnisse und Diskussion

Im folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Simulationen diskutiert. Dazu werden sie den experimentell ermittelten Daten gegenübergestellt.

Wie schon zuvor erläutert, werden mit Hilfe des *Combined Hardening* Modells die Verläufe von aus den *LCF*-Versuchen stammenden Hysteresen nachgebildet bzw. simuliert. Nachdem bei einer *FE*-Rechnung Verschiebungen berechnet werden, sind für das Festwalzmodell dehnungsgeregelte Versuche wesentlich. Als Referenzdaten bzw. Hysteresen werden druckschwellige ($R_\epsilon = -\infty$) Versuche herangezogen, da beim Festwalzprozess die Belastung im Druckbereich im Vordergrund steht.

Die Herstellung der für die Versuche notwendigen festgewalzten Proben erfolgte durch mehrmaliges überrollen der Oberfläche im Kerbbereich. Es wurde dazu die Kraft innerhalb von neun Überrollungen aufgebracht und wieder abgesenkt, deshalb wurde wie im Kapitel, *Modellerstellungen für Simulationen* erläutert, der simulierte Festwalzprozess in drei Teilabschnitte gegliedert.

8.1 Ergebnisse der Simulation des elektrochemischen Abtrags

8.1.1 Theorie nach *Moore and Evans*

Da bei der röntgenographischen Eigenspannungsanalyse immer nur die Spannungen an der Oberfläche gemessen werden können, muss das Material der zu messenden Probe schrittweise durch elektrochemische Ätzung abgetragen werden, um Messpunkt für Mess-

punkt für den Spannungsverlauf in der Probentiefe zu erhalten. Durch den Abtrag wird eine Umlagerung der im abgetragenen Werkstoffvolumen wirkenden Eigenspannungen auf den verbleibenden Restquerschnitt bewirkt, sodass sich die Druckeigenspannungen an der Oberfläche des Restquerschnitts erhöhen, vgl. Abb. 8.1. Der gemessene Tiefenverlauf ergibt also mit Ausnahme des ersten Messpunktes - größere Druckeigenspannungen, als sie ursprünglich nach dem Festwalzen vorgeherrscht haben. In *Moore and Evans* werden einfache Näherungen entwickelt, um aus dem gemessenen Verlauf auf den ursprünglichen Verlauf zurückzurechnen. Für den vorliegenden Fall einer axialsymmetrischen Probe wird der Korrekturterm zu

$$\Delta\sigma_1(r_1) = \frac{-2 \cdot \sigma_1(R) \cdot (R - r_1)}{R} \quad (8.1)$$

wobei R den Radius der Probe vor der Ätzung, r_1 den Radius nach der Ätzung und $\sigma_1(R)$ die am Radius R wirkende Eigenspannung in Längsrichtung bezeichnen. [16]

Zur Überprüfung dieses Näherungsverfahrens werden Finite-Elemente-Simulationen des Festwalz- und Ätzvorganges durchgeführt, wie zuvor im Kapitel, *Modellerstellungen für Simulationen*, beschrieben. In einem ersten Rechenlauf wird die Probe festgewalzt und so die Eigenspannungsverteilung nach dem Festwalzen erhalten. In einem zweiten Rechenlauf werden Schritt für Schritt Elemente der Oberfläche entfernt, so wie dies auch beim Ätzen geschieht (Abb. 8.1). Dies liefert einen erhöhten Eigenspannungsverlauf, wie er auch im Experiment erhalten würde.

