

Wiap AG
Industriestrasse 48L
CH-4657 Dullikon

Studienbericht Nr. 5211.01839-1

Auftrag:	Ausgedehnte Literaturstudie über den Abbau von Eigenspannungen durch das Einbringen von Schwingungen und Wellen
Studienobjekt:	Metallische Teile und Metallbaukonstruktionen
Kundenreferenz:	Innosuisse 43742.1 INNO-ENG
Ihr Auftrag vom:	13.04.2020
Ausführung der Studie	Juni 2020 – Mai 2021
Anzahl Seiten:	43
Beilagen:	Keine
Versand:	3 Exemplare an Auftraggeber

Zusammenfassung

Die Wirkung von kontrolliert eingebrachten Schwingungen und Wellen auf Eigenspannungen in Metallteilen ist nicht abschliessend untersucht worden. Das Phänomen ist in der Praxis als Alternative zu thermischen Verfahren zum Eigenspannungsabbau in geschweissten, geschmiedeten oder gewalzten Metallteilen oder ganzen Metallkonstruktionen seit vielen Jahren bekannt und aus Sicht der Anwender teilweise erfolgreich angewendet worden. Dieses Erfahrungswissen ist jedoch mit viel Unsicherheit über die grundlegenden physikalischen Wirkmechanismen behaftet. Das Verfahren ist unter der englischen Bezeichnung Vibratory Stress Relief (VSR) in der wissenschaftlichen Literatur bekannt.

Die Firma Wiap AG hat das Verfahren weiterentwickelt zu einer 3D-Methode und dieses als MEMV®-Verfahren als Marke angemeldet und Patente erhalten. Zur weiteren Optimierung des Verfahrens und auch für die Verbesserung der Akzeptanz bei Kunden soll in dieser ausgedehnten Literaturrecherche die wissenschaftliche Grundlage und die belegten Mechanismen und Zusammenhänge zusammengefasst werden, sowie das Potential für weitere Optimierungen des Prozesses abgeschätzt werden. Die Potenzial zur Anwendung des MEMV auf verschiedene Werkstoffklassen und Halbfabrikate aus unterschiedlichen Herstellverfahren und Prozessen soll abgeklärt werden.

Dübendorf, 26. Mai 2021

Eidg. Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
Abt. Mechanical Systems Engineering

Senior Scientist:

Projektleiter:

Abteilungsleiter:

Dipl. Ing. S. Michel

Dipl. Ing. Ch. Affolter

Prof. Dr. G. Terrasi

INHALTSVERZEICHNIS

1	Auftrag.....	5
1.1	Motivation	5
1.2	Problemstellung	5
1.3	Ziel.....	5
1.4	Vorgehen	6
2	Eigenspannungen und Vibrationen in Werkstücken.....	6
2.1	Eigenspannungen in Werkstücken	6
2.1.1	Eigenspannungen 1. Art (makroskopische Eigenspannungen)	6
2.1.2	Eigenspannungen 2. Art (mikroskopische Eigenspannungen)	6
2.1.3	Eigenspannungen 3. Art (mikroskopische Eigenspannungen)	6
2.2	Vibrationen von Werkstücken	8
2.2.1	Freie Schwingungen	8
2.2.2	Erzwungenen Schwingungen	8
2.2.3	Resonanz	8
3	Literaturrecherche.....	9
3.1	Allgemeine Recherche.....	9
3.1.1	Ursachen von Eigenspannungen in Werkstücken	9
3.1.2	Messverfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen.....	9
3.1.2.1	Röntgen-Beugung (X-Ray Diffraction XRD).....	9
3.1.2.2	Bohrloch-Methode	10
3.1.2.3	Barkhausenrauschen.....	11
3.1.2.4	Ultraschall	11
3.1.2.5	Synchrotron-Beugung / Neutronen-Beugung.....	11
3.1.2.6	Messverfahren gemäss Patentschrift Wiap AG.....	11
3.1.3	Art und Messung von Vibrationen in Werkstücken	11
3.1.3.1	Beschleunigungssensoren (accelerometer).....	11
3.1.3.2	Partikel-Rütteln (Chladni-Klangfiguren).....	11
3.1.3.3	Digitale Bildkorrelation.....	12
3.1.4	Allgemeine Publikationen und Beschreibung von VSR-Verfahren	12
3.1.4.1	Das VSR-Verfahren im allgemeine	12
3.1.4.2	Anwendung des VSR-Verfahrens bei der Firma Wiap AG.....	12
3.1.4.3	Das MEMV®-Verfahren der Firma Wiap AG	12
3.2	Wissenschaftliche Literaturrecherche	13
3.2.1	Frühere Literatur-Studien	13
3.2.2	Suchkriterien und Schlüsselbegriffe der Literaturrecherche	13
3.2.3	Literatur zu empirischen Erfahrungen mit Vibratory Stress Relief.....	14
3.2.4	Literatur zu wissenschaftlichen Studien zu Vibratory Stress Relief	15
3.2.5	Literatur zu Theorien des Vibratory Stress Relief.....	33
4	Bewertung des Stand des Wissens und Erfahrung	36
4.1	State-of-the-Art betreffend Eigenspannungsabbau mittels Vibrationen	36
4.2	Offene Fragen.....	38
4.3	Weiteres Vorgehen	38

4.3.1	Verifikation des MEMV®-Verfahrens an einem typischen Werkstück.....	38
4.3.2	Simulation des MEMV®-Verfahrens an neuen Werkstücken	38
5	Schlussfolgerungen	39
	Referenzverzeichnis.....	40

ABKÜRZUNGEN

- VSR : Vibratory Stress Relief. s.
https://en.wikipedia.org/wiki/Vibratory_stress_relief
- WIAP® : Firmenbezeichnung für WIAP AG Ltd SA (angemeldete Marke) s.
<https://www.wiap.ch/Diverse%20Sprachen/Deutsch/1.%20Ingalt%2000/Inhalt%2000.htm>
- MEMV® : Metall entspannen mit Vibration; ab 2021 Metall entspannen mit Vielrichtungen
(angemeldete Marke) s.
<https://www.wiap.ch/Diverse%20Sprachen/Deutsch/1.%20Ingalt%2000/Inhalt%2000.htm>
- POLDI : Pulse OverLap Diffractometer des Paul Scherrer Institutes (PSI)
- PWHT : Post Welding Heat Treatment; Spannungsarmglühen nach dem Schweißen
- XRD : X-ray diffraction; Röntgen-Beugung

SYMBOLLISTE

- g : Erdbeschleunigung = 9.81 m/s^2

1 AUFTRAG

1.1 Motivation

Die Einhaltung von vorgegebenen Abmessungen von Bauteilen ist im allgemeinen Maschinenbau wichtig. Insbesondere kann die Formstabilität während der Herstellung durch mechanische oder thermische Behandlung beeinträchtigt werden; es kann zu Verwerfungen und Maßabweichungen kommen. Solche unerwünschten Verformungen sind auf Veränderungen der Eigenspannungen im Bauteil zurückzuführen.

