

Versuchsausführung: Zusatzriemenscheibe:

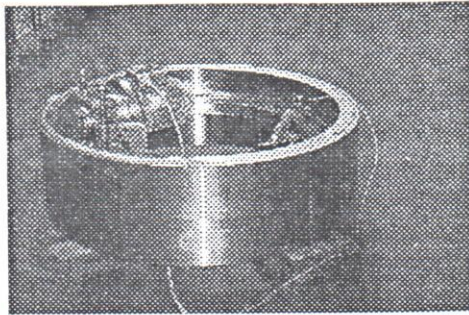


Abbildung 18: Zusatzriemenscheibe

Bei dem Vibrationsentspannen bin ich folgendermassen vorgegangen. Zuerst stellte ich das Bauteil auf die mitgelieferten Gummiunterlagen. Mit dieser Massnahme soll verhindert werden, dass die eingebrachte Schwingungsenergie sich auf die Umgebung ausbreitet und andererseits das Bauteil frei schwingen kann. Danach brachte ich den Exzentermotor und den Beschleunigungs-Sensor am Werkstück an. Um die Messresultate mittels Messschreiber aufnehmen zu können, muss er noch am Steuergerät angeschlossen werden.

Anschliessend konnte bereits mit dem Eigenspannungsabbau begonnen werden. Dazu wurde mit einem Potentiometer am Steuergerät die Drehzahl des Vibrators kontinuierlich erhöht. Anhand des Beschleunigungsaufnehmers, kann man bei allmählichem Hochdrehen der Drehzahl, Resonanzstellen ausfindig machen. Die Resonanzstelle macht sich auch in der Tonhöhe des sehr lauten Vibrationsgeräusches bemerkbar. Hat man eine Resonanzstelle gefunden, muss gemäss Hersteller die Drehzahl reduziert werden, da ansonsten die eingebrachte Schwingungsenergie zur Zerstörung des geschweissten Bauteiles führen kann. Eine genaue Angabe über die Drehzahlreduktion ist jedoch nicht bekannt. Der Vibrationsversuch wird mit dem Messschreiber ständig aufgezeichnet. Lässt man das Bauteil in der Nähe der Resonanz schwingen, bemerkt man nach kurzer Zeit einen deutlichen Abfall der vom Beschleunigungssensor generierten Spannung. Laut dem Hersteller ist dies ein eindeutiges Zeichen für einen Eigenspannungsabbau. Falls die Spannung keinen Abfall mehr aufweist, ist das Bauteil laut Hersteller Eigenspannungsfrei.

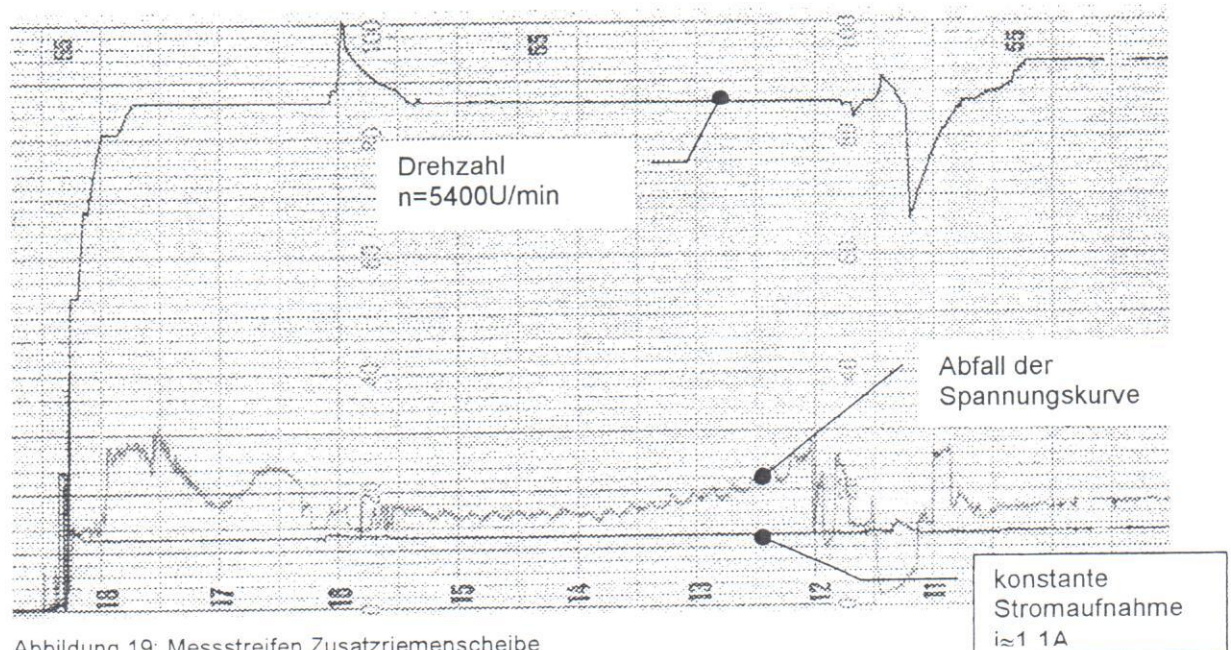


Abbildung 19: Messstreifen Zusatzriemenscheibe
Schwingungsdauer \approx 30Min

7.3.1 Vibrieren der Lagerringe

Beim Lagerring handelt es sich um einen Stahlring von ca. 5kg. Da es ein kleines Bauteil ist, kann der Vibrator nicht direkt auf das zu vibrierende Werkstück befestigt werden. Aus diesem Grund musste für diesen Versuch eine spezielle Vorrichtung angefertigt werden. Diese Vorrichtung soll das gleichzeitige Vibrieren mehrerer Werkstücke ermöglichen.

Um die einzelnen Lagerringe voneinander unterscheiden zu können, wurden sie nach der ersten Drehbearbeitung stirnseitig fortlaufend von 1-5 bzw. 6-10 durchnummeriert. In dieser Testserie wurden ebenfalls zusätzliche Operationen eingeführt, um nach dem vibrieren und nach dem Glühen die Form- bzw. Durchmesseränderungen zu protokollieren.