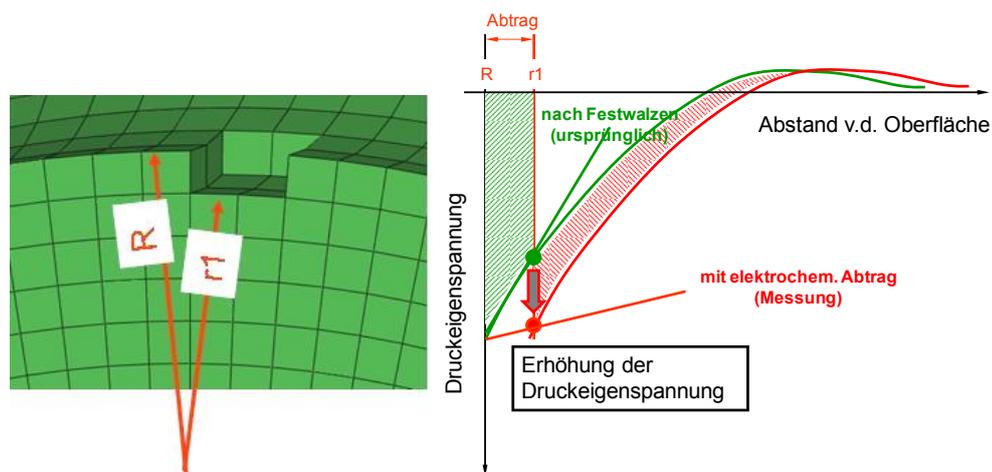


Abb. 8.1: (a) Simulation des Materialabtrages nach der ersten Eigenspannungsmessung, (b) Spannungsumlagerung durch Materialabtrag

Abschließend wird die Eigenspannungskorrektur nach Glg. (8.1) auf den so erhaltenen Eigenspannungsverlauf angewendet. Wäre das Verfahren exakt, würde so wieder der ursprünglich nach dem Festwalzen vorhandene Spannungsverlauf erhalten.

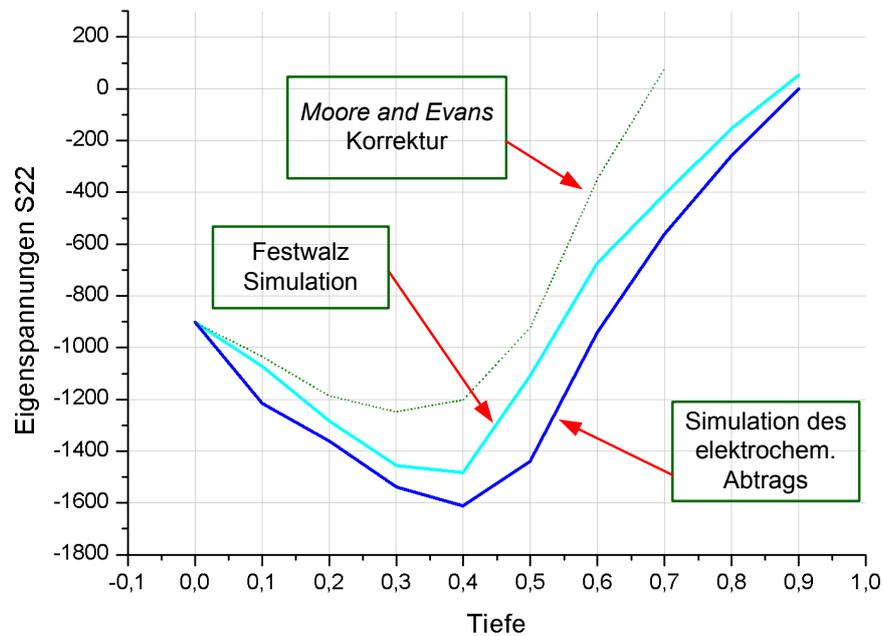


Abb. 8.2: Anwendung der Theorie nach *Moore and Evans*

In Wirklichkeit wird der ursprüngliche Verlauf unterschätzt (Abb. 8.2), das Verfahren ist also als konservativ anzusehen und damit für den Einsatz in der Produktentwicklung geeignet.

Die Korrektur stellt somit einen notwendigen und wichtigen Schritt in der Interpretation röntgenographischer Eigenspannungsmessungen für ihre Anwendung in der Bauteilauslegung dar, führt allerdings in den oberflächennahen Bereichen naturgemäß zu keiner besseren Übereinstimmung von Messung und Rechnung.

8.2 Ergebnisse der Hysteresensimulation

Es werden folgend die einzelnen Ergebnisse der *LCF*-Versuche für den Werkstoff $34Cr-NiMo6V$ und den Eisengusswerkstoff *ADI1000* und der jeweils dazugehörigen Simulation gegenübergestellt. Als Referenzhysterese bzw. stabilisierte Hysterese wurde der neunte Zyklus eines dehnungsgeregelten Versuches mit $R_\epsilon = -\infty$ und der Dehnungsamplitude

$\epsilon_a = 1\%$ gewählt.