Eigenspannungen in Bauteilen sind daher generell unerwünscht, mit Ausnahme von gezielt eingebrachten Druckeigenspannungen, z.B. in Bohrungen zur Verbesserung der Ermüdungseigenschaften. Das häufigste Verfahren, um Eigenspannungen in Bauteilen abzubauen ist eine kontrollierte Wärmebehandlung, Spannungsarmglühen genannt. Durch den Eintrag von thermischer Energie werden die atomaren Gitterstrukturen angeregt, so dass Versetzungen eine erhöhte Beweglichkeit erhalten. Damit können Relaxationen stattfinden, die sich makroskopisch als Abbau von Eigenspannungen manifestieren. Die Erwärmung des Bauteils muss dabei im eng begrenzten Rahmen stattfinden, so dass keine unerwünschten Festigkeitsverluste, insbesondere bei ausscheidungsgehärteten Werkstoffen, entstehen. Solche Verfahren sind im allgemeinen zeit- und kostenintensiv [1].

Eine andere Art des Eigenspannungsabbaus basiert auf dem Einbringen von mechanischer statt thermischer Energie. Die Werkstücke werden dazu in der Regel bei Umgebungstemperatur durch einen Schwingungsanreger in Vibration gebracht. Als wirkungsvoll erwiesen hat sich eine Anregung nahe oder bei der Resonanzfrequenz. Die konkrete Methode, das heisst die Wahl des Ortes, der Richtung, der Amplitude und der Frequenz der Anregung ist abhängig von der Gestalt des Werkstückes, des Materials, und der Vorbehandlung. Auch die Anforderungen an den Umfang (örtliche Verteilung) und die Höhe des Eigenspannungsabbaus muss berücksichtigt werden. Entsprechende Verfahren wurden in der Regel von Praktikern entwickelt, basierend weitgehend auf Erfahrungswissen. Wenn eine Vorgehensweise gefunden ist, die zum gewünschten Effekt führt, ist diese Option aus betriebswirtschaftlicher Sicht sehr vorteilhaft: Es spart Zeit in der Fertigung, da auf zeitintensive thermische Behandlungen oder Transporte verzichtet werden kann. Es spart auch Energie, dies umso mehr je grösser das Bauteil ist. Daher hat der Eigenspannungsabbau durch Vibration ein sehr interessantes Potential für eine ökonomische und ökologische Fertigung im Metall- und Grossmaschinenbau [1].

1.2 Problemstellung

Das einachsige VSR-Verfahren, welches bei Kleinproben nachweislich nicht alle Zonen des Bauteils entspannen kann wurde bei der Firma Wiap AG zu einem mehrachsigen Verfahren weiterentwickelt. Das MEMV[®]-Verfahren basiert auf firmeninternem Erfahrungswissen und Kundenerfahrungen mit dem MEMV-Verfahren. In einigen konkreten Anwendungsfällen konnte gezeigt werden, dass das MEMV-Verfahren den gewünschten Effekt, d.h. keine ungünstigen Verformungen bei einer anschliessenden mechanischen Bearbeitung, bringt. Eine allgemeine Anwendbarkeit ist jedoch noch nicht bei allen Bauteilarten belegt. Dies ist erforderlich um eine gute Prozesssicherheit zu erreichen. Es fehlt das vertiefte wissenschaftlich-technische Verständnis, wie der Effekt zu Stande kommt, und wie er für einen allgemeinen Fall vorausgesagt werden kann. Ein entsprechendes Modell, das auf den werkstofftechnischen Mechanismen beruht, fehlt bei den Anwendern. Eine bessere Dokumentation der Wirksamkeit der Methode würde die Akzeptanz bei möglichen Kunden stark verbessern. Aus diesem Grund konnte das Potential der Methode noch nicht richtig ausgeschöpft werden.

1.3 Ziel

Aufarbeitung des Stand des Wissens und der Erfahrungen zu Verfahren des Eigenspannungsabbau mittels Vibrationen. Erstellen einer entsprechenden ausgedehnten Literaturstudie, mit Schwerpunkt auf Grundlagenarbeiten zum Effekt der Vibratory Stress Relief-Methode mit Mehrachsen-Anregung, wie sie in den Publikationen zur MEMV[®]-Methode umschrieben wird, s. [2, 3].

1.4 Vorgehen

Die Auftraggeberin hat bei der Innosuisse eine Unterstützung in Form eines Innovation Cheque angefragt und mit dem Schreiben der Innosuisse vom 13.04.2020 auch zugesprochen bekommen. Als Forschungspartner hat die Auftraggeberin die Empa gewählt. Die Studie wird im Zeitrahmen Juni 2020 bis Mai 2021 von der Abteilung Mechanical Systems Engineering der Empa bearbeitet.

2 EIGENSPANNUNGEN UND VIBRATIONEN IN WERKSTÜCKEN

2.1 Eigenspannungen in Werkstücken

Wang gibt in [4] einen Überblick über allgemeine Aspekte von Eigenspannungen. Gemäss [3, 5, 6] können Eigenspannungen in makroskopische und mikroskopische Eigenspannungen unterteilt werden. Eine andere Unterteilung spricht von Eigenspannungen erster, zweiter und dritter Art, s. auch Siegen [7]. Eine wissenschaftliche Beschreibung der Eigenspannungen gibt Macherau [8]. Er gibt eine Definition der Eigenspannungen erster, zweiter und dritter Art, s. Bild 1.

2.1.1 Eigenspannungen 1. Art (makroskopische Eigenspannungen)

Wenn ein Bauteil durch mechanische Verformung plastisch verformt wurde, werden bei der Entlastung Bereiche mit Druckspannungen und Bereiche mit Zugspannungen aufgebaut. Da diese Bereiche makroskopische Ausdehnungen annehmen, kann man solche Eigenspannungen auch als makroskopische Eigenspannungen bezeichnen. Solche Eigenspannungen treten z. B. auf, wenn ein Draht, eine Stange, oder ein Blech verbogen werden, s. Bild 2. Auch wenn nach der Verformung keine äusseren Kräfte auf das Bauteil wirken, ist das Bauteil im Inneren nicht spannungsfrei. Es enthält Eigenspannungen 1. Art.