Grober Arbeitsablauf beim Lagerring:

OP-Nr.	Normal (FA 46597.0)	Alternativ (FA 46596.0)
20	Vordrehen	Vordrehen
30	Messmaschine	Messmaschine
40	Glühen	Vibrieren
60	Messmaschine	Messmaschine
70	Feindreihen	Feindreihen
80	Messmaschine	Messmaschine
90	Härten	Härten
110	Messmaschine	Messmaschine

In diesem Fall zeigt die Untersuchung der Fertigungsabläufe, dass der Lagerring ein sehr schwierig zu fertigendes Teil ist. Der Ring wird nämlich aus einem Schmiederohling gefertigt. Das Endprodukt ist sehr dünnwandig und labil. Die Probleme sind hier einerseits die Eigenspannungen die durch das Schmieden eingebracht werden und andererseits die Verformungen die man mittels Dreibackenfutter bei der Schruppbearbeitung einbringt. Diese Verformungen sind auf den Messprotokollen deutlich zu erkennen. Aus diesem Grund wird das Bauteil zuerst vorbearbeitet und anschliessend Spannungsfreigelegt. Um nach der Glühoperation keine neuen Eigenspannungen durch Verformungen einzubringen, werden spezielle Segmentbacken, die am ganzen Umfang des Ringes angreifen, verwendet.

Versuchsausführung Lagerring:

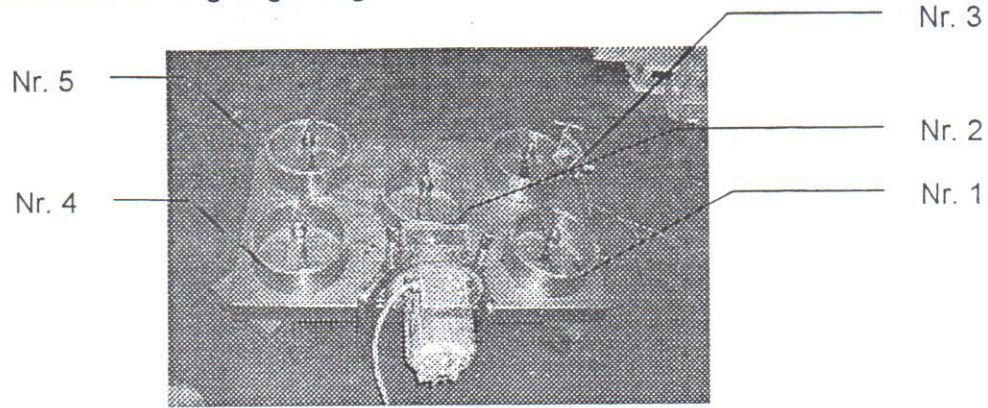
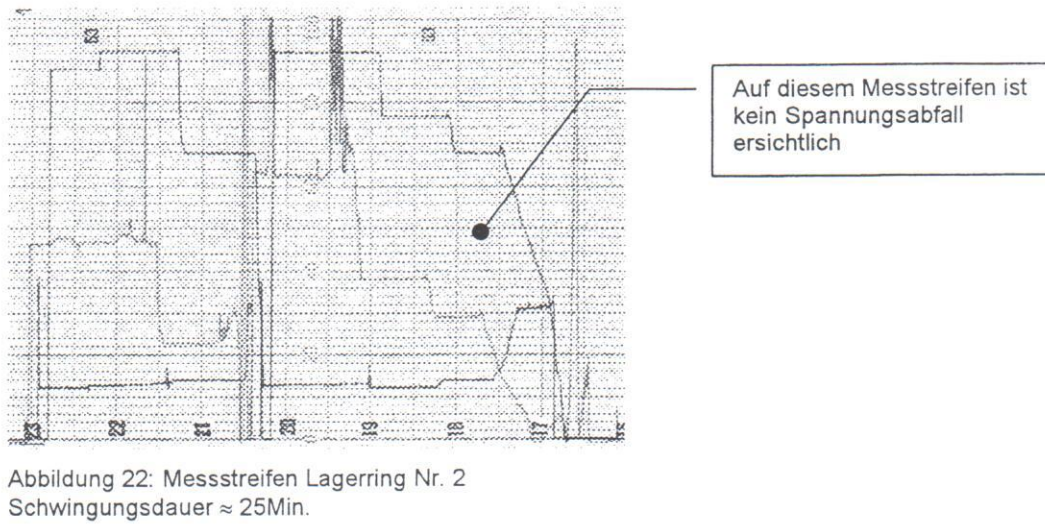
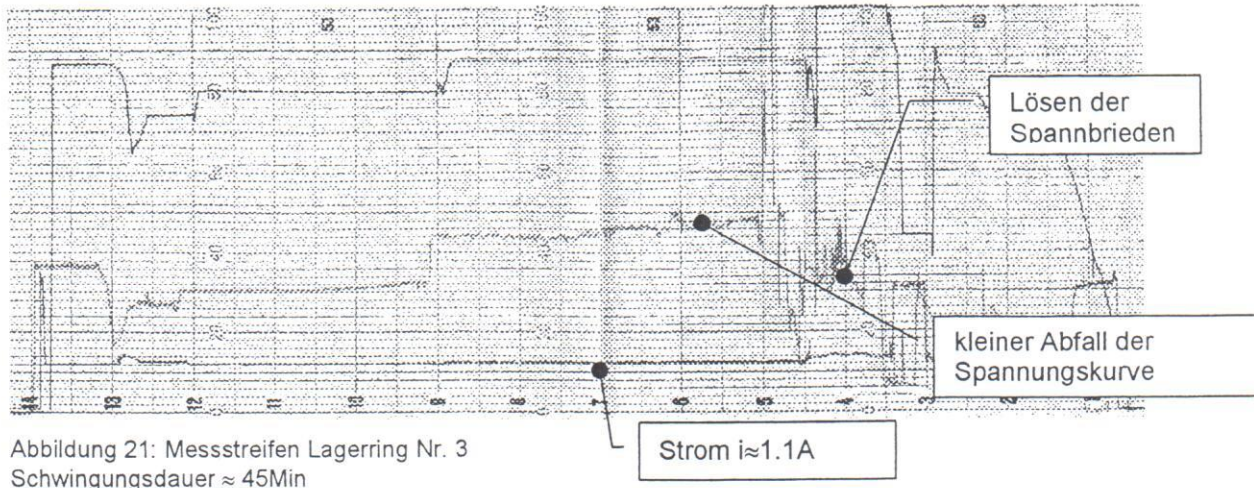


Abbildung 20: Lagerring

Bei diesem Test bin ich folgendermassen vorgegangen. Alle fünf Lagerringe werden auf den Rütteltisch gespannt, auf welchem vorgängig der Vibrator befestigt wurde. Um nach dem Vibrieren Aussagen über das Verhalten der einzelnen Stücke machen zu können, notierte ich mir die Teilenummern, die nach der Drehoperation zur Erkennung der einzelnen Stücke eingeschlagen wurden, mit der dazugehörigen Position auf dem Vibrationstisch. Wie beim ersten Test wird der ganze Aufbau auf weichen Gummiunterlagen gelagert.