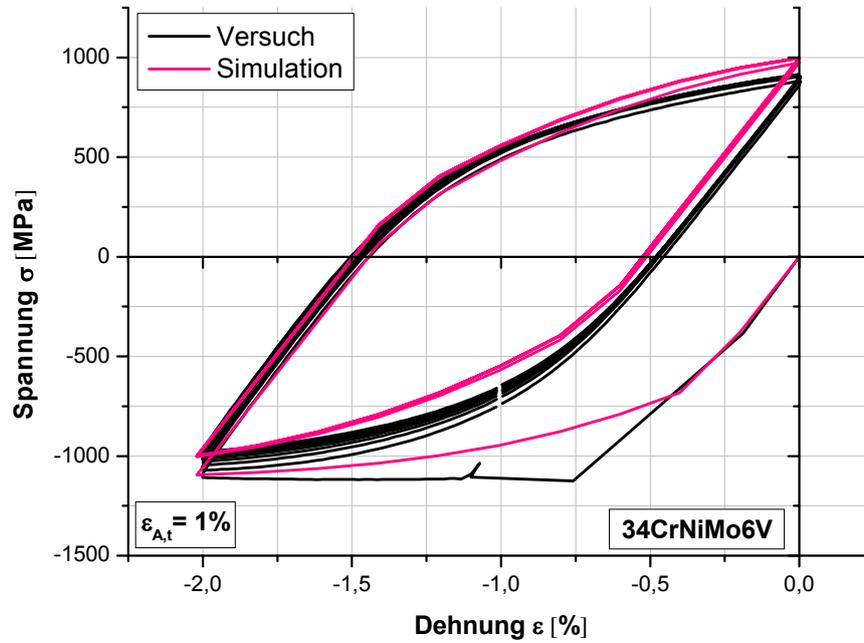


Abb. 8.3: Vergleich von simulierten und experimentell ermittelten Hysterese von $34CrNiMo6V$

Wie aus Abb. 8.3 ersichtlich stimmen die Verläufe der simulierten Hysterese mit den experimentell ermittelten Hysterese im Druckbereich relativ gut überein.

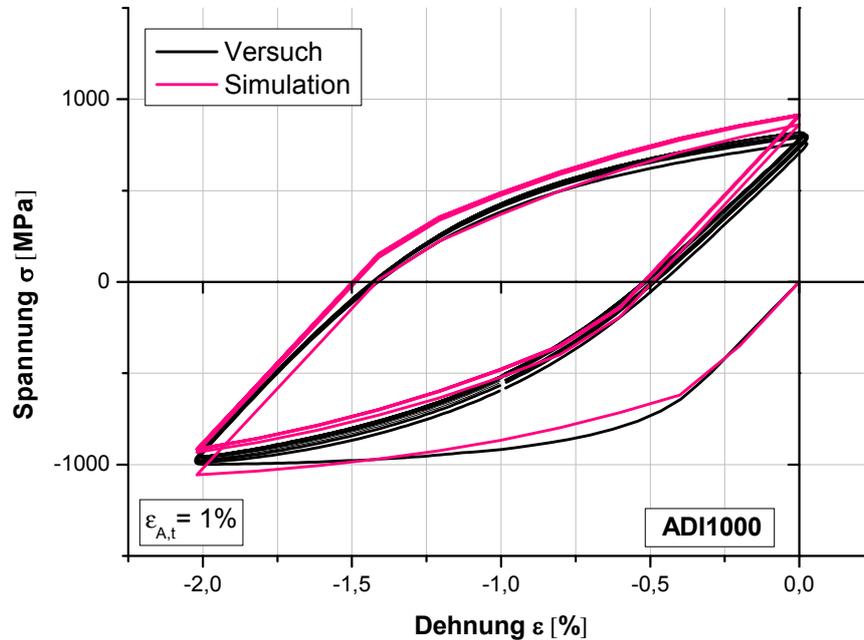


Abb. 8.4: Vergleich von simulierten und experimentell ermittelten Hysteresen von *ADI1000*

Auch für den Eisengusswerkstoff *ADI1000* können zufriedenstellende Ergebnisse der Simulation (Abb. 8.4) erreicht werden.

Die anfängliche Mittelspannungsrelaxation wird gut abgebildet. Die weitere isotrope Entfestigung des Materials kann durch die Komponente, *Cyclic hardening*, des *Combined Hardening* Modells erzielt werden. Jedoch ist sie im Bereich der ersten neun Zyklen verschwindend gering. Deshalb hat die anfänglich stattfindende Mittelspannungsrelaxation großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

Das Werkstoffmodell kann primär für symmetrische Hysteresen angewendet werden für unsymmetrische Verläufe der Hysterese ist es nicht zu empfehlen. Es sollte in Form einer *User Subroutine* versucht werden diese Hysteresen besser abzubilden. Da die Hysteresen der Versuche für *34CrNiMo6V* und den Eisengusswerkstoff *ADI1000* annähernd symmetrisch sind, kann das *Combined Hardening* Modell für diese beiden Materialien verwendet werden.