Eine andere Art wie solche Eigenspannungen entstehen können sind Erwärmungen und Wiederabkühlungen. Dabei können Bereiche des Bauteils aufgrund der inhomogenen Temperaturverteilung früher verfestigen als andere. Durch die ungleichmässigen Temperaturverläufe entstehen nach vollständiger Abkühlung und Temperaturengleich in Zonen, die zuerst verfestigt wurden, Druckspannungen. Diese werden durch Zugspannungen in Bereichen die später verfestigten kompensiert. Dies tritt z. B. bei Schweißnähten auf, s. Bild 3.

2.1.2 Eigenspannungen 2. Art (mikroskopische Eigenspannungen)

Metalle sind keine homogenen Materialien, sondern weisen eine Mikrostruktur auf: Sie bestehen aus Körnern und Ausscheidungen. Körner sind Bereiche, die eine gleichgerichtete Gitterorientierung ihres anisotropen Aufbaus aufweisen. An Korngrenzen gibt es auf Grund der zufälligen gegenseitigen Fehlorientierung der benachbarten Körner Inkompatibilitäten im Aufbau. Die Atome sind nicht in ein Kristallgitter eingebunden, sondern nehmen eine Zwischenposition ein. Solche Zustände können sich bei Temperaturänderungen verändern. Dies kann vom Aufbau von Spannungen in den Körnern begleitet sein. Solche Eigenspannungen nennt man Eigenspannungen 2. Art. Diese Eigenspannungen kompensieren sich über makroskopische Bereiche, so dass in der Regel keine oder nur sehr schwache Verformungen des Bauteils resultieren.

2.1.3 Eigenspannungen 3. Art (mikroskopische Eigenspannungen)

Auch innerhalb von Körnern kann das Metallgitter Imperfektionen aufweisen. Diese Fehlstellen können freie Plätze im Metallgitter sein, oder Versetzungen. Auch an diesen Fehlstellen können Eigenspannungen auftreten. Diese sind an die Fehlstelle gebunden. Solche Eigenspannungen nennt man Eigenspannungen 3. Art. Auch diese Eigenspannungen führen nicht zu Verformungen des Bauteils.

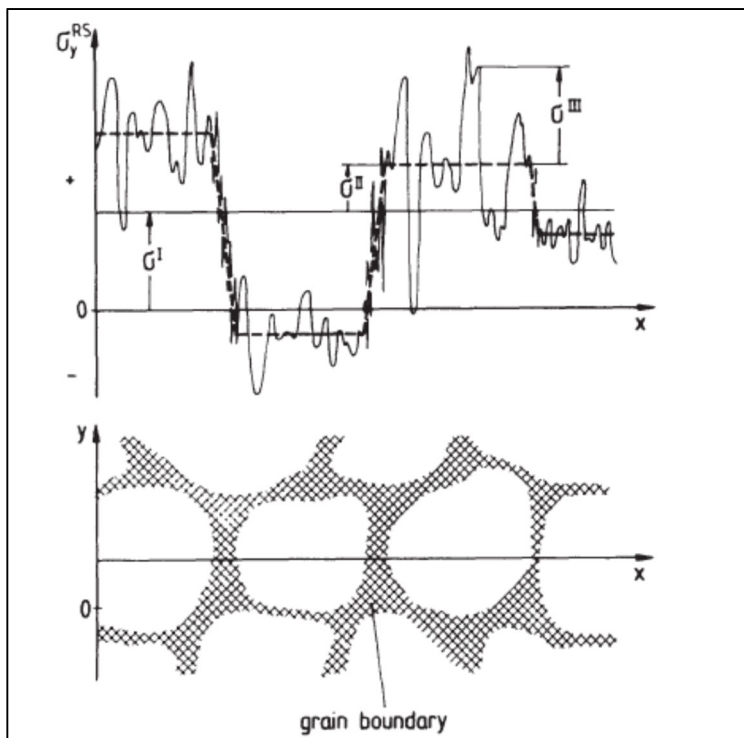


Bild 1: Eigenspannungen 1. (σ^I), 2. (σ^{II}), und 3. Art (σ^{III}) nach Machrauch (aus [8]).

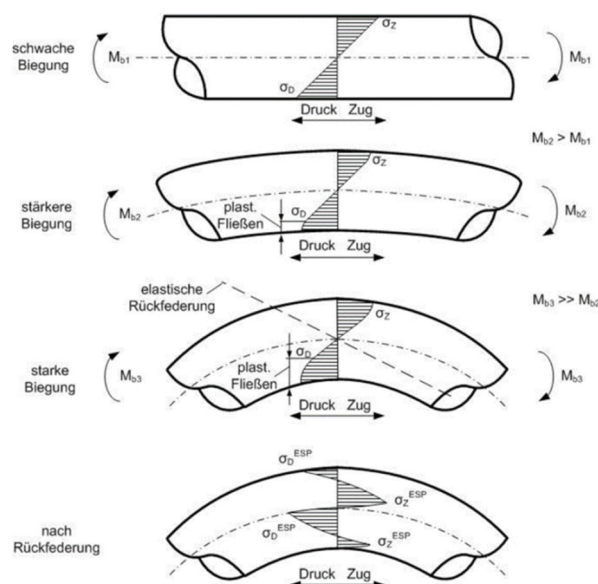


Bild 2: Eigenspannungen in einem verbogenen Stab (aus [7])

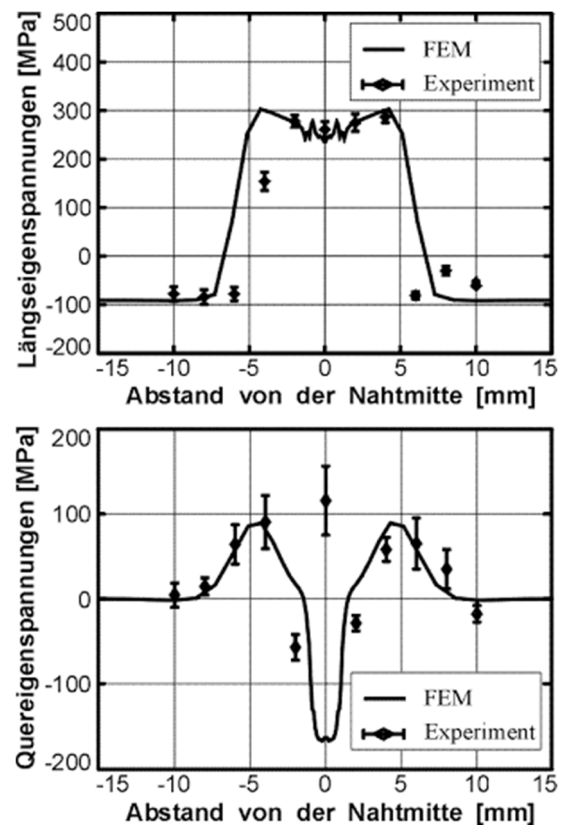


Bild 3: Eigenspannungen in einer Schweissnaht (aus [9])