Da die Hersteller der Vibrationsanlage noch keine Erfahrung mit einer Mehrfachaufspannung gemacht haben, musste ich mir die Aufspannvorrichtung und Vorgehensweise selber zurechtlegen. Da an der Anlage nur ein Beschleunigungsaufnehmer angeschlossen wird, kann auch nur ein Lagerring mit dem Sensor kontrolliert werden. Pro Vorgang kann somit nur ein Signal aufgenommen werden. Beim ersten Testlauf brachte ich den Sensor am Lagerring mit der Nummer 3 an. Wie beim ersten Versuch mit der Zusatzriemenscheibe wurde die Drehzahl kontinuierlich erhöht, um eine Resonanzstelle zu suchen. Da es sich hier aber um eine Mehrfachaufspannung handelt, stellte sich gerade diese Aufgabe als besonders schwierig heraus. Erschwerend kam noch dazu, dass beim Hochdrehen der Drehzahl sich durch die Schwingungsenergie einige Spannbriden lösten. Dieses Ereignis kann man auf dem Messstreifen sehr gut erkennen. Trotz Schwierigkeiten lässt sich aber auch auf diesen Aufzeichnungen ein deutlicher Abfall der Spannungskurve erkennen. Nach dem ersten Vibrationsversuch wurde der Beschleunigungssensor auf das Teil mit der Nummer 2 gesetzt, und ein neuer Vibrationsvorgang gestartet. Hier konnte aber kein Abfall der Spannungskurve festgestellt werden. Die Originale der Aufzeichnungen sind im Anhang zu finden.



7.3.2 Vibrieren der Führungsschiene

Bei der Führungsschiene handelt es sich um einen Balken mit einem Eigengewicht von ca. 40kg. Bei diesem Vibrationstest musste ich zwei Anläufe nehmen. Beim ersten Versuch, befestigte ich den Vibrationsmotor auf der Führungsschiene. Anschliessend stellte ich den ganzen Aufbau auf die Gummiunterlagen. Beim langsamen Hochdrehen der Drehzahl, stellte sich jedoch heraus, dass der Aufbau für diesen Versuch zu leicht war, und beim Einbringen der Schwingungsenergie sich fortbewegte. Aus diesem Grund musste mittels einer Vorrichtung das Bauteil an den Enden festgehalten und ein neuer Versuch gestartet werden. Die zwei Führungsschienen wurden wie bereits die Lagerringe, durch das Anbringen von Markierungen erkennbar gemacht. Die Fertigungsaufträge wurden folgendermassen gegliedert.

Grober Arbeitsablauf der Führungsschiene:

OP-Nr.	Normal (FA N99D0032)	Alternativ (FA N99D0033)
20	Vorfräsen	Vorfräsen
30	Messmaschine	Messmaschine
40	Glühen	Vibrieren
60	Messmaschine	Messmaschine
70	Feinfräsen	Feinfräsen
90	Messmaschine	Messmaschine
100	Rheinnitrieren	Rheinnitrieren
120	Messmaschine	Messmaschine

Bei der Betrachtung dieses Ablaufes stellt sich heraus, dass die Glühoperation wegen des späteren Rheinnitrieren eingesetzt werden muss. Der Härter, der diese Teile später rheinnitriert, empfiehlt die Teile vor dem Rheinnitrieren spannungsfrei zu glühen. Durch dieses Vorgehen soll verhindert werden, dass sich nach der erneuten Wärmezufuhr beim Nitrieren (ca. 470°) die Teile verziehen.

Versuchsaufbau:

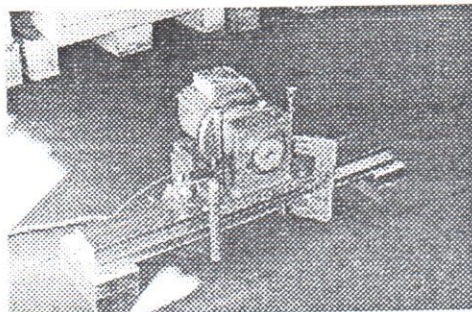


Abbildung 23: erster Versuchsaufbau
Führungsschiene

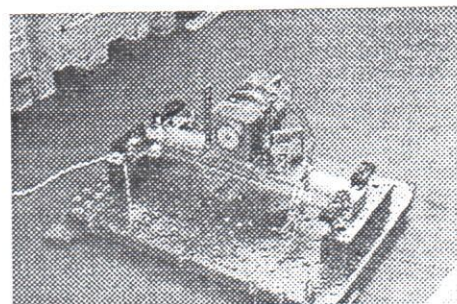


Abbildung 24: zweiter Versuchsaufbau
Führungsschiene

Versuchsdurchführung:

Die Vorgehensweise bei diesem Versuch wurde wie bei den anderen Versuchsteilen durchgeführt. Die Originalaufzeichnungen des Messschreibers sind ebenfalls im Anhang ersichtlich.

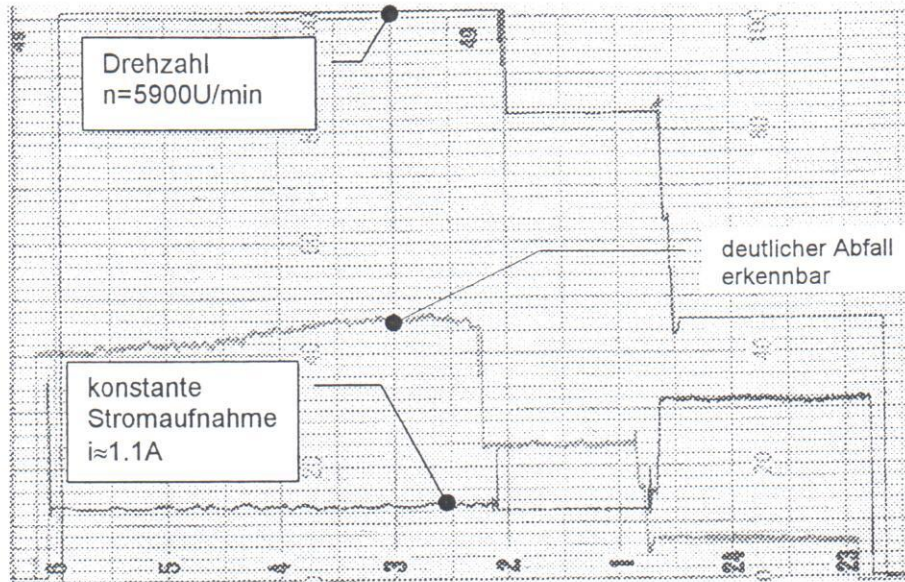


Abbildung 25: Messstreifen Führungsschiene „C“
Schwingungsdauer $\approx 25\text{Min}$