8.2.1 Ergebnisse der Festwalzsimulation

Im folgenden werden die Simulationsergebnisse des Festwalzprozesses mit den experimentell ermittelten Eigenspannungen verglichen. Es werden die für zwei unterschiedliche Probengeometrien ermittelten Daten aufgezeigt.

Die Verläufe der ersten Simulationen wurden durch Implementierung einer Fließkurve simuliert. Diese berücksichtigt jedoch nicht das zyklische Verhalten von Werkstoffen.

Durch die Implementierung des Werkstoffmodells *Combined Hardening* ist es möglich Verbesserungen der Eigenspannungssimulationen zu erzielen.

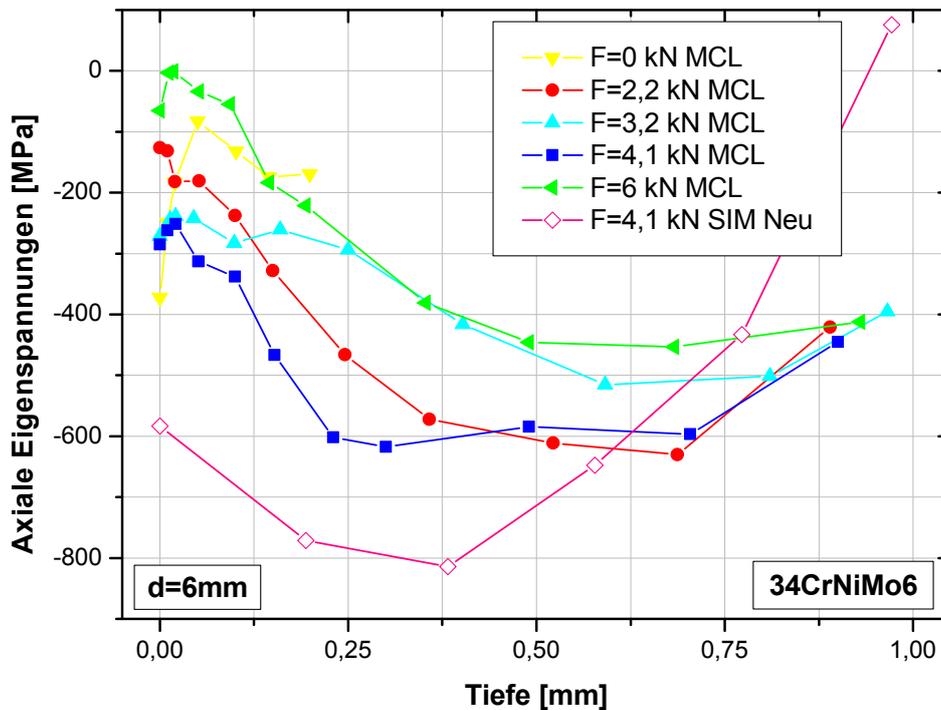


Abb. 8.5: Vergleich von Simulation und Experiment

In Abb. 8.5 sind nochmals die Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen für den Durchmesser $d = 6 \text{ mm}$ abgebildet.