2.2 Vibrationen von Werkstücken

2.2.1 Freie Schwingungen

Wird das Werkstück an einer Stelle ausgelenkt oder wird eine Punktlast schlagartig verändert, kommt es zu einer freien Schwingung des Werkstücks, z. B. bei einer Glocke nach dem Hammerschlag. Das nun sich einstellende Schwingungsmuster ist gegeben durch eine Überlagerung von Eigenschwingungen, die durch die Massenverteilung und die Materialsteifigkeit bestimmt werden. Dabei ist die Schwingungsperiodizität eine Kombination aus Eigenfrequenzen. Beim Hammering-Relaxation-Verfahren wird diese Art der Vibration mehrmals hintereinander angeregt.

2.2.2 Erzwungenen Schwingungen

Die erzwungene Schwingung ist die Bewegung, die das Werkstück aufgrund einer zeitabhängigen äußeren Anregung ausführt. Ist die Anregung periodisch, geht die erzwungene Schwingung nach einem Einschwingvorgang allmählich in die stationäre erzwungene Schwingung über. Bei der stationären erzwungenen Schwingung vollführt das Werkstück eine periodische Schwingung, deren Frequenz, unabhängig von seinen Eigenfrequenzen, nur durch die äußere Anregung gegeben ist. Dabei schwingt das Werkstück mit einer zeitlich konstanten Amplitude, die besonders große Werte hat, wenn das Werkstück nur schwach gedämpft ist und die Anregungsfrequenz in der Nähe einer Eigenfrequenz liegt (siehe Resonanz). Beim Vibrationsentspannen wird eine solche erzwungene Schwingung typischerweise durch eine periodische Kraft hervorgerufen. Dabei gibt es eine Vielzahl von Einflussfaktoren, welche das erzeugte Schwingungsmuster des Werkstücks beeinflussen: Geometrie des Werkstücks, Materialsteifigkeit, Massenverteilung, Ort und Ausrichtung der Anregung, Frequenz, Amplitude, etc. Daher sind allgemeine Aussagen zum erzeugten Schwingungsmuster nur bei bekannten Einflussfaktoren möglich.

2.2.3 Resonanz

Wird das Werkstück nun in einer der Eigenfrequenzen angeregt, so entsteht eine sehr starke Schwingung, bei der die auftretenden Amplituden sehr hoch werden können. Die Amplitude wird dabei stark von der Dämpfung begrenzt und weniger von der Anregungsamplitude. Beim Vibrationsentspannen wird durch kontinuierliche Variation der Anregungsfrequenz die Eigenfrequenzen ermittelt, indem die erzeugten Amplituden an einzelnen Messstellen durch Beschleunigungssensoren gemessen werden: Bei konstanter Anregungsamplitude sind die Amplituden der Werkstückschwingung an den Messstellen bei Erreichen einer Resonanzfrequenz überhöht.

3 LITERATURRECHERCHE

3.1 Allgemeine Recherche

3.1.1 Ursachen von Eigenspannungen in Werkstücken

Einen Überblick über Ursachen und Art von Eigenspannungen (Stand Mitte 1990er Jahre) wird z. B. in [10] gegeben. Dort werden folgende Ursachen aufgeführt:

- 1) Mechanische Einflüsse: plastische Umformung wie z. B. beim Kaltwalzen, Richten, Ziehen, etc.
- 2) Thermische Einflüsse: bei unterschiedlicher Abkühlung aus Temperaturen oberhalb der Fließspannung
- 3) Gefügeveränderungen infolge der unterschiedlichen Volumina der einzelnen Phasen im Gefüge

3.1.2 Messverfahren zur Ermittlung von Eigenspannungen

Einen Überblick über Messverfahren zur Bestimmung der Eigenspannungen (Stand Mitte 1990er Jahre) wird z. B. in [10] gegeben. Dort werden folgende Verfahren näher dargestellt:

- 1) Röntgen-Beugung (X-Ray diffraction)
- 2) Mikromagnetische Methode (Barkhausenrauschen)
- 3) Ultraschall-Methode
- 4) Mechanische Verfahren
 - a. Abtragverfahren
 - b. Bohrloch-Methode
 - c. Crack-Compliance-Methode

Damals noch nicht vorgestellt wurde die Neutronen-Beugung und die Digitale Bildanalyse. In [11] diskutieren Jurcius et al die Anwendung dieser Methoden zur Bestimmung der Eigenspannungen in Schweißnähten. Allen Methoden gemeinsam ist die Tatsache, dass primär die Eigendehnungen oder die bleibenden Verformungen des Werkstückes beobachtet werden. Die Spannungen werden dann mit einem Spannungs-Dehnungs-Gesetz, d.h. über Elastizitätskonstanten berechnet.

3.1.2.1 Röntgen-Beugung (X-Ray Diffraction XRD)

Dieses Verfahren wurde in den Studien von Munsu et al intensiv für die Ermittlung von Eigenspannungen verwendet [12-20]. Das Verfahren benützt die Beugung von Röntgenstrahlen an kristallinen Strukturen, s. Bild 4. Das Verfahren erlaubt nur die Beobachtung von oberflächennahen Schichten, da die Eindringtiefe der Strahlen begrenzt ist. Konventionelle Röntgenstrahlen dringen in Metallen wie Stahl einige Mikrometer tief ein, s. Bild 5. Für die Verwendung dieser zerstörungsfreien Prüfmethode für die Messung von Eigenspannungen ist eine mehrstufige Kalibration notwendig. Munsu hat eine solche Kalibration für seine Anlage und das in seinen Studien verwendete Material (Stahl BS970 080A15) vorgenommen [12]. Da mit der Röntgenbeugung in erster Linie eine Veränderung des Atomabstandes in einem Gitter gemessen wird, muss diese Primärinformation mit einem elastischen Modul in eine Spannung umgerechnet werden. Diese Umrechnung ist für jedes Material angepasst vorzunehmen. Bei vollständig kalibrierter Messmethode können die Eigenspannungen auf ca. ± 7 MPa genau bestimmt werden. Normalerweise wird mit einer Genauigkeit von ± 20 MPa gerechnet. Die örtliche Auflösung der Messung liegt bei ca. 0.1 mm. Für eine zuverlässige Messung muss die Oberfläche der Probe poliert werden.

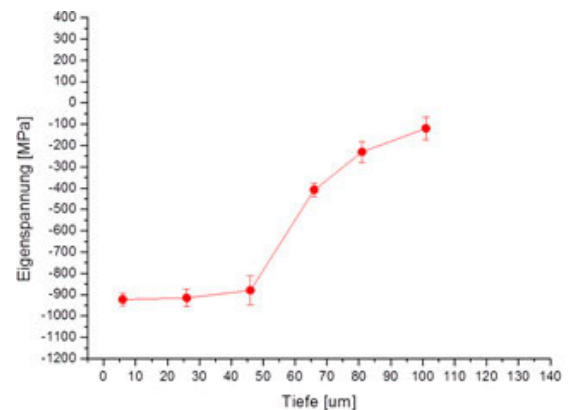
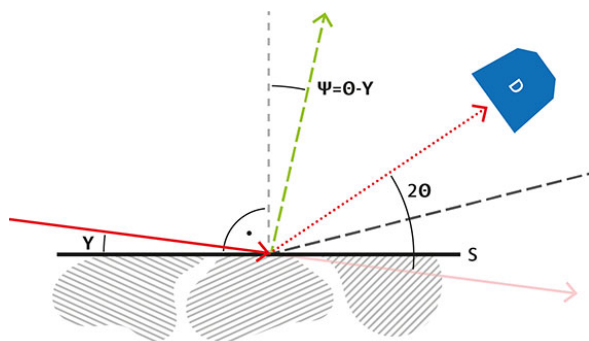


Bild 4: Strahlengang der Röntgenstrahlung (rot) von Röntgenröhre über die Probe (S) zum Detektor (D) bei der XRD unter streifendem Einfall für oberflächensensitive Untersuchungen (aus <https://www.fem-online.de/de/content/r-ntgendiffraktometrie-xrd>)

Bild 5: Auswertung einer XRD-Messung – Eigenspannungsverlauf im Oberflächenbereich bis ca. 100µm, (aus <https://www.fem-online.de/de/content/r-ntgendiffraktometrie-xrd>)

3.1.2.2 Bohrloch-Methode

Die Bohrloch-Methode basiert auf Messungen der Dehnungsveränderung im Material, wenn neben der Dehnmessstelle ein Loch ins Material gebohrt wird, s. Bild 6. Aus der Veränderung der Dehnung und bei Annahme von der Spannungsverteilung um ein Bohrloch können punktuell Eigenspannungen gemessen werden. Das Verfahren hat z. B. Shankar angewendet und diskutiert [21]. Das Verfahren ist auch standardisiert, s. ASTM E837 [22]. Nachteilig ist die beschränkte Genauigkeit, insbesondere wenn Spannungen nahe an der Fließgrenze vorkommen; dies hat Shankar im Detail diskutiert [21]. Auch Weiss nutzt diese Technik um die Vibrationsentspannung an Schweißnähten zu untersuchen [23].

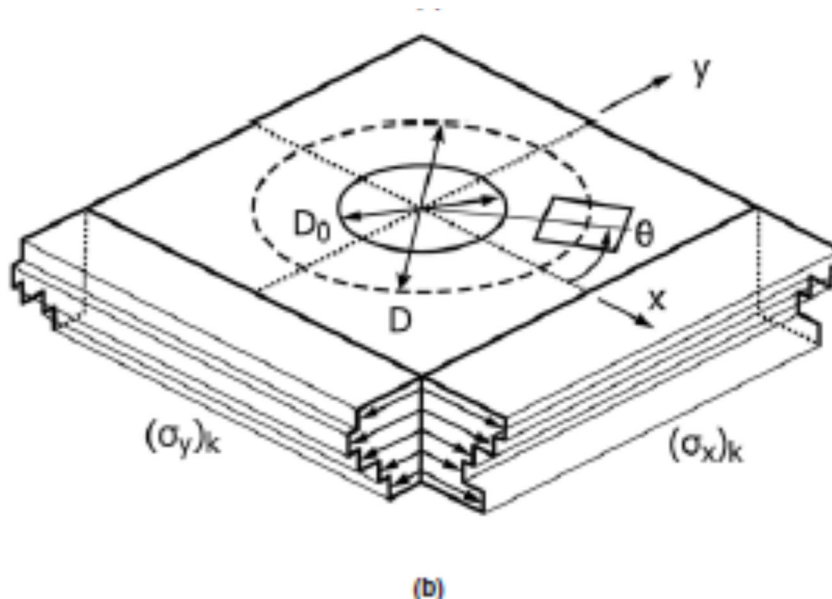


Bild 6: Messung der Eigenspannungen mit der Bohrloch-Methode (aus [22])

3.1.2.3 *Barkhausenrauschen*

Diese Methode basiert auf der Analyse der Hystereseschleife bei der Magnetisierung ferromagnetischer Metalle. In [10] wird das Verfahren vorgestellt.

3.1.2.4 *Ultraschall*

Diese Methode nutzt die Eigenschaft, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Ultraschallwellen von den Eigenspannungen abhängig ist, s. [10]. In [24] hat Lüthi gezeigt, wie man mittels Ultraschall die Eigenspannungen in der Nähe einer Schweissnaht bestimmen kann.

3.1.2.5 *Synchrotron-Beugung / Neutronen-Beugung*

Wie die Röntgen-Diffraktometer-Technologie können Eigenspannungen auch mit andern Strahlungen vorgenommen werden. Da sind nebst Röntgen-Strahlen die Synchrotronstrahlen und die Neutronenstrahlen interessant. Während die klassischen Röntgenstrahlen eine Eindringtiefe in Stahl von lediglich 10 µm aufweisen kann man mit Synchrotronstrahlung immerhin bis in eine Tiefe von 200 µm einstrahlen. Mit Neutronenstrahlen erreicht man Tiefen von 50 bis 100 mm, s. [25]. Die POLDI-Anlage am Paul Scherrer Institut (PSI) ist eine solche Anlage, s. [25]. In dieser können auch grosse Werkstücke untersucht werden, was die Firma Wiap AG Ende 2018 bereits einmal gemacht hat [26].

3.1.2.6 *Messverfahren gemäss Patentschrift Wiap AG*

Die Wiap AG hat eine eigene Messmethode zur Bestimmung von Eigenspannungen entwickelt und zum Patent angemeldet [27]. Der Patentanspruch beschreibt, dass mit der Messung der Verschiebung und Veränderung der gemessenen Beschleunigung an einer oder mehrerer Messstellen auf den dort herrschenden Eigenspannungszustand geschlossen werden könne. Wie das physikalisch begründet sein soll, wird in der Patentschrift [5] nicht erläutert.

3.1.3 **Art und Messung von Vibrationen in Werkstücken**

3.1.3.1 *Beschleunigungssensoren (accelerometer)*

Beschleunigungssensoren sind weitverbreitete zuverlässige Sensoren, die eine örtliche Beschleunigung in eine bestimmte Richtung anzeigen. Falls man nun viele solche Sensoren an einem Werkstück anbringt, kann man Stellen mit hoher Beschleunigung lokalisieren. Die örtliche Verteilung von solchen Hot-spots gibt eine qualitative Beschreibung des Vibrationsmusters des Werkstückes. Das MEMV[®]-Verfahren der Firma Wiap AG benutzt solche Beschleunigungssensoren für die Steuerung des Eigenspannungsabbaus mittels Vibration [2, 3].

3.1.3.2 *Partikel-Rütteln (Chladni-Klangfiguren)*

Chladni-Klangfiguren zeigen mittels frei beweglichen Partikeln Knotenlinien auf ebenen Schwingungsplatten an, s. Bild 7. Das MEMV[®]-Verfahren der Firma Wiap AG beschreibt diese Art der Schwingungsvisualisierung [2, 3].



Bild 7: Visualisierung von Schwingungsformen mittels Sandpartikeln (Chladni-Klangfiguren) (aus <https://www.leifiphysik.de/atomphysik/quantenmech-atommmodell/versuche/chladni-figuren>)

3.1.3.3 *Digitale Bildkorrelation*

Digitale Bildkorrelation kann zur Darstellung der Bewegungen an Oberflächen verwendet werden, s. z. B. [28]. Die Analyse der gleichen Struktur vor und während der Belastung lässt auch die Deformation resp. daraus errechnet die Dehnung bestimmen.

3.1.4 **Allgemeine Publikationen und Beschreibung von VSR-Verfahren**

3.1.4.1 *Das VSR-Verfahren im allgemeine*

Zum Begriff Vibratory Stress Relief gibt es im Wikipedia einen (largely unverified) Artikel, s. [29]. In diesem Artikel werden Anwendungsfelder genannt, Eigenspannungen erläutert und auf deren Einfluss auf die Formstabilität hingewiesen. Bei den Verfahren würden die Werkstücke in Resonanz oder nahe daran vibriert. Die Effektivität des Verfahrens sei fragwürdig und es wird bezweifelt, dass die niedrigen Dehnungsamplituden (im Bereich von high cycle fatigue) den gewünschten Relaxationseffekt auslösen könnten. Würden höhere Amplituden angewendet, würde man Materialermüdung (fatigue) auslösen, was kontraproduktiv sei.

In einem Medienbericht in der Zeitschrift Schweizerischer Maschinenmarkt [30] werden die Vorteile des VSR-Verfahrens im Vergleich mit thermischen Verfahren (Energieeffizienz, Zeitersparnis, etc.) erwähnt. Anhaltspunkte zum Mechanismus werden keine gegeben. Im Internet wird das VSR-Verfahren auch von der Firma Advancedvsr aus Philadelphia, USA angepriesen [31]. Sie behaupten sogar, das VSR-Verfahren erfunden zu haben ("we invented the VSR process"). Auch die Firma VSR Technology Group, ebenfalls aus Philadelphia, USA vermarktet das Verfahren [32]. Diese Firma stellt auch in Ihrer "Vibratory Stress Relief Library" diverse Publikationen als Reprint zur Verfügung. In Deutschland vertreibt die Firma VSR Industrietechnik GmbH aus Duisburg eine Vibrationsentspannungsanlage. Dies wird in einem Kurzartikel von Mücke kurz vorgestellt [33]. Ein weiterer Anbieter ist Flex Tool Equipment Pvt. Ltd. in Maharashtra (Indien) [34].

3.1.4.2 *Anwendung des VSR-Verfahrens bei der Firma Wiap AG*

Bei der Firma Wiap AG wurde das VSR-Verfahren angewendet. Im Rahmen der Diplomarbeit von M. Fabbroni wurden praktische Versuche mit einer Anlage der Wiap AG (Stand 1999) durchgeführt. Dabei wurde eine einfache Vibrationsanordnung gewählt mit einem Exzenter. Die Versuche wurden an Stahlteilen vorgenommen, die teilweise beim Spannungsarmglühen deutliche Verformungen zeigten. Beim Vibrationsentspannen konnten jedoch bei solchen Teilen keine Verformung festgestellt werden.

3.1.4.3 *Das MEMV[®]-Verfahren der Firma Wiap AG*

Das VSR-Verfahren wurde ab 2008 bei der Firma Wiap AG weiter entwickelt und 2014 erstmals zum Patent angemeldet [2]. Das Patent wurde 2017 erteilt [3]. Eine erneute Patentanmeldung zu einem verbesserten Verfahren erfolgte 2019 [35] (das entsprechende Patent wurde noch nicht erteilt). Im Jahre 2017 erfolgte eine dritte Patentanmeldung für eine Vorrichtung zur Vibrationsentspannung. Das entsprechende Schweiz. Patent wurde 2021 erteilt [36]. In diesen Dokumenten wird das Verfahren und die dabei benötigten Vorrichtungen im allgemeinen beschrieben. Es werden auch typische Werte wie Frequenz (Drehzahl des Exzenters), Beschleunigungs- und Auslenkungs-Amplituden und Vibrationsdauer angegeben. Die gleichzeitige oder zeitlich hintereinander geschaltete Anregung in mehreren der drei Raumrichtungen ("dreidimensionales Vibrieren") wird als herausragende Eigenschaft des Verfahrens herausgestrichen; dies insbesondere mit dem Ziel, alle Bereiche mit Eigenspannungen ("Spannungszonen und Knotenpunkte") erreichen zu können. Zur Überwachung und Steuerung der Vibration werden mehrere auf dem Werkstück angebrachte Beschleunigungssensoren eingesetzt. Zum Mechanismus des Eigenspannungsabbaus wird folgende Aussage gemacht: "Dadurch (d.h. durch die Vibration) werden mindestens Spannungen in der Nähe einer zyklischen 0.1-Dehngrenze erreicht, um sowohl die makroskopischen als auch die mikroskopischen Eigenspannungen im Werkstück abzubauen". Eine Eigenheit des Verfahrens sei, dass "beim Vibrieren die Eigenspannungen über das ganze Werkstück in ein Gleichgewicht gebracht werden, also nicht nur an der Oberfläche" (im Vergleich mit welchem Verfahren?). Der Abbau der Eigenspannungen sei zu Beginn der Vibration am stärksten und flache dann schnell ab.

Das Verfahren bedinge, gemäss Patentschrift [35], mind. das lokale Überschreiten der Fließgrenze um die Eigenspannungen erster Art abzubauen. Anwendungen auf Eisen, Stahl, Aluminium, Titan, Bundmetallen, und Gussteile sei möglich.

In einer Projektarbeit von Absolventen einer Technikerschule wurde eine Wiap-Anlage für grosse Wellen angewendet [37]. In dieser Arbeit wird unter anderem das praktische Vorgehen bei der Anwendung des MEMV®-Verfahrens beschrieben.

3.2 Wissenschaftliche Literaturrecherche

3.2.1 Frühere Literatur-Studien

Bühler und Pfalzgraf haben 1962 in der Einleitung zu ihrer Studie eine gute Übersicht zum damaligen Wissensstand gegeben [38]. In der Dissertation von Dawson wird eine Literaturübersicht (Stand 1975) gegeben [39]. Dies hat dann Gnirss Mitte der 80er-Jahre erneut gemacht und eine gute Übersicht über den Stand der Technik wiedergegeben [40, 41]. R.A. Claxton schrieb 1991 ein zweiteiliges Review über VSR im Journal Heat Treatment of Metals [42, 43]. Während Bühler & Pfalzgraf, Dawson und Gnirss unabhängige Wissenschaftler waren, muss bei Claxton angenommen werden, dass er nicht ganz unbefangen war, da er selber den Prozess als Mitarbeiter resp. Consultant der Firma Vsrtechnology vermarktete. Das Review von Claxton beschreibt zudem v.a. phänomenologische und betriebswirtschaftliche Erfahrungen, d.h. Ergebnisse von praktischen Versuchen und Kundenrückmeldungen. Es beinhaltet auch einige fragwürdige Aussagen (Bsp.: thermischer Spannungsabbau würde zu Reduktion der Steifigkeit führen). Im Jahre 1999 hat ein Student der Fachhochschule St. Gallen eine Literaturstudie durchgeführt [44]. M. Fabbroni zeigte darin, dass das Thema VSR auch nach gut 6 Jahrzehnten weiterhin kontrovers diskutiert wird, und zu verschiedenen Fragestellungen weiterhin keine klaren Aussagen möglich sind [Bem.: der Autor versucht aber auch zu wenig, klar ersichtliche Tendenzen oder Mehrheits-Meinungen herauszustreichen; er findet zu vielen Fragen Aussagen im Sinn von "Ja, aber ..."]. Viele in diesen vorangegangenen Literaturstudien diskutierten Quellen haben auch wir erneut gefunden und in unsere Recherche aufgenommen. Unabhängig von Schlussfolgerungen der vorangegangenen Reviews haben wir nochmals diese Quellen konsultiert und aus unserer Perspektive zusammengefasst und bewertet.

3.2.2 Suchkriterien und Schlüsselbegriffe der Literaturrecherche

Die Hauptfragestellungen der Studie wurde wie folgt der Literatur-Abfrage zu Grunde gelegt.

- 1) Auf welchen physikalischen Mechanismen beruht der Effekte von Vibrationen auf den Abbau von Eigenspannungen in metallischen Werkstücken?
- 2) Gibt es Modelle, die den Effekt beschreiben?
- 3) Gibt es computer-unterstützte Methoden zur Prognose des Effektes?

Dabei wurden die deutschen Begriffen wie folgt durch englische Begriffe ersetzt:

- 1) Metall entspannen mit Vibration → *vibratory stress relief*
- 2) Wellen, Schwingungen, Vibrationen → *waves, oscillations, vibrations*
- 3) Eigenspannungen → *residual stresses*

Die Literatur-Recherche wurde mit der on-line Datenbank Scopus (<https://www.scopus.com/home.uri>) zwischen Mitte November und Mitte Dezember 2020 durchgeführt. Die dabei verwendeten Suchbegriffe waren:

- 1) *vibratory stress relief* oder *reduction of residual stresses*
- 2) *metal constructions* oder *metal parts* oder *steel parts* oder *aluminium parts*
- 3) *measurements of residual stresses*

Die gefundenen Publikationen wurden in drei Kategorien eingeteilt:

- 1) Literatur zu empirischen Erfahrungen mit Vibratory Stress Relief
- 2) Literatur zu wissenschaftlichen Studien zu Vibratory Stress Relief
- 3) Literatur zu Theorien des Vibratory Stress Relief

Die gefundenen Publikationen wurden in einer Endnote-Datenbank erfasst und dem Industrie-Partner als online Datenbank zur Verfügung gestellt.

3.2.3 Literatur zu empirischen Erfahrungen mit Vibratory Stress Relief

Die früheste Publikation, welche sich mit der gezielten Anwendung von Vibrationen zum Eigenspannungsabbau resp. zur Formstabilisierung von Werkstücken befasste, ist diejenige von McGoldrick und Saunders 1943 [45]. Diese beschreiben, wie an Einbettungen für Eisenbahnschienen als auch an ganzen geschweissten Fachwerken (Brücken) Vibrationen nahe der Resonanzfrequenz während Stunden aufgebracht wurden. Ein Nachweis, dass dabei Eigenspannungen abgebaut werden, geben die Autoren jedoch nicht. Es bleibt bei der Beschreibung der Schwingungsbehandlung und der Vermutung, dass dabei Eigenspannungen abgebaut würden und damit eine gute Formstabilität im Einsatz erreicht werden kann. Es werden auch verwandte Verfahren beschrieben: das *Aging* im Freien resp. im Betrieb und das *Hammering Relaxation*. Beim *Aging* werden Werkstücke im Freien während mehreren Jahren gelagert. Durch die Temperaturschwankungen sollen dabei relaxierende Effekte ähnlich denjenigen beim Warmauslagern, jedoch viel langsamer, stattfinden. Beim *Hammering* sollen Schläge durch das Bearbeiten mit einem Hammer oder beim Transport über unebenes Gelände einen relaxierenden Effekt haben. Sogar die Wellenbewegungen bei Schiffen im Einsatz sollen helfen, Eigenspannungen in der Schiffstruktur abzubauen. Diese Narrative finden sich immer wieder in späteren Publikationen, mal als praktische Beweise, dass das Verfahren wirkt, mal eher als "Black Magic", das von Ingenieuren und Metallurgen nicht verstanden würde, s. [46].

Dreger berichtet 1978 in einem Journal für Anwender vom erfolgreichen, in Europa und der Sowjetunion weit verbreiteten Einsatz des Vibrationsentspannens bei grossen geschweissten Werkstücken [46]. Interessant darin ist die Behauptung, dass beim VSR keine metallurgischen Veränderungen stattfinden würden. Es wird auch kurz auf die bereits in [45] beschriebenen verwandten Verfahren (*Aging*, *Hammer Relaxation*) hingewiesen. Erwähnt werden im weiteren Versuche mit der Trommelstein-Behandlung (*Barrel Tumbling*), welche ähnliche Effekte an kleineren Werkstücken auslösen sollen. Weiter werden Materialklassen angegeben, bei denen das Verfahren wirken soll (Grau- und Kugelgraphit-Eisenguss, Baustahl, hochfester-niedriglegierter Stahl, Edelstahl, transformationsgehärteter Stahl, nicht warmausgelagerte Legierungen, warmausgelagerte Aluminium-, Eisen-, Kobalt-, und Nickellegierungen) und bei welchen das Verfahren nicht wirkt (Nickel, Aluminium, Titan). Auch erwähnt wird, dass das Verfahren für Eigenspannungen hervorgerufen durch Kaltverformung (*Cold Working*) Kaltwalzen, Kaltziehen, Kaltdrehen, Kaltstrecken nicht funktioniert.

Döbler hat 1981 ein Erfahrungsbericht aus der praktischen Anwendung bei grossen geschweissten Werkstücken in einem Anwender-Journal publiziert [47]. Gemäss seinen Erfahrungen sei das Vibrationsentspannen bei deutlich günstigeren Kosten und Zeitverhältnissen gleich wirksam wie das Glühen. Die Formstabilität sei mindestens gleich gut wie nach dem thermischen Entspannen.

Klauba und Adams [48] haben 1982 eine Rundfrage bei den nordamerikanischen Metallbauern vorgenommen und berichten qualitativ über die Erfahrungen der Anwender. Sie behaupten, dass beim Vibrieren keine metallurgischen Veränderungen stattfinden, die die mechanischen Eigenschaften inkl. Ermüdungsfestigkeit beeinflussen würden. Einige Jahre später berichten Sie von der erfolgreichen Anwendung des VSR-Verfahrens, um die Geometriestabilität von grossen Maschinen-Lagern zu erreichen, ohne jedoch detaillierter Angaben zum Verfahren selbst zu machen [49]. Sie geben den Hinweis, dass die Wirkung mit der Beobachtung der Amplitude bei Resonanz überprüft werden kann und dass Eigenspannungen mit einer Härteprüfung bestimmt werden können.

Gifford berichtet in einem kurzen Beitrag über deren Versuch, den Effekt von VSR an einer geschweissten Konstruktion zu messen [50]. Er berichtet, dass die Vibrationsspannungen (± 31 MPa) deutlich geringer sind als die maximalen lokalen Eigenspannungen ($+305$ MPa) an der Schweissnaht. Sie konnten keinen Effekt

mit der Bohrloch-Methode messen, meinten aber, dass der Abstand der Messstelle zu weit weg von der Schweissnaht gewählt worden sei.

In verschiedenen Erfahrungsberichten der Firma Wiap AG ist dokumentiert, bei welchen Werkstücken die Anwendung des VSR- resp. des MEMV[®]-Verfahrens eine gute Wirkung erzielt hat [51]. Dabei wird die Wirkung stets beurteilt durch die gute Formstabilität des behandelten Werkstückes im Vergleich mit gleichen Werkstücken, bei denen das VSR- resp. MEMV[®]-Verfahren nicht angewendet wurde. Dies ist eine indirekte Wirkungsüberprüfung, da auf ein Effekt abgestützt wird (Verformung) der vom Eigenspannungszustand abhängt. Es fehlen jedoch Informationen, die die direkte Wirkung der Vibration auf den Eigenspannungszustand zeigen würde, d.h. die Veränderung der Eigenspannungen während dem Vibrationsvorgangs. Als Signal der Wirkung der Vibration auf die Eigenspannungen werden abnehmende Amplituden an den von den Beschleunigungssensoren gemessenen Stellen herangezogen. In Entwicklungstests soll gezeigt worden sein, dass durch die Anregung in allen drei Raumrichtungen alle Spannungszonen und Knotenpunkte erreicht und wirksam entspannt werden konnten.

3.2.4 Literatur zu wissenschaftlichen Studien zu Vibratory Stress Relief

Anfangs der 1960er Jahren waren nach Bühler und Pfalzgraf [38] bereits Vibrationsgeräte (Rüttelgeräte) bei Giessereien im Einsatz. Der Nachweis der Wirksamkeit von schwingenden Belastungen im Bereich der Dauerschwingfestigkeit (bezüglich der gewählten Amplitude während der Schwingbelastung) war zu der Zeit für die Autoren durch experimentelle Befunde an geschweissten Konstruktionen gegeben. Hingegen war der Nachweis für Rüttelbewegungen mit geringer Amplitude zu der Zeit noch nicht erbracht. Insbesondere streichen sie hervor, dass durch Beobachtung der Formstabilität (kein weiterer Verzug des Werkstücks bei spanabhebender oder trennender Bearbeitung) kein Beweis erbracht ist, dass Eigenspannungen abgebaut wurden. Interessant ist der Hinweis, dass bei diesen niedrigen Belastungen makroskopisch das Material noch im elastischen Bereich verformt wird, trotzdem für einzelne Körner durchaus schon plastische Verformungen eintreten können. Diese Interpretation zeigt, dass sie die Vermutung hatten, dass beim Vibrationsentspannen mit tiefen Amplituden ein Abbau von Eigenspannungen 2. Art stattfindet. Ihre Studie ist eine bemerkenswert umfangreiche Arbeit, bei der sowohl das Material (Grauguss GG-18, GG-22, Stahl St 37) als auch die Konstruktionsart (Guss, Schweisskonstruktion) unter vergleichbaren Bedingungen untersucht wurden. Verwendet wurden dabei zwei Rüttelgeräte und ein Pulsator. Auch unterschiedliche Probenformen (Vollrundproben, Hohlrundproben, Vierkantproben, Ringproben, Gussstück und Schweissnaht in einer Flachprobe) wurden untersucht. Aus dieser Fülle von Varianten können hier nur die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst werden. Als Kontrollgruppe wurde auch der Effekt von thermischem Entspannen (Glühen 2 Std bei 550°C) sowie von 2-jähriger Lagerung im Freien dokumentiert. Während erstere Behandlung eine fast vollständige Entspannung gebracht hat, gibt es bei der Lagerung im Freien keine messbare Veränderung. Das Vibrationsentspannen war für beide Werkstücke aus Grauguss unwirksam (s. Seite 37 – 39) oder die Schwingungsamplitude war so hoch, dass Schwingungsbrüche auftraten. Bei der geschweissten Flachprobe (s. