

Diplomarbeit 1999

Eigenspannungs-Minderung durch Vibriieren

Fachbereich : Maschinenbau

Diplomand: Marcello Fabbroni
Hauptstrasse 19
9403 Goldach

Betreuer: Prof. Dr. Bernd Schumacher
Gessnerstrasse 6
9011 St. Gallen

Dipl. -Ing. Josef Hafner
Steighalde 9
9404 Rorschacherberg

Experte: Dipl. -Ing. Edgar Breuer
Thalerstrasse 84
9404 Rorschacherberg

Präsentation: 2. November 1999

1 Inhaltsverzeichnis

1	Inhaltsverzeichnis	2
2	Zusammenfassung	4
3	Aufgabenstellung.....	5
3.1	Pflichtenheft.....	5
3.2	Zeitplan.....	6
4	Die Eigenspannungsthematik	7
4.1	Historischer Überblick.....	7
4.2	Definition der Eigenspannung.....	7
4.3	Entstehung von Eigenspannungen	8
4.3.1	Mechanische Einflüsse:	8
4.3.2	Thermische Einflüsse:	9
4.3.3	Stoffeigenschaftsänderungen:	9
4.4	Unterteilung von Eigenspannungen	9
4.4.1	Eigenspannungen 1. Art:	9
4.4.2	Eigenspannungen 2. Art:	9
4.4.3	Eigenspannungen 3. Art	9
4.5	Auswirkung von Eigenspannungen.....	10
4.5.1	Statische Beanspruchung	10
4.5.2	Dynamische Beanspruchung	10
4.5.3	Korrosive Umgebung	11
4.6	Abbau von Eigenspannungen.....	11
5	Bestimmung von Eigenspannungen	12
5.1	Zerlegeverfahren	13
5.2	Ausbohr- und Abdrehverfahren.....	13
5.3	Zerschneide- und Abtrageverfahren	14
5.4	Schlitzverfahren.....	15
5.5	Bohrlochverfahren	16
5.6	Ring-Kern-Verfahren.....	16
5.7	Beugungsverfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen.....	17
5.7.1	Röntgenographische Spannungsanalyse.....	17
5.7.2	Eigenspannungsanalyse mittels Neutronen	18
5.8	Ultraschallverfahren.....	18
5.9	Magnetische Verfahren.....	18
5.10	Spannungsoptische Verfahren:.....	19
5.11	Finite-Elemente-Methode:.....	19
5.12	Kurzer Rückblick.....	19
6	Vibrationsentspannen	20
6.1	Erkenntnisse aus der Fachliteratur	20
6.2	physikalischer Vorgang beim Abbau von Eigenspannungen.....	22
6.3	Zusammenfassung der Fachliteratur	23
6.4	Recherche der Fachliteratur	24
7	Praktische Messungen	25
7.1	Versuche	27

7.2	Vergleichsmessungen	28
7.2.1	Eichung des Beschleunigungsaufnehmers	28
7.2.2	Ergebnis der Eichung	30
7.2.3	Unwuchtmasse	31
7.3	Vibrieren der Zusatzriemenscheibe	32
7.3.1	Vibrieren der Lagerringe	34
7.3.2	Vibrieren der Führungsschiene	37
7.4	Auswertung der Messprotokolle	39
7.4.1	Messprotokoll Zusatzriemenscheibe 45702.00.1.00	40
7.4.2	Interpretation	41
7.4.3	Messprotokoll Lagerring 25520.00.0.00	42
7.4.4	Interpretation	43
7.4.5	Messprotokoll Führungsschiene 82350.00.0.00	44
7.4.6	Interpretation	45
7.5	Gesamtergebnis der Versuche / Messprotokolle	45
8	Ergebnisse / Wirtschaftliche Auswirkungen	46
9	Begriffe und Abkürzungen	47
10	Literaturverzeichnis	50
11	Abbildungsverzeichnis	52
12	Ehrenwörtliche Versicherung	53

2 Zusammenfassung

Das Ziel der Diplomarbeit bestand darin, anhand der Fachliteratur und durch das Durchführen von praktischen Versuchen, die Eignung und die Nutzungsgrenzen des subresonanten Vibrationsverfahrens kritisch zu untersuchen.

Der Grundgedanke für diese Arbeit war, das Spannungsfreiglühen durch subresonantes Vibrieren von stählernen Bauteilen zu ersetzen. Falls sich zeigen würde, dass dieses Verfahren effektiv das hält was die Hersteller versprechen, so könnten in der Produktion grosse Kosteneinsparungen erzielt werden. (Härterekosten, Investitionen für Öfen, Energiekosten, Transportkosten, Zeitverluste)

Es existiert seit etwa 1960 umfangreiche Literatur, die von vielen Untersuchungen berichten. Anhand dieser, konnten bereits einige Erkenntnisse gewonnen werden. Beim Studium der Fachliteratur wird einem schnell bewusst, dass es sich um eine sehr schwierige Technologie handelt. Es wurden nämlich immer und immer wieder neue Versuche und Testreihen durchgeführt.

Der aber meiner Ansicht nach umfassendste und immer wieder zitierte Bericht, ist derjenige von Bühler und Pfalzgraf [5]. Sie untersuchten dieses Thema bereits 1962 sehr gründlich. Der von den Herstellern versprochene Effekt des kompletten Eigenspannungsabbaus, konnten sie aber nicht bestätigen. Auch andere Fachleute versuchten dieses Verfahren genauer zu prüfen, konnten aber wie bereits Bühler und Pfalzgraf keine grossen Eigenspannungsminderungen feststellen.

Einzig erkennbarer Nutzen könnte jedoch in der punktuellen Entspannung von Schweissnähten sein.

Um einen geringen Eigenspannungsabbau zu erreichen, sind sehr hohe Schwingungsbeanspruchungen notwendig. (Mindestens 70% der zulässigen Schwellspannung). Zudem kann nur ein örtlich auf die höchstbeanspruchten Stellen begrenzter und teilweiser Eigenspannungsabbau stattfinden.

Allein aus der Fachliteratur war bereits erkennbar, dass sich das Spannungsfreiglühen nicht vollständig durch das Vibrationsverfahren ersetzen lässt.

Die Auswertungen der praktischen Versuche bestätigen die obenerwähnten Aussagen. Der Grund liegt darin, dass die erhofften Verformungen beim Vibrieren, die als Indiz für die Spannungslösung gegolten hätten, nicht stattgefunden haben.

Die Eichung des Beschleunigungssensors zeigte zudem, dass die ermittelten Messwerte nur als Vergleichszahlen verwendet werden können. Die ganze Vibrationsanlage, die für die Versuche eingesetzt wurde, erwies sich als etwas improvisiert. Eine Zuordnung von physikalischen Messgrössen, die für eine wissenschaftliche Betrachtung notwendig wären, können mittels der verwendeten Anlage nicht erreicht werden.

Fazit:

Nach den Erkenntnissen aus dem Studium der Fachliteratur und den praktischen Versuchen steht für mich folgendes fest.

- Das erhoffte Ziel, das Spannungsfreiglühen durch das subresonante Vibrieren ersetzen zu können, ist nach den heutigen Erkenntnissen **nicht** möglich!
- Für die Firma Bruderer AG, können durch dieses Verfahren keine Kosteneinsparungen erzielt werden.

3 Aufgabenstellung

Die wachsende Nachfrage nach technisch hochstehenden, auf den Kunden zugeschnittenen Lösungen und die damit verbundene Teilevielfalt verlangt den Einsatz von immer moderneren, komplexeren Fertigungsmitteln. Um diesen Bedürfnissen auf dem Markt gerecht zu werden, ist eine Reduzierung der Durchlaufzeit vom Innovationsprozess bis zum fertigen Produkt sowie eine Steigerung des Qualitätsstandards unumgänglich.

Aus diesem Grund stellt mir die Firma Bruderer AG die Aufgabe, ein Verfahren zu untersuchen, mit welchem man durch sogenanntes „subresonantes Vibrieren“, Bauteile in kürzester Zeit und mit geringem Geräteaufwand von Bauteil-Eigenstressungen befreit. Bis anhin werden stählerne Maschinenbauteile, die aufgrund verschiedener Herstelltechnologien Spannungen in sich tragen, durch eine separate Wärmebehandlung (Spannungsfreiglühen) für den späteren Einsatz tauglich gemacht. Die ist jedoch mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden. Diese thermischen Verfahren benötigen zudem sehr viel Energie und laufen meistens langsam ab, dazu müssen diese Prozesse auswärts vergeben werden, was zu langen Durchlaufzeiten führt.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit soll nun das Verfahren zur Eliminierung von Eigenstressungen mittels ¹subresonanter Vibration genauer untersucht und kritisch hinterfragt werden.

3.1 Pflichtenheft

Folgende Punkte sind abzuhandeln.

- Fachliteratur zum Thema „Subresonanter Entspannung“ recherchieren und erste Informationen über die Eignung und Nutzungsgrenzen dieser Technik zusammenzutragen.
- Welche physikalischen Vorgänge bewirken bei der subresonanten Vibration die Bauteil Entspannung.
- Es soll ein Überblick über die aktuellen Messverfahren mit den dazugehörigen Auflösungen zur Ermittlung der Eigenstressungen erarbeitet werden.
- Praktische Messungen an Werkstücken durchführen unter Einbezug eines Anbieters dieses Verfahrens.
- Die Ergebnisse sind kritisch zu diskutieren und Vor-/Nachteile sowie wirtschaftliche Auswirkungen für die Firma Bruderer AG aufzulisten.

Die Zwischenergebnisse sind in regelmässigen Wochen Besprechungen den Betreuern Herr J. Hafner (Firma Bruderer AG) und Herr B. Schumacher (ISG) vorzustellen und zu bewerten.

¹ subresonant siehe unter „Begriffe und Abkürzungen“

3.2 Zeitplan

Zur Erledigung dieser Aufgabe stehen 170 Stunden zur Verfügung, die ich folgendermassen einteile.

• Einrichten und Klärung der Aufgabenstellung	8h
• Fachliteratur recherchieren und bestellen	6h
• Studium der Fachliteratur und erste Erkenntnisse	30h
• Überblick über das Gebiet der Eigenspannungsmessung	16h
• Praktische Messungen durchführen	25h
• Wirtschaftliche Auswirkung sowie Vor-/Nachteile diskutieren	25h
• Dokumentation	60h

Total	170h
-------	------

Eine genauere Planung halte ich für wenig sinnvoll, da während meiner Diplomarbeit sehr viele Prozesse (z.B. Anlieferung der Werkstücke) in der Firma geregelt werden müssen und sich somit kein vernünftiger Terminplan erstellen lässt. Zielpunkte auf die man streben muss und die der ganzen Koordination der Diplomarbeit dienen, sollten jedoch für den Diplomanden sowie für die Betreuer bekannt sein.

Milestones:

Ende Woche 36	- Bestellung der Fachliteratur (Expressbestellung) - Überblick über den Stand der Eigenspannungsmessung - Vibrationsversuche abgeschlossen
Ende Woche 37	- Nach dem Studium der Bücher erste Erkenntnisse über: <ul style="list-style-type: none"> • Eignung und Nutzungsgrenzen des Verfahrens • Welche physikalischen Vorgänge sind für das entspannen verantwortlich
Ende Woche 38	- Ergebnisse der praktischen Tests ausgewertet - Beginn der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung
Ende Woche 39	- Alle Ergebnisse ausgewertet ⇒ Dokumentation korrigieren

4 Die Eigenspannungsthematik

4.1 Historischer Überblick

Eigenspannungen sind seit mehr als 150 Jahren bekannt. [2] Neuman hat im Jahre 1841 die Doppelbrechung des Lichtes in transparenten Festkörpern auf bleibende Dehnung durch innere Spannungen zurückgeführt, welche bei der Erstarrung entstanden waren. Die Spannungsoptik arbeitet noch heute mit diesem von Neuman entdeckten Zusammenhang. Im Jahre 1860 stellte Wöhler im Rahmen einer Untersuchung über Achsbrüche an Eisenbahnfahrzeugen die erste korrekt beschriebene Eigenspannungsverteilung in Bauteilen dar. Gegen Ende des neunzehnten Jahrhunderts entwickelte sich die Idee, Eigenspannungen in geometrisch einfachen Bauteilen durch Zerlegen des Bauteiles und Messen der Verformung zu bestimmen. Die Bohrlochmethode, die auch für kompliziertere Formen eingesetzt werden kann, wurde schliesslich 1933 entwickelt. Parallel dazu wurden in diesem Jahrhundert auch weitere Verfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen entwickelt, so die röntgenographische Eigenspannungsmessung, die Ultraschall-Messtechnik und die magnetischen Verfahren. Die erwähnten Eigenspannungsmessungen werden in den folgenden Kapitel ausführlich behandelt.

4.2 Definition der Eigenspannung

Eigenspannungen sind meist herstellungsbedingt und ohne äussere Einwirkung in vielen Bauteilen vorhanden. Materialien wie Metalle, Keramik, Polymere, Verbundwerkstoffe und sogar Holz können Eigenspannungen aufweisen [2]. Sie können im Belastungsfall durch Überlagerung von aufgebrauchten Vorspannungen oder Lastspannungen die Lebensdauer eines Bauteiles massgeblich beeinflussen. Die Reaktion des Bauteils auf Eigen- und Lastspannungen sind dabei sowohl vom Material als auch vom Spannungszustand abhängig.

Was sind aber überhaupt Eigenspannungen?

[1] Als Eigenspannungen werden Spannungen bezeichnet, die in einem Bauteil vorliegen, ohne dass darauf äussere Kräfte oder Momente einwirken. Auch Temperatur Einflüsse, elektromagnetische Felder etc. werden im Rahmen dieser Definition als äussere Einwirkungen verstanden und bewirken somit höchstens Lastspannungen, jedoch keine Eigenspannungen.

Vollständig eigenspannungsfreie Festkörper existieren grundsätzlich nicht.

Eigenspannungen können jedoch nur in elastischen Werkstoffen auftreten. Sie sind stets eine Folge von ²inhomogener elastischer oder elastisch-plastischer Deformationen und nur dort aufzufinden, wo die Rückfederung einer Verformung behindert wird.

² inhomogen = aus dem lateinischen und bedeutet „nicht gleichmässig aufgebaut“

4.3 Entstehung von Eigenspannungen

[1] In der technischen Praxis treten als Folge verschiedener Herstellungs- und Behandlungsverfahren eine Vielzahl unterschiedlicher Eigenspannungszuständen auf. Es ist ein Bemühen erkennbar, die verschiedenen Eigenspannungsarten zu unterscheiden.

Früher hat man die Eigenspannungen gemäss der eigenspannungserzeugenden Prozesse unterteilt in: - Fügeigenspannungen

- Bearbeitungseigenspannungen
- Wärmebehandlungseigenspannungen
- Umformeigenspannungen
- Beschichtungseigenspannungen
- Giesseigenspannungen

Durch diese Verfahren werden verschiedene Eigenspannungsarten erzeugt. Die Einen können ganze Strukturen beeinflussen und andere wiederum nur Randzonen von Werkstücken. So können z.B. unterschiedliche Abkühlungsgeschwindigkeiten in einem gegossenen Bauteil dazu führen, dass durch die stärkere Schrumpfung des Randbereiches im Gegensatz zum Kernbereich, sich sehr hohe Eigenspannungen bilden. Diese können sich sogar durch plastische Verformungen bemerkbar machen. Ein Beispiel für das Beeinflussen von Randzonen gibt das vielfach angewandte Kugelstrahlverfahren (siehe 4.5). Hier werden gezielt Druckeigenspannungen auf der Randzone eines Bauteiles erzeugt. Diese Verfahren bleiben jedoch ohne Verformungen und spielen sich nur in der Randzone ab.

Betrachtet man allerdings, dass sich bei vielen eigenspannungserzeugenden Prozessen, mehrere dieser obengenannten Einflüsse überlagern, so ist die aufgeführte Unterteilung nicht geeignet. Beim Schleifen kann beispielsweise je nach Schleifbedingung der thermische oder mechanische Einfluss für die Ausbildung des Eigenspannungszustandes massgebend sein.

Zum besseren Verständnis soll nun eine Übersicht über die möglichen Entstehungsbedingungen von Eigenspannungen gemacht werden.

Eigenspannungen können entstehen durch:

- mechanische Einflüsse
- thermische Einflüsse
- Stoffeigenschaftsänderungen

4.3.1 Mechanische Einflüsse:

³Makroskopische Verformungen wie Biegen, Richten, Pressen, etc. verändern den Eigenspannungszustand. Stellt man sich z.B. eine dünne Welle vor, die sich durch eine von aussen eingebrachte Kraft verformt, so werden in das Bauteil Biegeeigenspannungen eingebracht.

Beim Bearbeiten von Oberflächen (z.B. beim Zerspanen oder beim Kugelstrahlen) ist die Eigenspannung in der Regel komplexen lokalen Lastspannungszuständen und

⁴Mikroverformungen unterworfen. Auch durch diese Einflüsse können

Eigenspannungen in der Bauteiloberfläche erzeugt oder verändert werden.

³ makroskopisch: vom griechischen makros=gross

⁴ mikroskopisch: vom griechischen mikro=klein

4.3.2 Thermische Einflüsse:

Unterschiedliche Abkühlungsgeschwindigkeiten bei der Erzeugung von Guss- oder Stangenmaterial irgendwelcher Form, können zu Wärmespannungen führen, da sich der Randbereich schneller abkühlt, als der innere Kernbereich. Hierzu gehören die Gussspannungen und die Schweissspannungen

4.3.3 Stoffeigenschaftsänderungen:

Stoffeigenschaftsänderungen sind natürlich nur durch thermische, mechanische oder chemische Einflüsse möglich. Zur Ausbildung von Eigenspannungen kann es bei Stoffeigenschaftsänderungen immer dann kommen, wenn sie einer Volumenänderung unterzogen sind. Der klassische Fall der eigenspannungserzeugenden Stoffeigenschaftsänderung ist die Phasenumwandlung im Stahl. Durch unterschiedliche spezifische Volumen zweier Phasen (^δα-Eisen, γ-Eisen) entstehen bei der Umwandlung Eigenspannungen. Typische Anwendung um Verspannungen in Gittern zu erzeugen, ist das Härten von Stahl.

4.4 Unterteilung von Eigenspannungen

[2] Heute werden die Eigenspannungen gemäss ihrer Ausdehnung im kristallinen Festkörper definiert. Hier ist zu bemerken, dass es verschiedene Arten von Eigenspannungen gibt, die nach der Grösse ihres Einflussbereiches in solche erster, zweiter und dritter Art zu unterteilen gilt.

4.4.1 Eigenspannungen 1. Art:

Eigenspannungen 1. Art sind über mehrere Werkstoffbereiche (mehrere Körner) nahezu homogen. Sie können sich über mehrere Querschnittsbereiche erstrecken, und werden z.B. durch Wärme-, Schrumpf- oder Kaltverformungen erzeugt. Alle Eigenspannungen 1. Art in einem Körper stehen miteinander im Gleichgewicht. Wird in das Gleichgewicht der Kräfte und Momente eingegriffen, so treten makroskopische Formänderungen auf.

4.4.2 Eigenspannungen 2. Art:

Eigenspannungen 2. Art sind über kleine Werkstoffbereiche (ein Korn oder Kornbereiche) nahezu homogen. Sie entstehen, da die einzelnen Kristallgitter je nach ihrer Orientierung unterschiedlich an der Gesamtverformung teilnehmen. Die Eigenspannungen 2. Art sind in kleinen Bereichen (hinreichend grosse Teile eines Kornes) miteinander im Gleichgewicht. Wird in das Gleichgewicht der Kräfte und Momente eingegriffen, so können makroskopische Formänderungen auftreten.

4.4.3 Eigenspannungen 3. Art

Eigenspannungen 3. Art sind über kleinste Werkstoffbereiche (mehrere Atomabstände) nahezu homogen. Diese Art von Eigenspannung entsteht durch z.B. Gitterfehler. Die Eigenspannungen 3. Art sind über hinreichend viele Körner miteinander im Gleichgewicht. Wird in das Gleichgewicht der Kräfte und Momente eingegriffen, so entstehen keine makroskopische Formänderungen.

⁵ α-Eisen, γ-Eisen siehe unter „Begriffe und Abkürzungen“

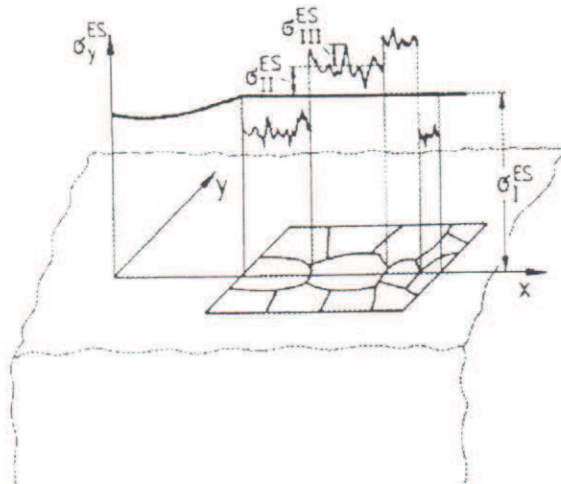


Abbildung 1: Schematische Verteilung der Eigenspannungen [1]

4.5 Auswirkung von Eigenspannungen

[2] Die Eigenspannungen in Werkstücken können sich je nach ihrer Verteilung und Grösse sowie nach dem Zweck des Konstruktionsteils günstig oder schädlich auswirken und auch ohne Bedeutung sein.