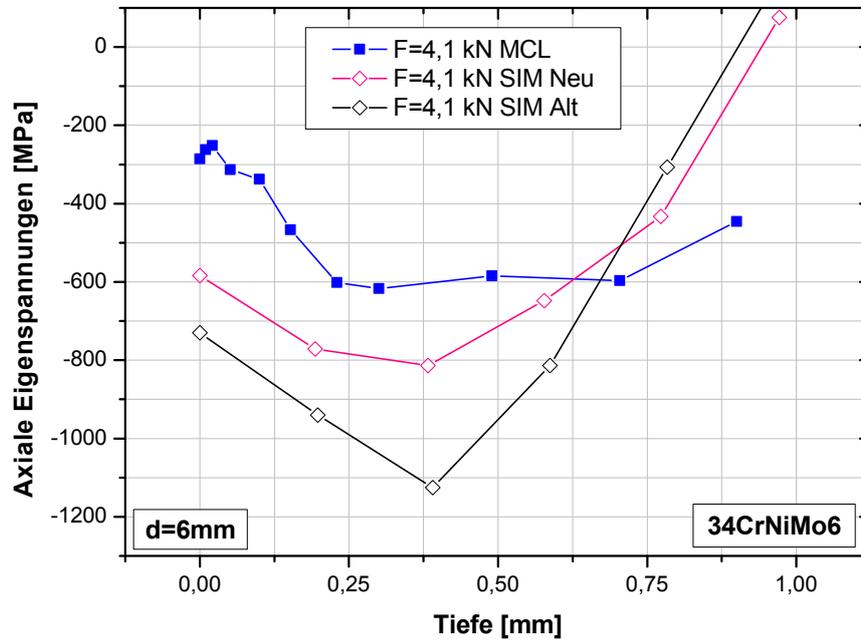


Abb. 8.6: Vergleich der alten und neuen Simulationsergebnisse mit Messung

In Abb. 8.6 sind die Simulationsergebnisse den experimentellen Daten gegenübergestellt. Wie man sehen kann wird der Unterschied der Höhe der Eigenspannungsverläufe auf ca. 25 % gesenkt. Auf die Tiefe des Eigenspannungsmaximums hat das neue Materialmodell jedoch keinen Einfluss.

Unterschiede herrschen nach wie vor bei der Abbildung der Eigenspannungen an der Oberfläche zu den experimentell ermittelten Daten.

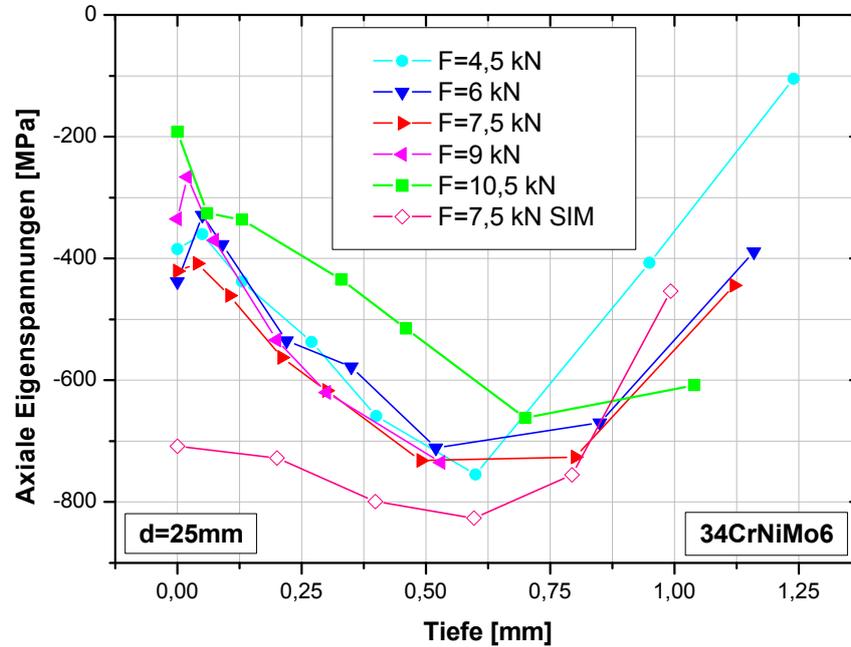


Abb. 8.7: Ergebnisse der Eigenspannungsmessung für $d=25\text{ mm}$

In Abb. 8.7 sind nochmals die Ergebnisse der röntgenographischen Eigenspannungsmessung für die größere Probengeometrie ($d = 25\text{ mm}$) zu sehen. Im folgenden werden die Werte des gemessenen Verlaufs mit der Festwalzkraft $F = 7500\text{ N}$ dem simulierten Verlauf gegenübergestellt.

