

### 5.7.2 Eigenspannungsanalyse mittels Neutronen

Der Hauptvorteil der Neutronendiffraktomie verglichen mit dem Röntgenverfahren, ist die wesentlich tiefere Eindringtiefe der Strahlung ins Prüfstück. Hieraus ergibt sich die Möglichkeit, Volumeneigenspannungen zu messen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, die Wellenlänge kontinuierlich zu verstellen.

Bei dem auf Röntgenstrahlen basierenden Verfahren können nur die Randschichten eines Werkstoffes untersucht werden. Mit dem Neutronenstrahl, können hingegen auch Eigenspannungsverteilungen bis einige Zentimeter Tiefe im Innern des Werkstoffes betrachtet werden [4].

### 5.8 Ultraschallverfahren

[2] Seit Beginn der 50er Jahre ist es bekannt, dass mechanische Spannungen, seien es Last- und/oder Eigenspannungen, die elastischen Werkstoffeigenschaften und somit die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen beeinflussen. Das Ultraschallverfahren ist neben der Spannungsanalyse mit dem aufwendigen Neutronenbeugungsverfahren das einzige, das auch Volumeneigenspannungen zerstörungsfrei zu vermessen vermag. Trotzdem scheiterte die praktische Anwendung bis etwa Mitte der 70er Jahren an den notwendigen genauen Geschwindigkeitmessungen des Schalles.

Das ganze Verfahren beruht auf den Änderungen der elastischen Gittereigenschaften, die mit dem Auftreten von Gitterdehnungen verknüpft sind. Aus diesem Grunde können Schallgeschwindigkeitsmessungen zur Ermittlung der vorliegenden Spannungszuständen herangezogen werden.

Ultraschallmessungen sind, wenn entsprechende Geräte zur Messung und Auswertung zur Verfügung stehen, problemlos und mit geringem Zeitaufwand sowohl im Labor als auch ausserhalb durchzuführen.

### 5.9 Magnetische Verfahren

Dehnungs- und Spannungsänderungen verursachen bei den meisten ferromagnetischen Werkstoffen eine Veränderung der Magnetischen Bereichsstruktur. Dazu werden als Messgrössen Hysteresisschleifen herangezogen, die in unterschiedlicher Weise durch die vorliegende Spannungsfelder beeinflusst werden. Die Messung ist vollkommen zerstörungsfrei und mit sehr geringem Zeitaufwand durchführbar. Es existieren Gerätetypen, die sich bei Kontrollmessungen im Rahmen von Qualitätssicherungsaufgaben im industriellen Einsatz bewährt haben. Bei praktischen Messungen liegen die Messtiefen bei Stahl zwischen 0.01mm bis 1.5mm.

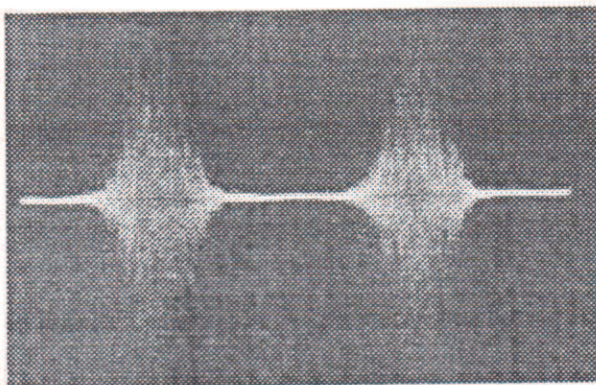


Abbildung 7: Auswertungsbild eines magnetischen Verfahrens

### 5.10 Spannungsoptische Verfahren:

Spannungsoptische Analysen werden insbesondere an komplizierten geformten Bauteilen angewandt. Sie beruhen auf der optischen <sup>8</sup>Doppelbrechung, die bei bestimmten Stoffen, wie z.B. Glas oder einigen Kunststoffen, auftritt, sobald sie mechanisch belastet werden. Zur Eigenspannungsanalyse müssen eigenspannungsbehaftete Modelle aus spannungsdoppelbrechendem Material hergestellt werden. Anhand der simulierten Spannungsbilder auf den Modellen, lassen sich dann mehr oder weniger genaue Aussagen über den Eigenspannungsverlauf im realen Bauteil machen. Dieses Verfahren findet deshalb nur begrenzte Anwendung, da die Übertragung der an Modellwerkstoffen gewonnenen Resultate auf reale Bauteile oft auf Schwierigkeiten stösst.

### 5.11 Finite-Elemente-Methode:

Nicht unerwähnt bleiben sollte die in der letzten Zeit besonders erfolgreiche Entwicklung rechnergestützter Verfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen. Es existiert inzwischen eine grössere Anzahl von Finite-Elemente-Verfahren zur Eigenspannungsanalyse auf den Gebieten des Wärmebehandelns, Fügens, Umformens und Bearbeiten. Sie ermöglichen das detaillierte Studieren von Vorgängen, die bisher keiner Bewertung zugänglich waren. Mittels diesen rechnergestützten Programmen können verschiedene Einflussparameter getrennt voneinander hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Eigenspannungsbildung betrachtet werden. Probleme existieren immer noch bei der exakten Modellierung der Einzelvorgänge, wobei häufig die für die Rechnung benötigten Eingabedateien nicht oder nur ungenügend bekannt sind.