Günstig können sich z.B. Druckeigenspannungen an der Oberfläche von Werkstücken auswirken. Mittels geeigneten Verfahren (z.B. Kugelstrahlen), können in den äussersten Randzonen Druckeigenspannungen entstehen, welche eine Verbesserung der Schwingungsfestigkeit mit sich bringen.

Eigenspannungen können sich in statischer, dynamischer oder in korrosiver Umgebung auswirken.

4.5.1 Statische Beanspruchung

Durch die Überlagerung von Lastspannungen mit Eigenspannungen kann bei statischer Beanspruchung das Spannungsniveau an Bereichen mit hoher Zugeigenspannungen über einen kritischen Wert anwachsen. Die Reaktion des Bauteils ist vom Material und von dem sich ausbildendem Spannungszustand abhängig. Im idealen Fall kann sich das Material plastisch verformen. Dies führt zu einem Abbau der Zugeigenspannung im kritischen Bereich. Im schlechteren Fall ist eine plastische Verformung nicht möglich, und das Material wird dann lokal durch Rissbildung versagen.

4.5.2 Dynamische Beanspruchung

Unter dynamischer Beanspruchung wirken sich die Eigenspannungen mit den Lastspannungen direkt auf die Lebensdauer des Bauteiles aus. Treten bei der dynamischen Beanspruchung plastische Verformungen auf, so werden die Eigenspannungen durch plastische Deformation abgebaut und verlieren schliesslich ihren Einfluss auf die Lebensdauer. [5]

4.5.3 Korrosive Umgebung

In korrosiver Umgebung können Eigenspannungen ohne Lastspannungen ausreichen, um Spannungsrisskorrosion auszulösen. [2] Für das Auftreten von Spannungsrisskorrosion müssen drei Faktoren vorhanden sein:

- Kritische Zugspannungen, wobei es keine Rolle spielt, ob es sich um Last- oder Eigenspannungen handelt.
- Eine korrosive Umgebung, wobei unter Umständen schon hochreines Wasser korrosiv wirken kann.
- Gefüge welches bei gegebenem Spannungszustand und gegebener Umgebung anfällig auf Spannungsrisskorrosion ist.

4.6 Abbau von Eigenspannungen

Da sich Eigenspannungen in den meisten Fällen negativ oder schädlich auswirken, versucht man diese Erscheinung zu eliminieren. Das bekannteste Verfahren zum Vermindern von Eigenspannungen in stählernen Werkstoffen ist das Spannungsfreiglühen.

Beim Spannungsfreiglühen verfolgt man den Zweck, im Werkstück innere Spannungen durch Einbringen von Wärme, abzubauen. Die bei einer bestimmten Temperatur vorhandenen Eigenspannungen können nicht höher als die Fließgrenze eines Werkstoffes sein. Mit steigender Temperatur sinkt die Fließgrenze. Beim Spannungsfreiglühen werden die Eigenspannungen auf den Betrag der Fließgrenze bei der eingestellten Glüh Temperatur, durch plastisches Verformen abgebaut. Bei Stahl erfolgt das Glühen bei etwa 650°C mit anschliessendem langsamen Abkühlen zum Abbau innerer Spannungen, ohne wesentliche Änderung der vorliegenden Eigenschaften.

Ein anderer Weg, Eigenspannungen zu vermindern, besteht darin, Querschnitte und Oberflächen von Werkstücken plastisch zu verformen. Dies kann mittels normaler Bearbeitungsverfahren geschehen. Besonders wirksam sind dabei die Oberflächenumformverfahren wie z.B. das Glattwalzen, Richten oder wie bereits erwähnt das Kugelstrahlen. Dadurch gelingt es sogar, einen ungünstigen Eigenspannungszustand an der Oberfläche in einen günstigeren zu verwandeln. Eine Möglichkeit Schweißseigenspannungen herabzusetzen, bietet das Hämmern der Schweißnaht. Die beim Hämmern hervorgerufene plastische Verformung der Schweißzone bewirkt Schweißspannungsverminderung von 40-50%. [5]

Vereinzelte findet man aber auch noch andere Verfahren angewendet, von denen behauptet wird, sie vermindern die Eigenspannungen oder bauen sie völlig ab. Hierzu gehören das längere Lagern im Freien und das Vibrieren von Werkstücken. Auf das Vibrationsverfahren zur Verminderung der Eigenspannungen wird im Kapitel 6 ausführlich eingegangen.

5 Bestimmung von Eigenspannungen

Die Bewertung von Eigenspannungen ist von grosser Bedeutung für Qualitätssicherung, Festigkeits- und Schadenanalyse. In vielen Fällen ist es praktisch nicht möglich, ausreichende Kenntnisse über die Verteilung und Höhe der Eigenspannungen zu erhalten.

Es existiert eine Grosse Zahl von Möglichkeiten, Eigenspannungen experimentell oder theoretisch zu ermitteln. Die experimentellen Verfahren kann man in zerstörungsfreie, teilzerstörend und zerstörende unterteilen.

Mit den wichtigsten heute eingeführten Eigenspannungsmessverfahren, werden vorwiegend Eigenspannungen 1. Art erfasst. Die bekanntesten und wohl auch die am meisten angewendeten Eigenspannungsmessverfahren sind die ⁶diffraktometrischen und die mechanischen Verfahren. Die Eigenspannungsermittlung nach mechanischen und diffraktometrischen Verfahren geht von den zugeordneten Verformungen aus. Mit bestimmten Werkstoffkennwerten lassen sich anhand von Dehnungen und Verformungen die Eigenspannungen bestimmen.

Bei den zerstörenden bzw. teilzerstörenden mechanischen Verfahren werden die makroskopischen Massänderungen meistens mit Dehnmesstreifen erfasst. Bei der röntgenographischen Eigenspannungsermittlung werden Kristallgitterdehnungen der Körner gemessen. Charakteristisch für die röntgenografische Ermittlung ist, dass nur dünne Oberflächenschichten erfasst werden. Eine röntgenografische Ermittlung der Tiefenverteilung ist deshalb nur in Kombination mit mechanischen Verfahren möglich.

In den folgenden Kapiteln werden nun die wichtigsten Verfahren der zerstörungsfreien sowie der zerstörenden Eigenspannungsmessungen vorgestellt. Es wird gezeigt, dass bestimmte physikalische Werkstoffeigenschaften zum Nachweis von Eigenspannungen genutzt werden können.

Grobe Aufteilung der Verfahren:

Vollständig zerstörende Verfahren:	<ul style="list-style-type: none">• Zerlegeverfahren• Ausbohr- und Abdrehverfahren• Abtrageverfahren• Schlitzverfahren
Teilweise zerstörende Verfahren:	<ul style="list-style-type: none">• Bohrlochverfahren• Rinkernverfahren
Zerstörungsfreie Verfahren:	<ul style="list-style-type: none">• Diffraktomie (Beugungsverfahren)• Ultraschallverfahren• Magnetische Verfahren

Verfahren zur Eigenspannungsermittlung [6]

⁶ Diffraction: Beugung von Lichtwellen und anderer Wellen

5.1 Zerlegeverfahren

Unter dem Verfahren zur Ermittlung von makroskopischen Eigenspannungen sind die Zerlegeverfahren in der mathematischen Beschreibung am einfachsten. Im allgemeinen verfährt man so, dass auf der Werkstückoberfläche eine Messtelle durch Ausschneiden aus dem Prüfkörper herausgetrennt oder das Prüfstück vollkommen in kleine Einzelteile zerlegt wird. Aus der Rückfederung wird mit Hilfe des Hookschen Gesetzes auf die Normaleigenspannungen an der Schnittfläche geschlossen. Bei heutiger Anwendung werden zur Ermittlung der Rückverformung nach dem Zerlegen fast ausschliesslich Dehnungsmessstreifen verwendet.

⁷ Hooksches Gesetz: $\sigma = \varepsilon * E$

Bei vielen Werkstoffen ist die Dehnung ε mit der Spannung σ im gleichen Verhältnis (proportional). Bei doppelter Spannung zeigt sich die doppelte Dehnung. Es gilt dann das Hooksche Gesetz. Dabei ist aber noch zu erwähnen, dass das Hooksche Gesetz nur im elastischen Bereich des Spannungs-Dehnungs-Diagramm angewandt werden darf.

Verfahrenstechnik und -grenzen

Bei den Zerlegeverfahren handelt es sich um ein zerstörendes Verfahren. Es wird meist bei Teilen komplizierter Form angewendet, wo einfache Beziehungen zwischen Spannungen und Dehnungen unter Berücksichtigung der Bauteilform nicht existieren. Es ist prinzipiell nur für Eigenspannungszustände an der Oberfläche geeignet, da im Innern der Bauteile keine Messelemente anzubringen sind. (Ausnahmen: Eingiessen, z.B bei Beton)

Ein nicht zu unterschätzender Unsicherheitsfaktor bei allen zerstörenden und teilweise zerstörenden Verfahren liegt aber darin, dass plastische Verformungen während der Zerlegeoperation nicht ausgeschlossen werden können. Dies kann bei der Eigenspannungsanalyse die Messergebnisse verfälschen.

Folgende Punkte sind beim Zerlegeverfahren zu beachten:

- Bearbeitungseigenspannungen durch das Zerlegen (Sägen, Fräsen, Schleifen usw.) müssen möglichst gering gehalten werden.
- Eine Eigenspannungsmessung nach dem Zerlegeverfahren liefert Eigenspannungswerte für die Oberfläche des Bauteils. Diese können durch benachbarte Spannungszustände beeinflusst werden kann, falls die zu messende Stelle nicht vollständig aus dem Prüfstück herausgetrennt wird.

5.2 Ausbohr- und Abdrehverfahren

Löst man von einem rotationssymmetrischen, mit Eigenspannungen behafteten Körper aussen oder innen ein Element ab, dann ändert sich der Spannungszustand am Reststück, so dass ein neues Gleichgewicht entsteht. Bei einem Ring wird an der äusseren Mantelfläche die Entspannung, die durch sukzessives Abtragen des Innenkreisdurchmessers stattfindet, mit Dehnungsmessstreifen gemessen. Analog ist auch ein schichtweises Abtragen von der äusseren Mantelfläche mit Dehnungsmessstreifen an der Innenfläche möglich.

⁷ Hooksches Gesetz siehe unter „Begriffe und Abkürzungen“

Verfahrenstechnik und -grenzen

Die Ausbohr- und Abdrehverfahren werden, entweder einzeln oder kombiniert, bei zylindrischen Körpern mit kreisförmigem Querschnitt eingesetzt, wie z.B. Scheiben, Voll- und Hohlwellen, Rohren und Stangen. Bringt man Dehnungsmessstreifen längs den Mantellinien an, so lässt sich auch eine Tendenz der Längsverteilung ermitteln, ebenso kann eine Verteilungsschwankung über den Umfang bestimmt werden. Der Nachteil bei diesem Verfahren ist, dass Bauteile oft nicht die geforderte einfache Form haben, sondern auch zusätzliche Bohrungen, Nuten, Kerben und Querschnittübergänge aufweisen.

Folgende Punkte sind beim Ausbohr- und Abdrehverfahren zu beachten:

- Bearbeitungseigenstressungen müssen möglichst gering gehalten werden.
- Es muss an mehreren Stellen gemessen werden.
- Die Stufen, und damit die Anzahl der Messpunkte, bei der Zerspanung müssen möglichst optimal gewählt werden.
- Auf einen Temperatúrausgleich nach dem Zerspanen ist zu achten.

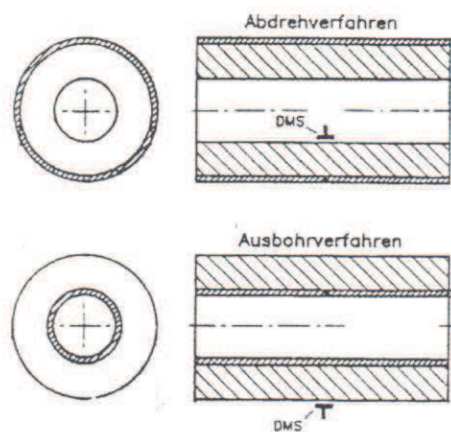


Abbildung 2: Ausbohr- und Abdrehverfahren [6]

5.3 Zerschneide- und Abtrageverfahren

Beim Abtrageverfahren werden sukzessive dünne Schichten von der Probe abgetragen. Je nach Eigenspannungszustand in der abgetragenen Schicht verformt sich das Bauteil als Reaktion auf die Abtragung dieser verspannten Schicht. Aus dieser Verformung wird dann auf den Eigenspannungszustand geschlossen.

Als Messgrösse gehen in die Auswertung die jeweilige Rückverformung und die dazugehörige Restdicke der Probe ein.

Verfahrenstechnik und -grenzen

Der Schichtabtrag beim Abtrageverfahren geschieht durch:

- Fräsen
- Schleifen
- Ätzen

Es handelt sich hier um jeweils sehr dünne Schichten die abgetragen werden. Die durch das Trennen oder Umlagern der Eigenspannungen entstehenden Verformungen werden mittels Dehnungsmessstreifen bestimmt.
Bei der Dehnungsmessung kann als Anwendungsgrenze folgendes angegeben werden. Die Ausgangsdicke „d“ des Bauteils muss im Bereich $d > 2\text{mm}$ liegen [6].

5.4 Schlitzverfahren

Beim Schlitzverfahren werden die Eigenspannungen bei Vollscheiben und Ringen durch Aufschlitzen ausgelöst. Durch dieses Vorgehen werden die aktuellen Eigenspannungsverläufe unterbrochen. Mit Dehnungsmessstreifen wird dann die Verformung an der Schlitz gegenüberliegenden Seite gemessen, oder mittels Schieblehre die Aufklaffung des Schlitzes, woraus man die Biegespannungen in Umfangsrichtung berechnen kann.

Verfahrenstechnik und -grenzen

Das Aufschlitzen kann durch folgende Bearbeitungen erfolgen:

- Sägen
- Fräsen
- Trennschleifen
- Erodieren
- Brennschneiden

Das Schlitzverfahren wird zur Bestimmung von Umfangseigenspannungen, meist nur bei Vollscheiben oder Ringen, verwendet.

Als Verfahrensgrenze kann man angeben:

- Falls keine Dehnungsmessungen möglich ist muss messtechnisch eine Aufklaffung sicher zu messen sein.
- Die Annahme linearer Biegeverteilung muss bei der Aufklaffungsmessung hinreichend erfüllt sein.

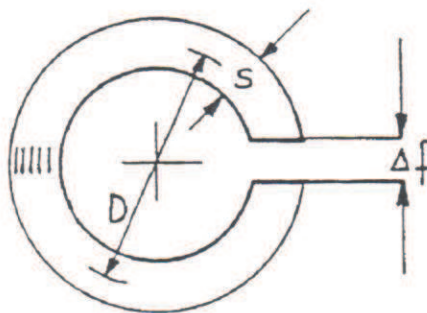


Abbildung 3: Schlitzverfahren [6]

5.5 Bohrlochverfahren

Die Bohrlochmethode gehört zu den „Halb-zerstörenden“ Verfahren, und ist das am meisten angewendete mechanische Prinzip der Eigenspannungsmessung. Zur lokalen Entspannung der Eigenspannung wird an den interessierten Stellen der Oberfläche durch Bohren ein Sackloch gemacht. Die aus Spannungsumlagerung resultierenden Oberflächenverformungen werden mittels Dehnungsmessstreifen in mehreren Richtungen gemessen, um einen zwei axialen Spannungszustand vollständig beschreiben zu können. (Abbildung 4).

- Vorteile:
- Relativ einfache, einzig genormte Methode
 - Lokale Messung mit guter räumlicher Auflösung
- Nachteile:
- Messung nur an der Oberfläche möglich

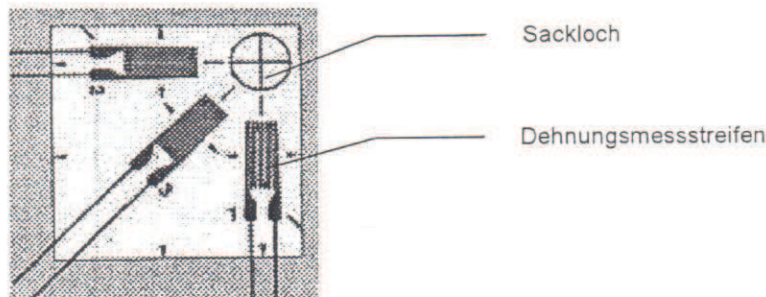


Abbildung 4: Messanordnung bei der Bohrlochmethode

5.6 Ring-Kern-Verfahren

Dieses Verfahren der lokalen Eigenspannungsmessung, weist gewisse Ähnlichkeit mit dem Bohrlochverfahren auf. Anstelle eines Loches wird hier jedoch mittels eines entsprechenden speziellen Fräasers ein kreisförmiger Einschnitt erzeugt. Die Oberfläche innerhalb des Kreises wird praktisch vollständig entspannt und kann mittels Dehnungsmessstreifen aufgenommen werden. Die Dehnungsauslösung wird auch hier in drei Richtungen gemessen, um einen zwei axialen Spannungszustand vollständig beschreiben zu können.

- Vorteile:
- geringerer Eingriff als beim Bohrlochverfahren
 - Praktisch vollständige Entspannung
- Nachteile:
- Bohrung und Messung recht aufwendig (Spezialwerkzeuge)

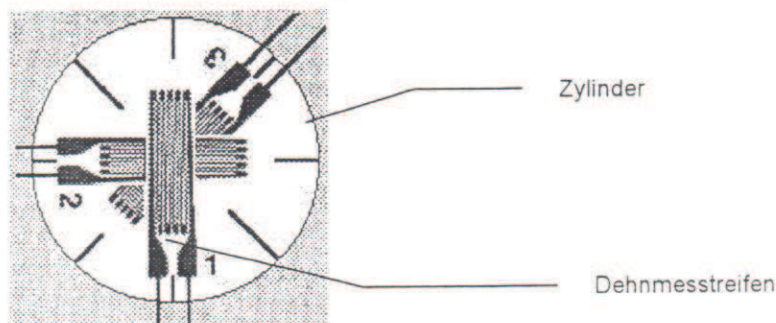


Abbildung 5: Messanordnung bei der Ring-Kern-Methode

5.7 Beugungsverfahren zur Bestimmung von Eigenspannungen

Eigenspannungsbedingte Formänderungen in mikroskopischen Bereichen haben eine Vielzahl sehr unterschiedlicher Konsequenzen. Darauf beruhen mehrere Methoden der Eigenspannungsmessungsanalyse.

Auf der direkten Messung dieser Formänderungen als Gitterdehnungen beruhen die Beugungsverfahren, die überwiegend mit Röntgenstrahlen sowie in jüngster Zeit zunehmend auch mit Neutronen arbeiten. Eigenspannungsanalyse mit Hilfe von Neutronen, basieren praktisch auf den gleichen Grundprinzipien wie die mit Röntgenstrahlen.

5.7.1 Röntgenographische Spannungsanalyse

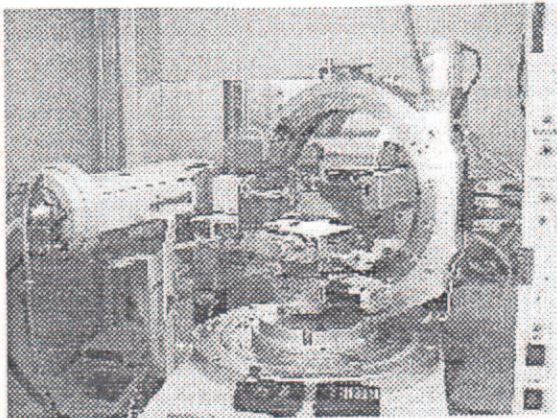


Abbildung 6: Röntgen-Diffraktometer

Das Verfahren der röntgenographische Spannungsanalyse wird seit etwa 50 Jahren angewandt. Geräte sind heute in grosser Vielfalt und Ausstattungen kommerziell verfügbar. Das Prinzip erlaubt aufschlussreiche Analysen, wie Werkstoff- bzw. Bauteileigenschaften (Zusammensetzung, Textur, Versetzungsdichte, Kristallgrösse). Die röntgenographische Spannungsmessung beruht auf der Messung der Änderung der Netzebenenabstände, die durch die Spannungen beeinflusst werden.

Als Gitterdehnungen werden die Dehnungen genannt, bei denen die periodisch im Gitter auftretenden Atomabstände als Messindikatoren herangezogen werden. Diese periodisch im Gitter auftretende Atomabstände sind für das jeweilige Gitter und damit für die Werkstoffart charakteristisch.

Je nach Werkstoff und gewünschter Eindringtiefe, kann die Röntgenstrahlung durch das auswechseln der Röntgenröhre variiert werden. Mit dieser Massnahme erhält man verschiedene aber für die jeweilige Röntgenröhre spezifische Wellenlänge der Röntgenstrahlung. Genutzt werden Wellenlängen von etwa $0.7 \cdot 10^{-10} \text{m}$ bis $2.3 \cdot 10^{-10} \text{m}$. Die Strahlungsintensität nimmt entlang des Weges durch das untersuchte Material exponentiell ab. Typische Eindringtiefen bei Spannungsmessungen an Metallen liegen im Bereich von wenigen μm bis zu einigen $10 \mu\text{m}$.

Für eine detaillierte Angabe über das Messprinzip und die dazugehörigen Formel wird auf [4] und [6] verwiesen.

- Vorteile:
- Werkstoff- bzw. Bauteileigenschaften können ermittelt werden
 - zerstörungsfrei
- Nachteile:
- teure Verfahren
 - Röntgenstrahlung \Rightarrow Strahlenschutz
 - nur kristalline Werkstoffe messbar. Kunststoffe, Glas etc. sind nicht messbar.