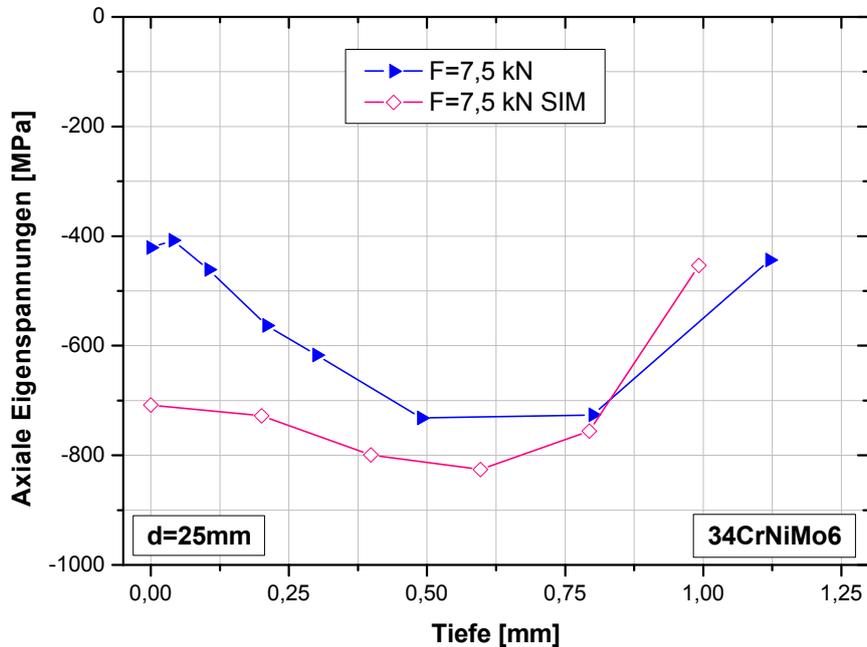


Abb. 8.8: Vergleich der experimentellen Daten mit den Simulationsergebnis der Bezugskraft $F = 7,5 \text{ kN}$

In Abb. 8.8 ist zu sehen, dass zwischen den Ergebnissen von Simulation und Experiment eine gute Übereinstimmung vorliegt. Einzig die Eigenspannungen direkt auf der Oberfläche weichen voneinander ab.

Die beste Übereinstimmung der Verläufe kann bei Simulation der größeren Probengeometrie erreicht werden.

In diesem Fall liegt der Unterschied der simulierten Daten zu den experimentellen Daten bei nur ca. 12 %.

Da man davon ausgehen kann, dass der Festwalzprozess selbst und auch die anschließende Messung der Eigenspannungen durch das röntgenographische Verfahren größerer Geometrien besser bewerkstelligt werden kann.

Zusammenfassend kann man sagen, dass durch die Implementierung des *Combined Hardening* Modells eine wesentliche Verbesserung bei der Simulation von Druckeigenspannungen zeigt. Besonders das Eigenspannungmaximum bei der größeren Probengeometrie kann gut wiedergegeben werden.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

In dieser vorliegenden Arbeit wurde der Aufbau eines Modells für den Festwalzprozess gekerbter Proben beschrieben. Außerdem wurde durch die Erstellung eines *Single Element* Modells eine einfache und schnelle Möglichkeit konstruiert, um aus Materialversuchsdaten Parameter für die Implementierung in ein Werkstoffmodell, in diesem Fall in das *Combined Hardening* Modell, zu generieren. Um die Auswirkungen bei einer röntgenographischen Eigenspannungsmessung auf die Spannungsgegebenheiten näher betrachten zu können, wurde der Materialabtrag, welcher für dieses Verfahren notwendig ist, simuliert.

Der im Zusammenhang mit der Eigenspannungsmessung stehende Effekt der Spannungsumlagerung aufgrund elektrochemischen Materialabtrags wurde simuliert und mit der Theorie nach *Moore and Evans* in Verbindung gebracht. Da die Druckeigenspannungen in der Regel als zu hoch angenommen werden, bietet dieses Verfahren eine einfache und konservative Korrektur von experimentell ermittelten Eigenspannungen. Somit konnte in der vorliegenden Arbeit gezeigt werden, dass die Theorie nach *Moore and Evans* ein nützliches Werkzeug für die konservative Korrektur gemessener Eigenspannungen darstellt.

Durch das *Single Element* Modell ist es möglich die im *LCF*-Versuch ermittelten Hysteresen gut abzubilden und so Werkstoffparameter für das *Combined Hardening* Modell zu generieren. Es konnte das aufgezeigte Verhalten, wie die Mittelspannungsrelaxation und die darauf folgende Entfestigung durch das Werkstoffmodell wiedergegeben werden. Hinsichtlich der Simulation der eingebrachten Druckeigenspannungen basierend auf dem Festwalzprozess wurden beachtliche Verbesserungen erzielt. Die Abweichungen zwischen Simulation und Messung wurden beträchtlich verkleinert.

Für weitere Arbeiten in diesem Bereich wäre eine genaue Aufschlüsselung der röntgenographischen Eigenspannungsmessung in Form einer größeren Loszahl der zu messenden



Proben sinnvoll, da es große Unterschiede bei den Ergebnissen gemessener Eigenspannungsverläufe unter den gleichen Walzbedingungen gibt. Es ist durchaus denkbar das Materialmodell, *Combined Hardening*, für weitere Simulationen anzuwenden, bei denen eine Berücksichtigung des zyklischen Materialverhaltens sinnvoll erscheint.

Literaturverzeichnis

- [1] BRUGGER A. *Simulation und prüftechnische Untersuchung verschiedener Oberflächenverfestigungsverfahren*. Beuth Verlag, Montanistische Universität Leoben., 2004.
- [2] ABAQUS. *Dassault Systemes Simulia Corp.* Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 4., Rhode Island, USA, <http://www.simulia.com>., 2007.
- [3] SCHULZE V.; BURGAHN F.; VÖHRINGER O.; MACHERAUCH E. *Zum thermischen Abbau von Kugelgestrahl-Eigenspannungen bei vergütetem 42CrMo4*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1993.
- [4] MÜLLER F. *Verfahren*. Göppinger Straße 1-3, D-75179 Pforzheim/ www.hmp.de.
- [5] MÜLLER F. *Verfahrensgrundlagen des Rundknetens*. Shaker Verlag, Darmstadt, 1997.
- [6] OUDIN A.; LAMESLE L.; PENAZZI S.; LEROUX S.; REZAI-ARIA F. *Fatigue Behaviour and Life Assessment of HotWork Tool Steels, Temperature-Fatigue Interaction*. Paris, 2001.
- [7] SCHOTT G. *Werkstoffermüdung - Ermüdungsfestigkeit*. Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 4., Stuttgart, 1997.
- [8] KÖBERL H. *Entwicklung eines Modells zur Beschreibung des Lebensdauerverhaltens von NE-Legierungen (Al, Cu, Ni) unter thermomechanischer Beanspruchung*. Leoben, 2009.
- [9] KLOOS K. H.; ADELMANN J. *Schwingfestigkeitssteigerung durch Festwalzen*. VCH Verlagsgesellschaft mbH, Weinheim, 1988.
- [10] RÖSLER J. *Mechanisches Verhalten der Werkstoffe*. Teubner Verlag, Wiesbaden, 2006.

- [11] LEMAITRE J.; CHABOCHE J. L. *Mechanics of solid materials*. Cambridge University Press, The Edingburgh Building, Cambridge CB2 2RU, UK, 1990.
- [12] KRÜßMANN M. *Rundkneten im Einsteckverfahren*. Shaker Verlag, Institut für Umformtechnik Universität Stuttgart, 1996.
- [13] RADAJ D.; VORMWALD M. *Ermüdungsfestigkeit*. Springer Verlag, Berlin, 2007.
- [14] Tao WEI Lin YE Graham CLARK-Yiu-Wing MAI MONTROSS, Charles S. *Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review*. International Journal of Fatigue, Paris, 2002.
- [15] GÄNSER H. P. *Schädigungsmechanik mit Finiten Elementen*. Montanistische Universität Leoben., 2011.
- [16] MOORE M. G.; EVANS W. P. *Correction for stress layers in x-ray diffraction residual stress analysis*. Pittsburgh., 1956.
- [17] WOHLFAHRT H.; KRULL P. *Mechanische Oberflächenbehandlung, Grundlagen-Bauteileigenschaften-Anwendungen*. Wiley-VCH Verlag., Braunschweig, 2000.
- [18] FISCHER F. D.; KOLEDNIK G.; X. Shan; RAMMERSTORFER. *A note on calibration of ductile failure damage indicators*. 1995.
- [19] B. SCHOLTES. *Eigenstressungen in mechanisch randschichtverformten Werkstoffzuständen - Ursache, Ermittlung und Bewertung*. DGM Informationsgesellschaft mbH, 1991.
- [20] JUNG U. *Festwalzen und Größeneinfluss I+II*. Hannover, 1997.
- [21] DORSCH V. *Zur Anwendung und Numerik elastisch-plastischer Stoffgesetze*. Projektgruppe Prozesssimulation in der Umformtechnik von Univ.-Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. K. Lange, Stuttgart, 1996.
- [22] EICHLSEDER W. *Skriptum zu Betriebsfestigkeit II*. Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau, 2008.