### 5.12 Kurzer Rückblick

Methode	Messparameter	ermittelte Eigenspannungsarten	Messtiefe/ Eindringtiefe
Mechanisch	auftretenden Verformungen	1. Art	vom Zerstörungsgrad abhängig
Röntgenographisch	Gitterspannungen	1. Art und 2. Art	µm-Bereich
Neutronen-Diffraktion	Gitterspannungen	1. Art, 2. Und 3. Art	cm-Bereich
Ultraschall	Zeitmessung von Ultraschallwellen	1. Art, 2. Und 3. Art	beliebige Tiefe
Magnetisch	Mittels Hysteresisschleifen	1. Art, 2. Art und 3. Art	mm-Bereich

Abbildung 8: Eigenspannungsmessungen mit charakteristischen Merkmalen [4]

<sup>8</sup> Doppelbrechung siehe unter „Begriffe und Abkürzungen“

## 6 Vibrationsentspannen

Anfang der 60er Jahre trat die Frage nach Ersatz des Spannungsarmglühens durch Rütteln und subresonantes Vibrieren stärker ins Bewusstsein, da seit Mitte der 50er Jahre sogenannte Rüttelgeräte vertrieben wurden, die zu einem weitgehenden Abbau von Eigenspannungen führen sollten.

Heute vertreiben inzwischen mehrere Hersteller solche Vibrationsanlagen, und werben mit verlockenden Sprüchen wie:

- teures Spannungsfreiglühen nicht mehr nötig
- entspricht, oder verbessert die thermische Behandlung
- kurze Behandlungszeiten (ca. 30Minuten)  $\Rightarrow$  kürzere Durchlaufzeiten
- kostenkünstiges Verfahren
- technisch und wissenschaftlich geprüft und nachgewiesen!!!!

Da dieser Abbau von Eigenspannungen von verschiedenen Seiten wohl behauptet, aber nie ausreichend bewiesen wurde, bestand nun das Ziel anhand der Fachliteratur zu untersuchen, ob diese Vibrationsverfahren auch wirklich halten was sie versprechen. Dazu sollen auch die Eignung sowie die Nutzungsgrenzen dieses Verfahrens zusammengetragen werden.

### 6.1 Erkenntnisse aus der Fachliteratur

Systematische Untersuchungen von Bühler und Pfalzgraf [5] konnten den versprochenen Effekt des Spannungsabbaues nur bedingt bestätigen. Sie erwähnten z.B.: „Für das Rütteln von Schweisskonstruktionen folgt, dass ebenso wie bei Grauguss ein Abbau von Eigenspannungen an einzelnen Stellen zwar grundsätzlich möglich ist, aber nur in besonders gelagerten Ausnahmefällen bei einer gegebenen Konstruktion die nötigen Beanspruchungen erzielt werden können.“

R. Dawson und G. Moffat [11] bestätigten diese Aussage. Sie zeigten (Abbildung 9), dass erst durch eine spezielle Lagerung des Bauteiles und durch das Einbringen hoher Beanspruchungen, ein teilweiser Abbau von Eigenspannungen stattfinden kann.

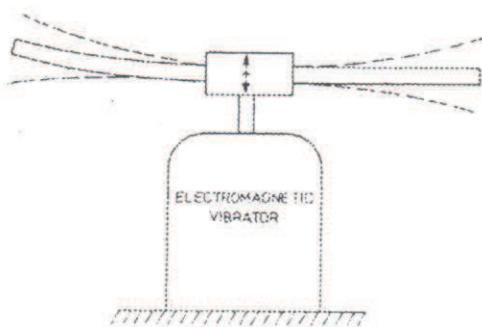


Abbildung 9: elektromagnetischer Vibrator für Testversuche [11]

Es zeigte sich auch, dass die Verminderung der Eigenspannung nicht gleichmässig vor sich ging, sondern an Querschnitten mit grösseren Eigenspannungen mehr ausmachte als an anderen Stellen.

Die gleiche Haltung wurde Jahre später von Herrn Zeig eingenommen [1aus10]. Er dokumentiert, dass es an Teilen, die komplizierte, mehrachsige Spannungszustände aufweisen, kaum möglich ist, durch das gewöhnliche Vibrieren genug Energie in die Struktur einzubringen, um alle Spannungen zu

lösen. Herr Zeig wurde in der Zusammenfassung seiner Arbeit noch deutlicher und äusserte sich folgendermassen: „Die Versuche haben gezeigt, warum das Vibrationsverfahren das Spannungsarmglühen an kompliziert gestalteten Maschinenbauteilen keineswegs ersetzen kann“. Es wurde weiter darauf hingewiesen, dass sich beim Vibrieren in der Resonanz grössere Spannungsamplituden aufbringen

lassen, dass sich dies aber aus Gründen der Gefahr von Dauerbrüchen nicht eignet. Untersuchungen im Ostblock an Aluminiumringen bestätigten diese Aussage [2 aus10]. Sie zeigten, dass der Schwingungsamplitude eine überragende Bedeutung zukommt, und dass sich die notwendige Energie, für einen kleinen Eigenspannungsabbau, praktisch nur durch Schwingen im Resonanzbereich erzeugen lässt. Auch McGoldrick und Saunders [1 aus 11] erwähnten, dass für einen Eigenspannungsabbau, der Resonanzbereich ausgenutzt werden muss.

Weitere russische Untersuchungen von Herrn Adoyan [3 aus10], ermittelten kritische Mindestbeanspruchungen für einen Eigenspannungsabbau und brachten diese mit dem <sup>9</sup>Smith-Diagramm in Verbindung. Daraus ergaben sich zwei Bereiche: einer, in dem ein Eigenspannungsabbau möglich sein soll, und ein anderer, in dem mit Dauerbrüchen während der Vibrationsbehandlung gerechnet werden muss. In diesem Bericht werden aber zum Erzielen von kleinen Eigenspannungsänderungen immerhin noch Stunden genannt.

Bühler und Pfalzgraf [5] machten die gleiche Feststellung und erwähnen: „ Die Zugeigenspannungen vermindern sich bei einer Zugschwellbeanspruchung in der Grössenordnung vom 0.7fachen Betrag der Zugschwellfestigkeit in der Weise, dass sie erst bei etwa 624'000 Lastspielen einen deutlichen Abfall erkennen lässt.“

Untersuchungen von Woznay und Crawler [2 aus 11] zeigten, dass Eigenspannungen durch Wechselbeanspruchungen verändert werden können, dass dazu aber die Fließgrenze überschritten werden muss.

Aus diesen Untersuchungen ist ersichtlich, dass für einen eindeutigen Eigenspannungsabbau, sehr hohe Schwingungsbeanspruchungen und lange Vibrationszeiten erforderlich sind.

Herr Gnirss [10] erwähnt: „Ein Versuch Eigenspannungen abzubauen, die durch Einschweissen eines Bleches in einen Rahmen entstanden waren, schlug fehl. Das vom Hersteller des Vibrators versprochene Ergebnis, nämlich ein Eigenspannungsabbau innerhalb von 10 min, trat selbst bei Vibrieren bei Resonanzfrequenz an der gewählten Messtelle nicht ein.“

Das Schweißeseigenspannungen allerdings grundsätzlich abbaubar sind, zeigten Bühler und Pfalzgraf [5]. Sie konnten nach einem längeren Vibrationsversuch im Resonanzbereich einen Eigenspannungsabbau feststellen. Laut Herstellern der Vibrationsanlagen, kann das Verfahren sogar erfolgreich während des Schweißens eingesetzt werden. Dies ist sicherlich korrekt und lässt sich aber durch die grössere Beweglichkeit der Gitterstrukturen bei höheren Temperaturen während des Schweißens einfach erklären.

Ebenfalls auf Schweißverbindungen hat sich S. Weiss [4 aus10] konzentriert. Seine Untersuchungen mit auf Bleche gelegten kreisförmigen Nähten ergaben beim Vibrieren in der Resonanz bei hohen Spannungsamplituden, die über Dehnmesstreifen verfolgt wurden, ebenfalls eine deutliche Änderung der Radial- und Axialeigenspannungen. Allerdings waren vor dem Vibrieren die Eigenspannungen bereits in der Höhe der <sup>10</sup>Streckgrenze und die Schwingungsamplituden lagen zwischen 50% und 100% des <sup>11</sup>R<sub>p0.2</sub> Wertes.

Untersuchungen von Davson und Moffat [11], beschäftigten sich nicht mit Schweißeseigenspannungen sondern mit Eigenspannungen die durch das Biegen von Blechstreifen erzeugt wurden. Sie fanden aber ebenfalls einen Amplitudenschwellwert, der für einen Abbau von Eigenspannungen überschritten werden muss. Für einen nahezu vollkommenen Eigenspannungsabbau waren Amplituden in der Höhe von  $0.8 \cdot R_{p0.2}$  erforderlich.

Von Bedeutung ist auch, dass der Eigenspannungsabbau nicht gleichmässig über den ganzen Querschnitt wie bei einer Glühbehandlung stattfindet. Er betrifft vielmehr in

<sup>9</sup> Smith-Diagramm siehe unter „Begriffe und Abkürzungen“

<sup>10</sup> Streckgrenze siehe unter „Begriffe und Abkürzungen“

<sup>11</sup> R<sub>p0.2</sub> siehe unter „Begriffe und Abkürzungen“

erster Linie die Eigenspannungen, die in ihrer Richtung mit den Belastungsspannungen übereinstimmen, und wirkt sich auf die grossen mehr als auf die kleinen aus. R. Dawsom und G. Moffat [11] erwähnen sogar, dass mit dem herkömmlichen vibrieren nur sehr kleine Effekte des Eigenspannungsabbau festzustellen sind. Ein völliger Eigenspannungsabbau ist demzufolge nicht erreichbar.

## 6.2 physikalischer Vorgang beim Abbau von Eigenspannungen

Von besonderer Bedeutung für das gestellte Thema ist die Tatsache, dass Eigenspannungen durch statische und dynamische Beanspruchung abgebaut werden können. Nach früheren Untersuchungen lassen sich Eigenspannungen bei plastisch verformbaren Werkstoffen mittels statischer Zug- oder Druckspannungen weitgehend vermindern.

Im Bereich der <sup>12</sup>Dehngrenze, mit 0.005% bleibender Dehnung, zeigt sich ein steiler Eigenspannungsabfall [5]. Die Ursache für diesen Eigenspannungsabbau ist in den kleinen plastischen Verformungen zu sehen, die bei Biege- und Torsionsschwingbeanspruchung vornehmlich in den am meisten beanspruchten äussersten Randzonen stattfinden. Plastische Verformungen im Mikrobereich einzelner Kristalle treten nämlich schon bei Beanspruchung unter der <sup>13</sup>Fliessgrenze auf. Eine weitere Theorie wird von Kelsko [5 aus 10] vertreten. Seiner Meinung nach werden die Fehlerordnungen in den Gittern- oder Zwischengitteratome durch eine Zusatzenergie in einen stabilen Zustand versetzt, was einer Änderung des Eigenspannungszustandes gleichkommt.

Ein weiterer Erklärungsversuch von Pusch [6 aus 10] weist dabei auf die Abnahme der Dämpfung während des Vibrationsentspannen hin und wertet dies als Zeichen für einen Spannungsabbau in Form der Auslöschung von Vernetzungen. Dies soll sich in einer Abnahme des Motorstroms von Vibrationsgeräten dokumentieren lassen, somit also eine Aussage über die Effektivität der Behandlung ermöglichen.

Die meist verbreitete Meinung beruht jedoch auf der Annahme, dass Eigenspannungen und Vibrationsspannungen zusammen die Fliessgrenze überschreiten und damit eine plastische Deformation mit Eigenspannungsabbau eintritt.

Wie man leicht erkennen kann, sind sich die Fachleute über die Ursachen des Eigenspannungsabbau nicht einig, dies lässt sich aber auch damit begründen, dass noch kein geeignetes Verfahren für eine komplette Eigenspannungsbestimmung existiert.

<sup>12</sup> Dehngrenze siehe unter „Begriffe und Abkürzungen“

<sup>13</sup> Fliessgrenze siehe unter „Begriffe und Abkürzungen „

### 6.3 Zusammenfassung der Fachliteratur

Das eigentliche Ziel der Recherche bestand darin, erste Informationen über die Eignung und den Nutzungsgrenzen zusammenzutragen, sowie ausfindig zu machen, welche Bauteile für dieses Verfahren in Frage kommen. Aus der Literatur ist aber nicht klar ersichtlich, wie, wo und wann das Vibrationsentspannen eingesetzt werden kann. Es ist jedoch deutlich erkennbar, dass sich schon einige Fachleute mit diesem Thema befasst, und den Vibrationsprozess immer wieder von neuem untersucht haben. Dabei wurden viele Versuche durchgeführt und ablehnende wie aber auch optimistische Ergebnisse erzielt.

Aus heutiger Sicht lässt sich folgendes aussagen:

- Wenn eine Reduzierung des Eigenspannungsniveaus erwünscht ist, sind Mindestwerte der Spannungsamplituden bei der Vibrationsentspannung erforderlich.
- Der gesamte Eigenspannungszustand eines Bauteiles, sollte im voraus bekannt sein, da die Richtung der eingebrachten Belastungsspannungen mit der Hauptrichtung der Eigenspannung übereinstimmen muss. Dies ist aber in den meisten Fällen nicht möglich, da der ganze Eigenspannungszustand eines Bauteiles aus messtechnischen Gründen nicht erfassbar ist.
- Einziger erkennbarer Nutzen, kann die punktuelle Entspannung an Schweissnähten sein.
- Die Fachliteratur zeigt deutlich, dass selbst bei einfachen Versuchsstücken und bei sehr hohen Beanspruchungen kein totaler Eigenspannungsabbau erreicht werden kann.

#### 6.4 Recherche der Fachliteratur

Um an Fachliteratur zu gelangen, wurden in verschiedenen elektronischen Datenbanken im In-/ Ausland via Internet recherchiert. In folgenden Organisationen wurde nachgeforscht:

Organisation / Datenbank	Internet-Adressen
ETH-Bibliothek	<a href="http://www.ethbib.ethz.ch/">www.ethbib.ethz.ch/</a>
Datenbank der Hochschule in Aachen	<a href="http://www.bth.rwth-aachen.de/">www.bth.rwth-aachen.de/</a>
Cordis-Datenbank	<a href="http://www.dbs.cordis.lu/">www.dbs.cordis.lu/</a>
BSZ (Bibliothekservice Zentrum Baden Württemberg)	<a href="http://www.bsz-bw.de/cgi-bin/">www.bsz-bw.de/cgi-bin/</a>
FIZ (Fachinformationszentrum Technik)	<a href="http://www.fiz-technik.de">www.fiz-technik.de</a>

Die Datenbanken sind so aufgebaut, dass man durch verschiedene Beschreibungen und Schlüsselwörter, einen Suchbereich definieren kann. Nach diesen Beschreibungen wird die Datenbank durchsucht, und gibt eine Liste der vorhandenen Literatur aus. Ist die gewünschte Suche zu ungenau, kann mittels weiteren Suchoptionen die Recherche verfeinert werden.

Einige dieser Datenbanken besitzen die aufgelisteten Titel an Fachliteratur im Hause, und können direkt bestellt werden. Andere verweisen auf Fachbibliotheken, bei denen man auf dem Weg des internationalen Leihverkehrs die gewählte Fachliteratur bestellen kann. Nach dem Ausfindig machen der Fachliteratur musste diese noch bestellt werden. Die gewünschte Fachliteratur konnte nicht über die ETH-Bibliothek angefordert werden, da sie wegen einer Neueinführung eines Computersystems in der Kalenderwoche 36 und Anfang Kalenderwoche 37 geschlossen blieb. Aus diesem Grunde musste die Fachliteratur in Deutschland bestellt werden. Einige Bücher sowie Zeitschriftenaufsätze sind in englischer Sprache verfasst, und erfordern für das Studium mehr Aufwand als für die deutschsprachige Literatur.

## 7 Praktische Messungen

Um praktische Messungen durchführen zu können, mussten zuerst Bauteile definiert werden, die für einen solchen Versuch geeignet sind. Mittels PPS-System und Absprachen mit den verschiedenen Inselleitern und Arbeitsvorbereitern der Firma Bruderer, konnte schnell eine Liste mit potentiellen Teilen angefertigt werden. Aus dieser Liste (siehe Anhang) wurden anhand untenaufgeführten Kriterien, drei verschiedene Bauteile ausgewählt, mit welchen eine praktische Messung durchgeführt werden sollte.

- Kriterien:
- Spannungsfrei-/ Spannungsarmgeglüht
  - hoher Jahresverbrauch  $\Rightarrow$  grosse Stückzahlen
  - falls möglich schwere Teile
  - Geometrie muss auf der eigenen 3D-Messmaschine messbar sein

Nach Prüfung des gesamten Teilespektrums gemäss obenerwähnten 4 Kriterien, standen wiederum mehrere Teile zur Verfügung. Zum Schluss wurde unter Berücksichtigung der aktuellen Lagerbestände und der Produktionsplanung folgende Teile ausgewählt:

- |                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| - Führungsschiene     | Teilenummer: 82350.00.0.00 |
| - Zusatzriemenscheibe | Teilenummer: 45702.00.1.00 |
| - Lagerring           | Teilenummer: 25520.00.0.00 |

(Teilezeichnungen siehe Anhang)

Um die Vibrationsversuche auf ihrer Plausibilität hin zu prüfen, sind Vergleichswerte notwendig. Aus diesem Grund werden nebst den drei Versuchsserien, mit welcher man die Eignung des Vibrationsverfahren untersuchen möchte, Aufträge mit dem bisher gewohnten Spannungsfreiglühen, parallel dazu gestartet. Durch dieses Vorgehen erhält man Vergleichswerte, mit denen man die Verfahren auswerten kann. Für die Testserien mussten deshalb Alternativarbeitspläne angefertigt werden, da diese ja von den Normalarbeitsabläufen abweichen.

Da bei den ausgewählten Teilen mehrere Bearbeitungsoperationen und Auswärtsoptionen wie z.B Spannungsfreiglühen, Entzundern, etc, vorkommen, mussten die Aufträge für die Produktion so schnell wie möglich freigegeben werden, um noch vor der Abgabe der Diplomarbeit mit den nötigen Messresultaten rechnen zu können. Deshalb musste ich mich bereits auf eine geeignete Methode der Eigenspannungsmessung festlegen, damit man diese in den Arbeitsplänen als Auftragsoperation einfügen konnte.

Der Wunsch, den Eigenspannungszustand der obenausgewählten Bauteile über das ganze Volumen erfassen zu können, war nicht realisierbar. Anfangs wurden die Beugungsverfahren (Röntgen- und Neutronendiffraktometrie) in Betracht gezogen, mussten jedoch nach genaueren Abklärungen mit der EMPA in Dübendorf, dem PSI in Villigen und dem Fraunhofer Institut in Freiburg als ungeeignet angesehen werden. Einerseits sind die Anlagen für die gewünschten Versuchsstücke zu klein, und andererseits die gewünschten Eindringtiefen der Strahlungen für eine komplette Volumenbetrachtung nicht ausreichend.

Eine Änderung der Eigenspannung in einer Probe ist im allgemeinen mit einer Form -



oder Massänderung verbunden. Aus einer Form bzw. Massänderung während des Vibrieren, könnte man daher auf einen Spannungsabbau schliessen. Aus diesem Grund entschied ich mich, die vibrierten Teile mittels der firmeneigenen 3D-Koordinatenmessmaschine zu vermessen.



Abbildung 10:  
3D-Koordinatenmessmaschine

Um am Ende des Fertigungsauftrages mit vernünftigen Ergebnissen rechnen zu können, wurde deshalb vor- und nach dem Vibrieren bzw. vor- und nach dem Glühen eine Zusatzoperation auf der Messmaschine eingebaut, um mögliche Änderungen der Bauteile protokollieren und vergleichen zu können. Die Messmaschine der Firma Bruderer steht in einem klimatisierten Raum, damit können schon von vornherein Wärmedehnungen der Werkstücke, die sich negativ auf die Messergebnisse auswirken könnten, ausgeschlossen werden.

Die Arbeitspläne wurden folgendermassen gegliedert:

- Normalserie: „Spannungsarmglühen“ und vermessen mit Messmaschine  
Testserie: „Vibrationsentspannen“ und vermessen mit Messmaschine

Auf die detailliertere Vorgehensweise der Arbeitsfolgen wird später eingegangen. Wie bereits erwähnt, sind Vergleichswerte notwendig. Aus diesem Grund wird nebst der Testserie (Vibrieren), eine Normalserie (Glühen) parallel dazu gestartet, wobei man stets darauf achtete, dass die spanabhebenden Verfahren miteinander durchgeführt wurden, um die anfallenden Rüstzeiten auf einen einzelnen Auftrag abzuwälzen. Damit die Messresultate wie nach Zeitplan vorgesehen bis Ende der Kalenderwoche 38 ausgewertet waren, mussten die Abläufe mit den zuständigen Disponenten ständig überwacht und kontrolliert werden. Die Losgrössen der einzelnen Fertigungsaufträge wurden von den verantwortlichen Disponenten vorgegeben.

Losgrössen:

Teilekennzeichnung	„Normalarbeitsplan“	„Versuchsarbeitsplan“
Zusatzriemenscheibe	1 Stück <sup>14</sup> FA 45854/1	1 Stück FA 45854/2
Lagerring	5 Stück FA 46597.0	5 Stück FA 46596.0
Führungsschiene	2 Stück FA N99D0032	2 Stück FA N99D0033

<sup>14</sup> FA bedeutet Fertigungsauftrag

## 7.1 Versuche

Um die Versuche durchzuführen, stellte mir die Firma Wiap AG in 5745 Safenwil, eine ihrer Vibrationsentspannungsanlagen zur Verfügung. Die Entspannungsanlage wurde der Firma Bruderer AG für meine Diplomarbeit ausgeliehen.

Da ich dieses System aber nicht kannte, musste ich mich vorerst durch jemanden instruieren lassen. Herr Baldinger, Mitglied der Geschäftsleitung der Firma Wiap AG, hat bereits einige Erfahrung mit der Ausrüstung gesammelt, und instruierte mich über das Handling der Vibrationsentspannungsanlage.

Die Metallentspannungsanlage besteht aus folgenden Komponenten:  
(Herstellerangaben siehe unter verwendete Mittelsysteme)

- Steuergerät
- Messschreiber
- Unwuchtmotor (Vibrator)
- Beschleunigungsaufnehmer

### Steuergerät:

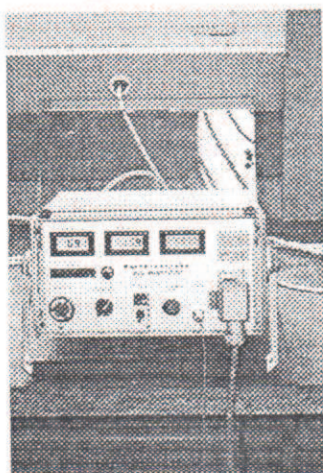


Abbildung 11: Steuergerät

Mittels Steuergerät kann die Drehzahl des Vibrationsmotors geregelt werden. Links im Bild sind die Anzeigen für die Drehzahl, Stromaufnahme, Beschleunigung und die Vibrationszeit ersichtlich. Diese Werte können mit dem Messschreiber aufgezeichnet werden. Da mich die angezeigten Werte aber nicht ganz überzeugten, musste im ISG-Labor eine Vergleichsmessung durchgeführt werden, um die angezeigten Werte auch richtig interpretieren zu können.

### Messschreiber:

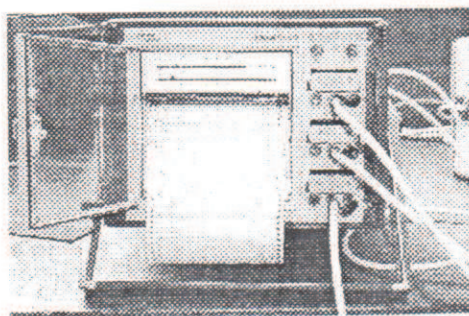


Abbildung 12: Messschreiber

Mit dem Messschreiber werden die aktuellen Daten auf einem ablaufenden Band aufgezeichnet. Um die Werte voneinander unterscheiden zu können, werden verschiedene Farben verwendet.

Grün: vom Beschleunigungssensor generierte Spannung

Rot: Stromaufnahme Vibrator

Blau: Drehzahl Vibrator

Anhand dieser Aufzeichnungen lassen sich jedoch nur grobe Aussagen machen, da die aufgezeichneten Werte nicht geeicht sind. (Eichung siehe Kapitel 7.2)

#### Unwuchtmotor:

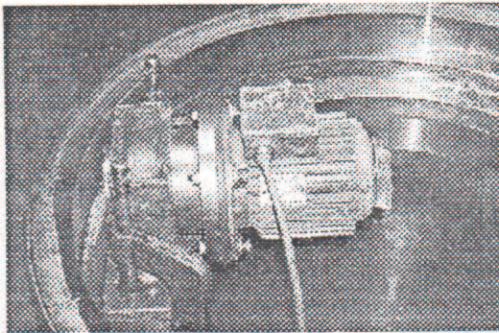


Abbildung 13: Unwuchtmotor

Die Fliehkraft wird durch zwei Paare Unwuchtgewichte hervorgerufen. Sie bilden einen Winkel, der sich bei Stillstand des Vibrators von  $180^\circ$  bis  $0^\circ$  verstellen lässt. Dadurch kann man eine resultierende Fliehkraft zwischen null und dem Höchstwert von ungefähr  $10295\text{N}$  einstellen. Diese zweiseitig gelagerten Unwuchtgewichte sind über eine Kupplung mit einem Drehstrom-Asynchronmotor verbunden.

Die Leistungsaufnahme des Motors beträgt  $1,1\text{kW}$  und dreht bei  $50\text{Hz}$  mit  $2800\text{min}^{-1}$ .

#### Beschleunigungsaufnehmer:

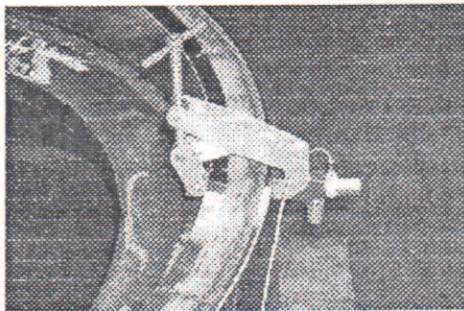


Abbildung 14: Beschleunigungsaufnehmer

Mittels Beschleunigungsaufnehmer werden die angeregten Werkstückschwingungen registriert. Im Inneren des Sensors befinden sich hochempfindliche Piezo-Kristalle. Ein schneller Druckwechsel erzeugt in den Kristallen eine Wechselspannung.

Mit Hilfe von herstellerspezifischen Datenblättern kann die erzeugte Spannung in Beschleunigungswerte umgerechnet werden. Für diesen Beschleunigungssensor waren aber keine Datenblätter erhältlich. Aus diesem Grund musste im Labor nachträglich eine Eichung durchgeführt werden.

## 7.2 Vergleichsmessungen

Da die Angaben des Herstellers bezüglich Empfindlichkeit des Beschleunigungsaufnehmers, effektive Drehzahl und Unwuchtmasse des Vibrators nicht ausreichend waren, mussten diese Werte selber ermittelt werden. Da diese Tests ausserplanmässig waren, musste ich kurzfristig umdisponieren, und die ganze Vibrationsanlage vom Aargauischen nach St. Gallen ins ISG Labor transportieren lassen.

### 7.2.1 Eichung des Beschleunigungsaufnehmers

Um die Eichung des Beschleunigungsaufnehmers durchzuführen, stellte mir die Schule den <sup>15</sup>FFT-Analysator zur Verfügung. Dieses Gerät ist ein überaus flexibles und leistungsfähiges System. Um aber die Möglichkeiten voll ausschöpfen zu können, ist es notwendig, sich mit dem FFT-Analysator gut auszukennen. Natürlich werden an den Bediener höhere Anforderungen hinsichtlich Fachwissen und Sorgfalt gestellt. Da ich

<sup>15</sup> FFT-Analysator steht für Fast-Fourier-Transformation

mich mit der Bedienung und der Software dieses Systemes nicht auskenne und das Erlernen aus zeitlichen Gründen auch nicht drin lag, zog ich eine Hilfsperson der Ingenieurschule bei. Albert Herzog, Mechaniker und Assistent an der <sup>16</sup>ISG, hat bereits einige Erfahrungen mit der ganzen Ausrüstung und der Software gesammelt. Bei den Messungen war auch der derjenige, welcher die ganzen Systemvariablen für die Software eingab.

Bei der Eichung sind wir folgendermassen vorgegangen.

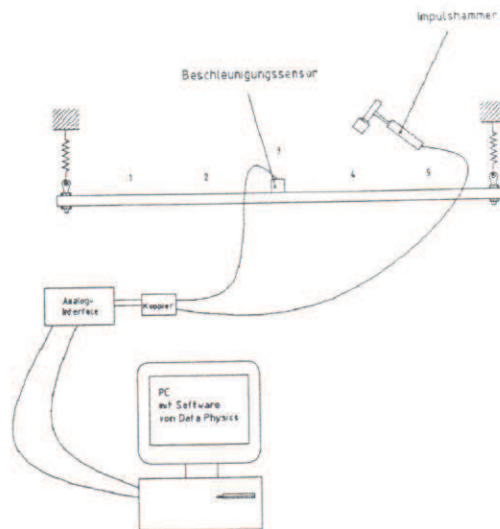


Abbildung 15: grober Versuchsaufbau der Eichung

Auf der Skizze ist ein Balken ersichtlich, der über zwei weiche Federn an der Decke des Raumes befestigt ist. Mit dieser Massnahme wird verhindert, dass Störungen von aussen die Messungen verfälschen. Um den Sensor der Firma Wiap mit dem geeichten Sensor der ISG vergleichen zu können, wurden beide am FFT-Analysator angeschlossen. Anschliessend wurden die Sensoren in der Mitte des Balkens befestigt. Mittels eines Impulshammers wird dann schliesslich das ganze System in Schwingung versetzt. Die aufgenommenen Signale der Sensoren, können

am Bildschirm betrachtet und über den angeschlossenen Drucker ausgedruckt werden. (siehe Anhang)

Auf den Protokollen ist deutlich ersichtlich, dass die ausgegebenen Höchstwerte gut übereinstimmen. Die maximalen Amplitudenausschläge sind in der gleichen Grössenordnung. Beim Abklingen der Schwingung bemerkt man allerdings, dass die Amplituden, die mit dem Sensor von der Firma Wiap AG aufgenommen wurden, deutlich schneller abnehmen, als diejenigen, die mit dem Sensor der Schule aufgenommen wurden. Dies lässt darauf schliessen, dass sich dieser Beschleunigungsaufnehmer bei kleinen Schwingungsamplituden wesentlich träger verhält und somit für die kleineren Amplituden nicht geeignet ist.

Schliesslich mussten noch die Werte vom Steuergerät mit den Werten des FFT-Analysators verglichen werden. Dazu wurde der Vibrator auf einer Stahlplatte befestigt und bei verschiedenen Drehzahlen die dazugehörigen Beschleunigungswerte mit den Sensoren gemessen.

Der Beschleunigungsaufnehmer von der Firma Wiap wurde aber nicht wie beim ersten Versuch an den FFT-Analysator, sondern direkt am Steuergerät angeschlossen. Der Sensor der ISG wurde wie gehabt am Analysator angeschlossen. Mit dieser Vorgehensweise müsste nun ein Vergleich der ausgegebenen Werte möglich sein. Dazu wurden bei verschiedenen Drehzahlen, die an der Rotorwelle mittels eines Drehzahlmessers kontrolliert und eingestellt wurden, die Spannungswerte des Sensors aufgenommen und in einer Tabelle zusammengetragen. (siehe Anhang)

Man erkennt sofort, dass die Spannungen, die über den FFT-Analysator aufgezeichnet worden sind, kontinuierlich zunehmen. Die Werte die aber über das Steuergerät

<sup>16</sup> ISG steht für Ingenieurschule St. Gallen

aufgenommen wurden, zeigen erst ab einer gewissen Beschleunigung einen steilen Spannungsanstieg.

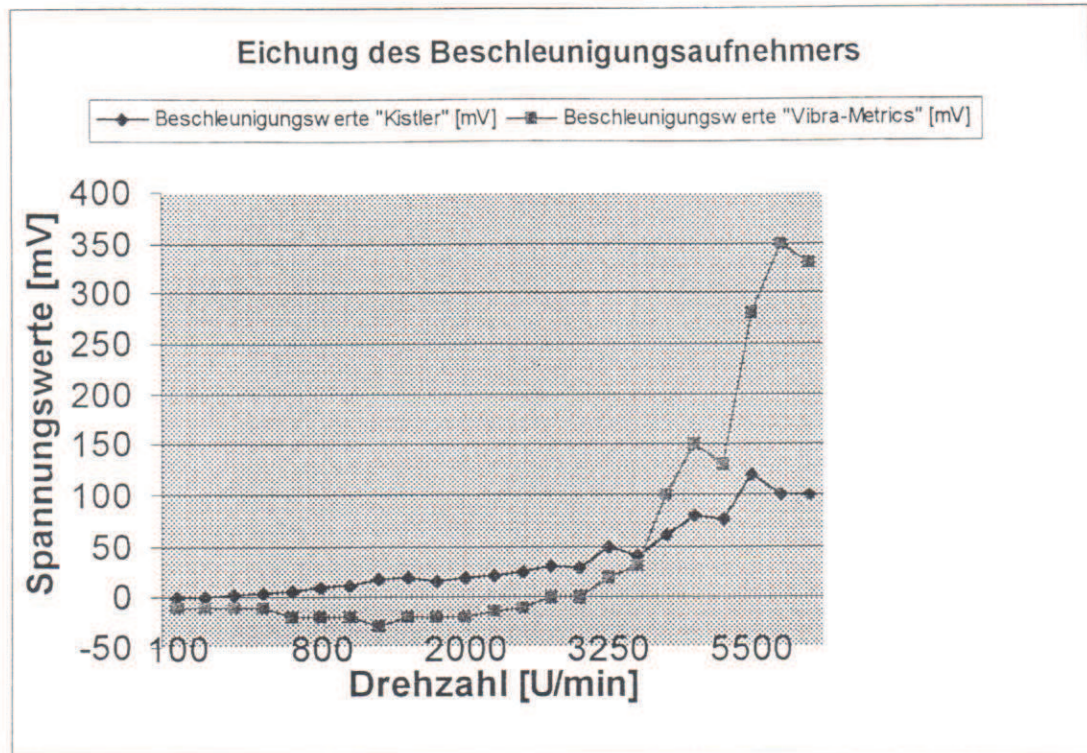


Abbildung 16: Eichung Beschleunigungsaufnehmer

Es zeigt deutlich, dass die Spannungswerte dieser zwei Sensoren nicht miteinander verglichen werden können. Der Sensor der Firma Wiap lässt sich somit nicht eichen. Dies führt dazu, dass keine effektiven Beschleunigungswerte angegeben werden können, sondern nur Spannungen die durch den Piezo-Kristall generiert werden. Aus der Liste ist aber auch ersichtlich, dass die mit dem Drehzahlmesser eingestellte Drehzahl nur grob mit derjenigen am Steuergerät übereinstimmt. Da auf dem Typenschild des Motors eine maximal erreichbare Drehzahl von  $2800\text{min}^{-1}$  bei  $50\text{Hz}$  angegeben wird, muss davon ausgegangen werden dass mittels eines Frequenzumformers die Höchstdrehzahl von  $5900\text{min}^{-1}$  erreicht wird.

### 7.2.2 Ergebnis der Eichung

Bei dem ersten Test zeigte sich, dass die erhaltenen Spannungen nicht miteinander verglichen werden können. Aus diesem Grund, kann anhand der Spannungswerte, die vom Beschleunigungssensors der Firma Wiap geliefert werden, keine präzise Angabe über die aktuelle Beschleunigung gemacht werden und bleiben nur statistische Größen.

Eine äusserst wichtige Feststellung machte ich, als ich das Übertragungskabel des Beschleunigungsaufnehmers besser verlegen wollte. Durch das Anfassen zeigte sich, dass starke Störungen in die Messung eingebracht werden können. Bei den Messungen muss deshalb darauf geachtet werden, dass der Sensor sehr sorgfältig behandelt wird.

### 7.2.3 Unwuchtmasse

Da vom Hersteller keine Angaben über die Unwuchtmasse zu bekommen war, musste ich diese selber bestimmen um anhand von diesen, auf die maximale Fliehkraft schliessen zu können.

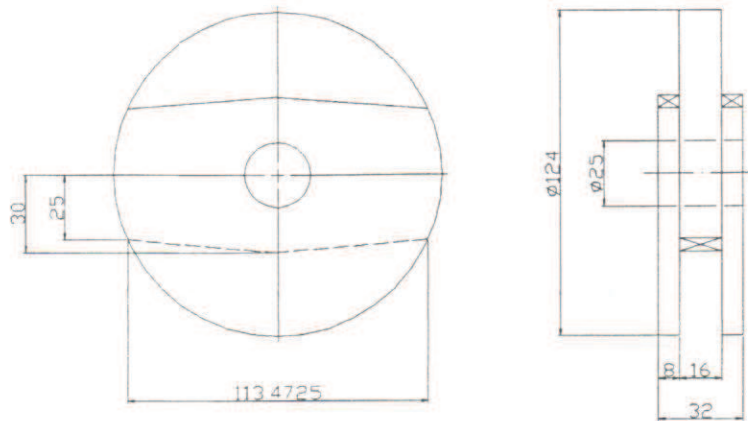


Abbildung 17: Unwuchtmasse

Folgende Werte wurden berechnet:

maximale Unwuchtmasse: 0.62kg

maximale Fliehkraft: 10295N

(detaillierte Berechnung im Anhang)

### 7.3 Vibrieren der Zusatzriemenscheibe

Bei der Zusatzriemenscheibe handelt es sich um ein geschweisstes Stahlbauteil von ca. 440kg. Die Zusatzriemenscheibe wird für den Vibrationsversuch auf weichen Gummipuffern gelagert, damit beim Vibrieren der Körper frei schwingen kann und die Schwingungsenergie nicht auf die Umgebung übertragen wird.

Um nach dem Versuch vernünftige Aussagen treffen zu können, mussten wie unter Punkt 7 bereits erwähnt, Alternativarbeitspläne erstellt werden, sowie vor- und nach dem Vibrieren bzw. vor- und nach dem Glühen eine zusätzliche Operation auf der 3D-Messmaschine eingebaut werden.

Grober Arbeitsablauf bei der Zusatzriemenscheibe:

OP-Nr.	Normal (FA 45854/1)	Alternativ (FA 45854/2)
Auswärts	Schweissen	Schweissen
10	Vordrehen für Messmaschine	Vordrehen für Messmaschine
20	Messmaschine	Messmaschine
30	Glühen	Vibrieren
40	Messmaschine	Messmaschine
50	Drehen	Drehen
60	Messmaschine	Messmaschine

Nach gründlichen Untersuchungen der Arbeitsabläufe in der Fertigung zeigt sich, dass beim Bearbeiten keine wesentlichen Eigenspannungen mehr eingebracht werden. Die Teile werden mit einem Vierbackenfutter gespannt, welches mittels einem Drehmomentschlüssel angezogen wird. Durch dieses Spannfutter werden keine nennenswerten Verformungen eingebacht. Auf denen im Anhang ersichtlichen graphischen Messprotokollen, sind sehr kleine Verformungen zu sehen, können jedoch wegen den kleinen Werten ausser Betracht gelassen werden. Um grössere Verformungen auszuschliessen, wird das Vierbackenfutter für die Schruppoperation mit 210Nm und für die Feindreoperation mit 120Nm angezogen.

Oberflächeneigenspannungen die durch die Drehbearbeitung möglicherweise eingebracht werden, kann man vernachlässigen, da hier die eingebrachten Schweisseigenspannungen die Hauptproblematik bilden. Diese sind nämlich dafür verantwortlich, dass eine zusätzliche Glühoperation eingesetzt wird.