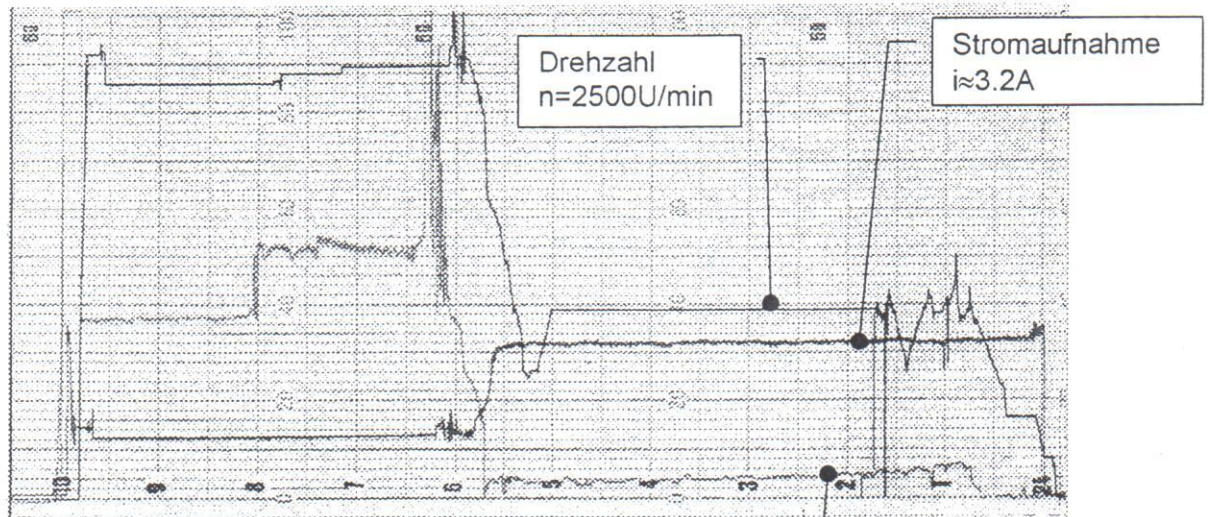


Abbildung 26: Messstreifen Führungsschiene „D“
Schwingungsdauer $\approx 30\text{Min}$

7.4 Auswertung der Messprotokolle

Da ich davon ausgegangen bin, dass eine Änderung des Eigenspannungszustandes in einer Probe im allgemeinen mit einer Form- oder Massänderung verbunden ist, setzte ich die firmeneigene 3D-Messmaschine ein. Um die Änderungen protokollieren zu können wurde bei der Zusatzriemenscheibe und den Lagerringen die Rundheit, und bei den Führungsschienen die Ebenheit von zwei Flächen gemessen.

DIN-Rundheit: DIN ISO 1101

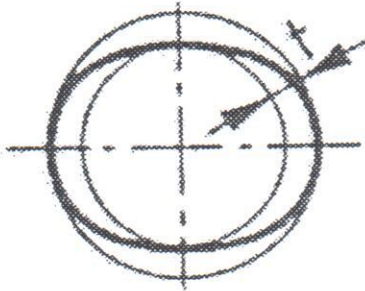


Abbildung 27: Rundheit

Die Umfanglinie jedes Querschnittes muss in einem Kreisring mit der angegebenen Toleranz „t“ liegen.

DIN-Ebenheit: DIN ISO 1101

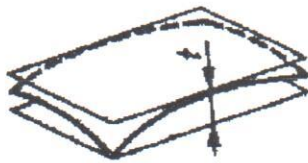


Abbildung 28: Ebenheit

Die tolerierte Fläche muss zwischen zwei parallelen Ebenen mit dem Abstand der Toleranz „t“ liegen.

Die Probestücke musste man wegen den verschiedenen Operationen mehrmals vermessen. Mit der Zeit sammelte sich ein gewaltiger Stapel an Messprotokollen an, die ich mittels einer Excel-Tabelle auswertete. Die vollständigen Messprotokolle sind im Anhang zu finden.

Um Verwechslungen von Probestücke vorzubeugen, wurden die Teile gekennzeichnet. Allfällige Messfehler wurden ausgeschlossen, da die Versuchsstücke immer auf die gleiche Art und Weise vermesst wurden.

7.4.1 Messprotokoll Zusatzriemenscheibe 45702.00.1.00

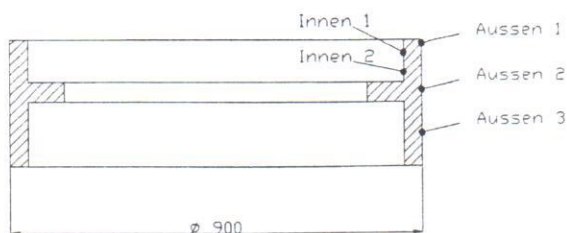


Abbildung 29: Messpunkte Zusatzriemenscheibe

FA 45854/2	Nummer 1
Rundheitsfehler DIN-Rundheit [um]	
Vor dem Vibrieren Innen 1	19.0
Vor dem Vibrieren Innen 2	18.9
Vor dem Vibrieren Aussen 1	29.8
Vor dem Vibrieren Aussen 2	26.6
Vor dem Vibrieren Aussen 3	55.0
Nach dem Vibrieren Innen 1	19.1
Nach dem Vibrieren Innen 2	19.0
Nach dem Vibrieren Aussen 1	33.9
Nach dem Vibrieren Aussen 2	27.3
Nach dem Vibrieren Aussen 3	55.0
Feinbearbeitung Innen 1	41.3
Feinbearbeitung Innen 2	7.8
Feinbearbeitung Aussen 1	49.6
Feinbearbeitung Aussen 2	25.1
Feinbearbeitung Aussen 3	54.1

FA 45854/1	Nummer 2
Rundheitsfehler DIN-Rundheit [um]	
Vor dem Glühen Innen 1	15.3
Vor dem Glühen Innen 2	22.4
Vor dem Glühen Aussen 1	20.4
Vor dem Glühen Aussen 2	32.7
Vor dem Glühen Aussen 3	35.4
Nach dem Glühen Innen 1	279.0
Nach dem Glühen Innen 2	283.8
Nach dem Glühen Aussen 1	305.5
Nach dem Glühen Aussen 2	285.7
Nach dem Glühen Aussen 3	292.4
Feinbearbeitung Innen 1	16.8
Feinbearbeitung Innen 2	9.0
Feinbearbeitung Aussen 1	16.7
Feinbearbeitung Aussen 2	33.8
Feinbearbeitung Aussen 3	15.8

7.4.2 Interpretation

Aus der Tabelle ist deutlich ersichtlich, dass sich die Zusatzriemenscheibe nach dem Glühen stark verzieht. Es werden Rundheitsfehler von bis zu 0.3mm gemessen. Dieser nach dem Glühen gemessene Verzug deutet auf eine eindeutige Verformung des Bauteiles und somit auf einen Abbau von Eigenspannung hin.

Bei der vibrierten Zusatzriemenscheibe, macht sich hingegen keine nennenswerte Verformung bemerkbar, was mit keinem eindeutigen Spannungsabbau zu interpretieren ist.

Beim Auswerten der Schlusskontrolle zeigt sich, dass die erhaltenen Messungen nach der Feinbearbeitung nicht miteinander verglichen werden können. Die graphischen Auswertungen lassen nämlich eindeutige Spuren des Vierbackenfutters erkennen. Trotz der relativen kleinen Spannkraft, die mittels eines Drehmomentschlüssels in das Futter eingebracht wird, lassen sich auf den graphischen Auswertungen deutliche Verformungen erkennen. Sie spielen sich im Hundertstelbereich ab, zeigen jedoch, dass die Messungen nach der Feinbearbeitung nicht miteinander verglichen werden dürfen.

Ergebnis:

Der starke Verzug nach der Glühoperation ist ein eindeutiges Zeichen für den Abbau von Eigenspannungen. Für das vibrierte Bauteil lässt sich anhand des Messprotokolles keine markante Änderung feststellen, was darauf schliessen lässt, dass kein Abbau von Eigenspannungen stattgefunden hat. Die mit dem Beschleunigungsaufnehmer gemessenen Reaktionen können demzufolge mit keiner Formänderung ins Spiel gebracht werden.

7.4.3 Messprotokoll Lagerring 25520.00.0.00

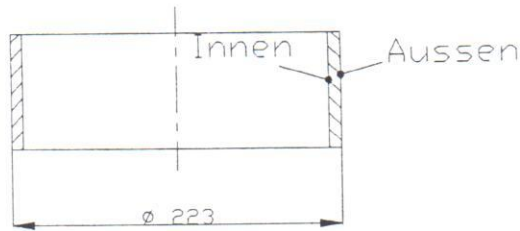


Abbildung 30: Messpunkte Lagerring

FA 46596.0	Stücknummer				
Rundheitsfehler DIN-Rundheit [um]	1	2	3	4	5
Vor dem Vibrieren Innen	55.7	129.2	73.4	141.5	142.2
Vor dem Vibrieren Aussen	52.5	134.8	72.3	148.1	146.4
Nach dem Vibrieren Innen	55.9	129.8	71.0	142.0	144.2
Nach dem Vibrieren Aussen	53.2	136.8	70.5	148.5	149.0
Vor dem Härten Innen	53.9	38.1	33.7	45.2	44.4
Vor dem Härten Aussen	51.3	36.7	30.7	41.9	41.3
Nach dem Härten Innen	255.1	170.2	248.6	373.0	625.4
Nach dem Härten Aussen	260.4	161.4	252.1	367.8	609.8

FA 46597.0	Stücknummer				
Rundheitsfehler DIN-Rundheit [um]	6	7	8	9	10
Vor dem Glühen Innen	82.3	54.1	137.6	72.4	51.0
Vor dem Glühen Aussen	82.1	50.3	142.2	72.9	50.6
Nach dem Glühen Innen	463.2	339.8	470.0	591.0	535.9
Nach dem Glühen Aussen	461.0	347.5	475.2	595.8	537.8
Vor dem Härten Innen	33.0	40.4	45.6	37.8	30.3
Vor dem Härten Aussen	29.4	38.5	41.7	34.0	25.8
Nach dem Härten Innen	521.5	585.0	402.4	250.7	119.4
Nach dem Härten Aussen	515.1	570.5	388.7	243.8	116.8

7.4.4 Interpretation

Bei den vibrationsentspannten Lagerringen, lassen sich nach dem Vibrieren keine Verformungen feststellen. Die kleinen Verformungen im Tausendstelbereich sind nicht von Bedeutung, da die Messmaschine bereits eine Messunsicherheit von $1.9\mu\text{m}$ aufweist. Bei den geglähten Teilen machten sich jedoch wie bei der Zusatzriemenscheibe starke Verformungen bemerkbar, die bis zu 0.6mm Rundheitsfehlern führten.

Nach dem Härten der Teile zeigt sich, dass die vibrierten sowie aber auch die geglähten Teile sich in etwa gleich stark verformen.

Ergebnis:

Betrachtet man nur die Schlussmessungen, so ist es nicht möglich, die geglähten von den vibrierten Lagerringen zu unterscheiden. Dies zeigt eindeutig, dass selbst der Glühprozess kein Garant für einen 100prozentigen Eigenspannungsabbau ist. Die mit dem Bescheinigungsaufnehmer gemessenen Reaktionen am Bauteil Nr. 2 und Nr. 3, können mit einer Formänderung nicht in Beziehung gebracht werden.

7.4.5 Messprotokoll Führungsschiene 82350.00.0.00

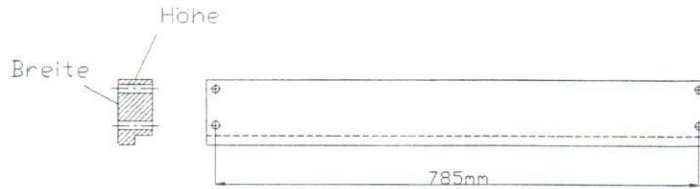


Abbildung 31: Basisflächen der Führungsschiene

FA N99D0032	Stück	
	A	B
Geradheitsfehler DIN-Geradheit [um]		
Vor dem Glühen Breite	82.9	35.1
Vor dem Glühen Höhe	30.6	19.4
Nach dem Glühen Breite	78.2	31.6
Nach dem Glühen Höhe	38.2	23.7
Vor dem Nitrieren Breite	27.8	14.6
Vor dem Nitrieren Höhe	15.7	17.6
Nach dem Nitrieren Breite	11.8	9.9
Nach dem Nitrieren Höhe	35.4	18

FA N99D0033	Stück	
	C	D
Geradheitsfehler DIN-Geradheit [um]		
Vor dem Vibrieren Breite	51.5	93.2
Vor dem Vibrieren Höhe	16.6	18.7
Nach dem Vibrieren Breite	50.7	95.1
Nach dem Vibrieren Höhe	17.2	10.0
Vor dem Nitrieren Breite	14.6	11.6
Vor dem Nitrieren Höhe	24.1	24.2
Nach dem Nitrieren Breite	15.2	10.3
Nach dem Nitrieren Höhe	48.2	45.8

Lochabstand: Mass 785mm

	A	B	C	D
Lochabstand 1 vor dem Nitrieren	784.8856	784.9162	784.9108	784.9045
Lochabstand 1 nach dem Nitrieren	784.9724	784.9932	784.9716	784.9612
Differenz in [um]	86.8	77	60.8	56.7
Lochabstand 2 vor dem Nitrieren	784.8965	784.9106	784.8952	784.9049
Lochabstand 2 nach dem Nitrieren	784.9938	784.9872	784.9683	784.9747
Differenz in [um]	97.3	76.6	73.1	69.8

7.4.6 Interpretation

Auch bei diesen Teststücken lassen sich keine grosse Veränderungen der Ebenheiten nachweisen. Die geglühten wie auch die vibrierten Führungsschienen weisen in etwa die gleichen Verformungen auf. Selbst bei den Messungen der Lochabstände ist kein deutlich Unterschied zwischen den geglühten und den vibrierten Führungsschienen ersichtlich.

Ergebnis:

Die Veränderungen die sich mittels dem Messstreifen der Vibrationstests aufzeichnen lassen, sind auch hier mit keiner eindeutigen Formänderung zu interpretieren. Weder die geglühten noch die vibrierten Teile zeigen eine starke Verformung auf. Dies ist entweder mit dem nicht Stattfinden eines Eigenspannungsabbaues zu deuten, oder mit sehr geringen Eigenspannungen in den Bauteilen selbst.

7.5 Gesamtergebnis der Versuche / Messprotokolle

Anhand der Messstreifen die während dem Vibrieren aufgezeichnet worden sind, lässt sich in den meisten Fällen ein klarer Abfall der von den Sensoren generierten Spannung feststellen. Der Hersteller der Vibrationsanlage erklärt dieses Verhalten mit einem totalen Eigenspannungsabbau.

Nach genauen Auswertungen der Messprotokolle kann folgendes festgehalten werden. In folge der Glühoperation lassen sich mit Ausnahme der Führungsschiene sehr starke Verformungen messen, die bei den vibrierten Teilen nicht nachzuweisen sind. Ohne Kenntnis des gesamten Eigenspannungszustandes kann jedoch keine Aussage über eine Änderung der Verhältnisse gemacht werden.

Die Eigenspannungszustände der einzelnen Bauteile sind zwar nicht bekannt.

Die Messprotokolle zeigen jedoch deutlich, dass mit der gewaltigen Energiemenge, die beim Glühen ins Bauteil gesteckt wird, eine eindeutige Verformung messbar ist. Bei den vibrierten Versuchsteilen ist dies aber wie bereits erwähnt nicht festzustellen. Hier wird deutlich, dass beim Spannungsfreiglühen sich die Eigenspannungen abbauen oder umlagern, und dass sich dieser Vorgang aber bei den vibrierten Teilen nicht nachweisen lässt.

Ergebnis:

Anhand der Versuche stellte sich heraus, dass sich beim Spannungsfreiglühen sehr starke Verzüge dokumentieren lassen, die gemäss Theorie mit einem Abbau oder Umlagern von Eigenspannungen zu beschreiben sind.

Das sich bei den vibrierten Teilen kein Verzug bemerkbar macht, kann folgendermassen begründet werden. Entweder findet beim angewandten Vibrationsverfahren überhaupt kein Eigenspannungsabbau statt oder die Verformung beim Eigenspannungsabbau finden nur partiell statt und können durch Eigenspannungen im Innern des Werkstückes aufgefangen werden.

8 Ergebnisse / Wirtschaftliche Auswirkungen

Nach dem Studium der Fachliteratur konnten bereits erste Informationen über das Verfahren ermittelt werden. Es zeigte sich, dass sich mit diesem seit Anfang der 60er Jahren bekannte Verfahren, bereits sehr viele Forscher und Institute auseinandergesetzt haben und es wird einem schnell bewusst, dass es sich um eine schwierige Technologie handelt. Es wurden nämlich immer und immer wieder neue Versuche und Testreihen durchgeführt. Das Resümee lautet derzeit:

Mit dem Vibrationsverfahren lassen sich nach heutigen Erkenntnissen keine grossen Erfolge beim Eigenspannungsabbau erzielen. Die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführten praktischen Versuche, konnten diese Aussage bestätigen. Die erwarteten Verformungen, die beim Abbau oder Umlagern von Eigenspannungen stattfinden, konnten mit einer 3D-Koordinatenmessmaschine nicht nachgewiesen werden.

Wirtschaftlich gesehen, hätten sich durch das Vibrationsverfahren folgende Vorteile erreichen lassen:

- „kleiner apparativer Aufbau“
- geringe Behandlungsdauer \Rightarrow dies führt zu verkürzten Fertigungsabläufen.
- keine Gefahr von neuen Eigenspannungen. Diese sind nach dem Glühen durch unterschiedliche Abkühlungsgeschwindigkeiten unvermeidbar.
- keine Auswärtsvergabe \Rightarrow geringere Aufwendungen in der Verwaltung/Logistik.

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

- Für die Firma Bruderer können keine Vorteile aufgelistet werden, die eine Anwendung einer Vibrationsanlage empfehlenswert machen.
- Die Anschaffung einer Vibrationsentspannungsanlage, die sich in der Grössenordnung von ca. Fr. 40'000.- beläuft, ist für die Firma Bruderer AG nicht zu verantworten.

9 Begriffe und Abkürzungen

Subresonantes Vibrieren:

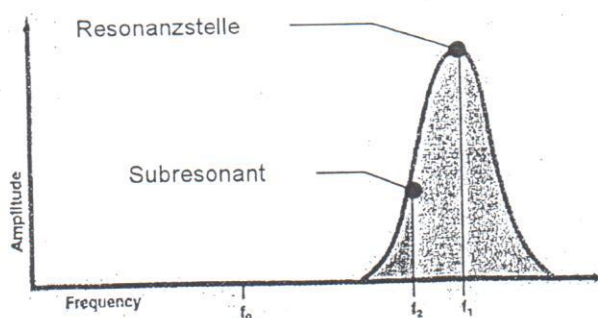


Abbildung 32: subresonantes Vibrieren

„Sub“ stammt aus dem lateinischen und bedeutet „unter.“ Das Vibrieren im Resonanzbereich einer Struktur, bringt sehr hohe Schwingungsamplituden mit sich, die ein Bauteil ohne weiteres zerstören können. Da durch das Vibrieren mit den Unwuchtmotoren die nötigen Spannungsamplituden für einen Eigenspannungsabbau nicht erreicht werden, versucht man im

subresonanten Bereich, den Effekt der Amplitudenverstärkung auszunutzen. Durch dieses Vorgehen wird der kritische Punkt (Resonanzstelle) nicht erreicht, wodurch Zerstörungen mehr oder weniger ausgeschlossen werden können.

Spannungs-Dehnungs-Diagramm:

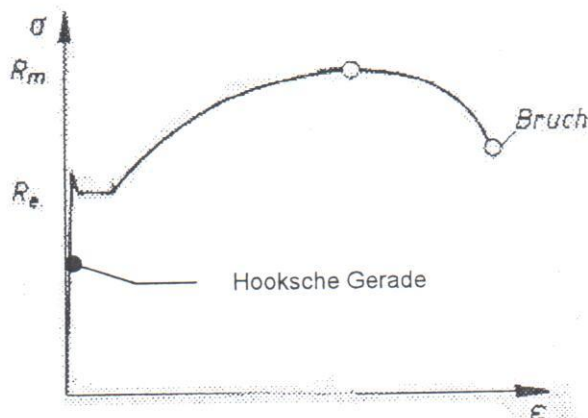


Abbildung 33: Spannungs-Dehnungs-Diagramm [7]

Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm zeigt, dass mit zunehmender Spannung die Dehnung zunächst linear ansteigt. Geht man in diesem Bereich auf die Belastung Null zurück, so wird auch die Formänderung ϵ Null. Es liegt eine elastische Formänderung vor. Man spricht von der „Hookschen Gerade.“ Bei weiterem Anstieg der Zugspannung weicht die Spannungs-Dehnungskurve von der Hookschen Gerade ab und es beginnt das Fließen

des Werkstoffes. Bei Wegnahme der Last bleibt nunmehr stets ein gewisser Betrag der Dehnung, die plastische oder bleibende Formänderung. Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm dient zur Ermittlung der statischen Festigkeitswerten.

Im Spannungs-Dehnungs-Diagramm verwendete Kürzel:

- R_e : Streckgrenze auch *Fliessgrenze* genannt; Beginn des plastischen Bereiches
- R_m : Zugfestigkeit, höchste Spannung die das Werkstück übertragen kann
- $R_{p0.2}$: „Ersatzstreckgrenze“ oder 0.2% *Dehngrenze*

Doppelbrechung:

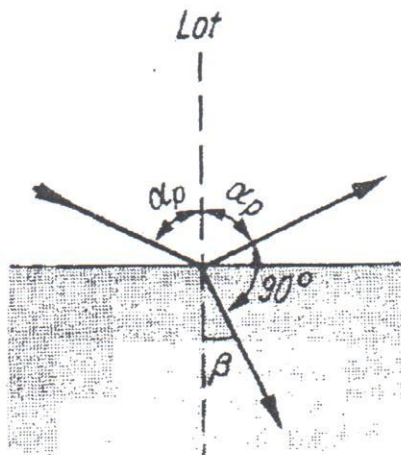


Abbildung 36: Doppelbrechung [16]

Als *Doppelbrechung* bezeichnet man die Eigenschaft bestimmter Stoffe, einen auftreffenden Lichtstrahl in zwei verschiedene Strahlen aufzuspalten. Beide laufen mit unterschiedlicher Phasengeschwindigkeit in verschiedene Richtungen und sind senkrecht zueinander polarisiert [16].

Viele durchlässige Stoffe werden durch elastische Verformung (Druck, Zug, Biegung, Torsion) doppelbrechend. Durch sogenannte Polarisationsfilter, kann dieser Effekt sichtbar gemacht werden. Um bei komplizierten oder grossen Bauteilen und Konstruktionen die Verteilung der mechanischen Spannung untersuchen zu können, fertigt man deshalb masstabgetreue Modelle aus doppelbrechendem Material an, und versucht die erhaltenen Resultate auf die realen Bauteile zu überführen.

Atomaufbau des reinen Eisens (α -Eisen, γ -Eisen)

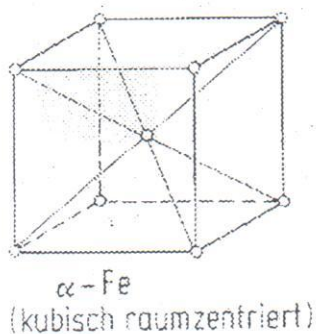
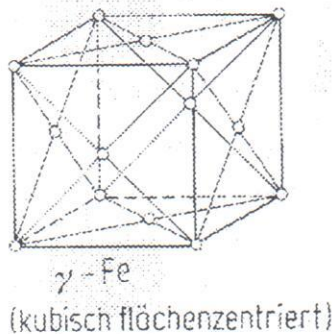


Abbildung 37: Gitterarten [17]

[18] Eisen ist der Hauptbestandteil des Stahles.

Im flüssigen Zustand, genannt Eisenschmelze, befinden sich die Atome dicht beieinander. Der Zusammenhang ist völlig regellos, ohne feste Ordnung.

Bei der Erstarrung ordnen sich dann die Atome nach bestimmten Gesetzmässigkeiten und bilden ein regelmässiges Raumgitter. Sie sind stets bestrebt, sich möglichst bis zur gegenseitigen Berührung zu nähern. Je nach der räumlichen Anordnung der Atome unterscheidet man verschiedene Gittertypen. Die wichtigsten sind dabei das kubisch-raumzentrierte und das kubisch-flächenzentrierte. Alle Metalle erstarren kristallin. Der ¹⁷amorph Zustand existiert für feste Metalle nicht.

¹⁷ amorph vom griechischen und bedeutet „gestaltlos“

- [12] Anonym, Zeitschriftenaufsatz: Iron Age Metalworking International, Band 17 (1978), Heft8, Seite 31 und 33
- [13] G. Freemann, Technisches Taschenwörterbuch, Max Huber Verlag 1998
ISBN 3-19-006213-7
- [14] Normen-Auszug für Technische Schulen, VSM-Normenbüro, 10 Auflage 1991
ISBN 3-909-750-03-9
- [15] Gieck, Technische Formelsammlung; Gieck Verlag 1995
ISBN 3-920379-21-7
- [16] H. Kuchling, Taschenbuch der Physik, Fachbuchverlag Leipzig GmbH, 1995
ISBN 3-343-00884-2
- [17] W. Beitz und H. Grote, Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer Verlag, 19. Auflage, 1997
ISBN 3-540-62467-8
- [18] Skript von Hr. K. Seemann, Unterrichtsfach: Technologie

11 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Verteilung der Eigenspannungen [1]	10
Abbildung 2: Ausbohr- und Abdrehverfahren [6]	14
Abbildung 3: Schlitzverfahren [6]	15
Abbildung 4: Messanordnung bei der Bohrlochmethode	16
Abbildung 5: Messanordnung bei der Ring-Kern-Methode	16
Abbildung 6: Röntgen-Diffraktometer	17
Abbildung 7: Auswertungsbild eines magnetischen Verfahrens	18
Abbildung 8: Eigenspannungsmessungen mit charakteristischen Merkmalen [4]	19
Abbildung 9: elektromagnetischer Vibrator für Testversuche [11]	20
Abbildung 10: 3D-Koordinatenmessmaschine	26
Abbildung 11: Steuergerät	27
Abbildung 12: Messschreiber	27
Abbildung 13: Unwuchtmotor	28
Abbildung 14: Beschleunigungsaufnehmer	28
Abbildung 15: grober Versuchsaufbau der Eichung	29
Abbildung 16: Eichung Beschleunigungsaufnehmer	30
Abbildung 17: Unwuchtmasse	31
Abbildung 18: Zusatzriemenscheibe	33
Abbildung 19: Messstreifen Zusatzriemenscheibe Schwingungsdauer \approx 30Min	33
Abbildung 20: Lagerring	35
Abbildung 21: Messstreifen Lagerring Nr. 3 Schwingungsdauer \approx 45Min	36
Abbildung 22: Messstreifen Lagerring Nr. 2 Schwingungsdauer \approx 25Min.	36
Abbildung 23: erster Versuchsaufbau Führungsschiene	37
Abbildung 24: zweiter Versuchsaufbau Führungsschiene	37
Abbildung 25: Messstreifen Führungsschiene „C“ Schwingungsdauer \approx 25Min	38
Abbildung 26: Messstreifen Führungsschiene „D“ Schwingungsdauer \approx 30Min	38
Abbildung 27: Rundheit	39
Abbildung 28: Ebenheit	39
Abbildung 29: Messpunkte Zusatzriemenscheibe	40
Abbildung 30: Messpunkte Lagerring	42
Abbildung 31: Basisflächen der Führungsschiene	44
Abbildung 32: subresonantes Vibrieren	47
Abbildung 33: Spannungs-Dehnung-Diagramm [7]	47
Abbildung 34: Smith-Diagramm [7]	48
Abbildung 35: Beanspruchungsarten [7]	48
Abbildung 36: Doppelbrechung [16]	49
Abbildung 37: Gitterarten [17]	49

12 Ehrenwörtliche Versicherung

Ich versichere hiermit ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Benützung der angeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Sämtliche Entlehnungen sind durch Quellenangaben kenntlich gemacht.

Ort, Datum: Goldach, den 6. Oktober 1999

Unterschrift: *M. Fabbroni*

10 Literaturverzeichnis

- [1] B. Scholtes, Eigenspannungen in mechanisch randschichtverformten Werkstoffzuständen, DGM-Informationsgesellschaftverlag, 1990 ISBN 3-88355-170-8
- [2] C. Hellwig, Tagungsband zum Seminar: Eigenspannungen – Fluch oder Segen?, EMPA Dübendorf, 7. Mai 1996
- [3] C. Rohrbach, Handbuch für experimentelle Spannungsanalyse, VDI-Verlag Düsseldorf
- [4] E. Macherauch and V. Hauk, Residual Stresses in Science and Technology, DGM – Informationsgesellschaft – Verlag Vol1: ISBN 3-88355-099-X Vol2: ISBN 3-88355-100-7
- [5] H. Bühler und H. Pfalzgraf, Untersuchung über den Abbau von Eigenspannungen in Gusseisen und Stahl durch mechanisches Rütteln und Langezeitlagerung im Freien, VDI-Verlag, 1962
- [6] G. König, Stand der Technik auf dem Gebiet der Eigenspannungsmessungen, Staatliche Materialprüfungsanstalt (MPA), 1989 (Seminar über Eigenspannungsmessungen)
- [7] Roloff/Matek, Maschinenelemente, Vieweg Verlag, 1995 ISBN 3-528-74028-0
- [8] A. Claxton, Zeitschriftenaufsatz: Heat Treatment of Metals, Birmingham, Band 18 (1991), Heft 3, Seite 85-89
- [9] G. Gnirss, Zeitschriftenaufsatz: Technische Überwachung, Band 27 (1986), Heft 11, Seite 439-442
- [10] G. Gnirss, Zeitschriftenaufsatz: Welding in the World, Band 26 (1988) Heft11/12, Seite 284-291
- [1 aus 10] K. Zeig, Rüttelentspannen oder Spannungsarmglühen, Maschinenbautechnik 11, 1962
- [2 aus 10] J. Lokshin, Vibration treatment and dimensional stabilisation, Russian casting-production, 1965
- [3 aus 10] G. Adoyan und Mitautoren, Basic factors in the vibration of iron castings, Russian castings-production, 1966
- [4 aus 10] S. Weiss und Mitautoren, Vibrational residual stress relief in a plain carbon steel weldment, 1976
- [5 aus 10] D. Kelsko, Stress Relief by Vibration, Tool and Manufacturing Engineer, 1968
- [6 aus 10] H. Pusch, Das Vibrationsverfahren zur Reduktion von Eigenspannungen, Maschinenwelt-Elektrotechnik 8, 1976
- [11] R. Dawson / G. Moffat, Zeitschriftenaufsatz: Transactions of the ASME, Band 102 (1980), Heft 2, Seite 169-176
- [1 aus 11] R. McGoldrick and E. Saunders, Some Experiments in Stress Relieving Castings and Welded Structures by Vibration, J.A.S.N.E., 1943
- [2 aus 11] P. Woznay and R. Crawler, An Investigation of Vibrational Stress Relief in Steel, 1968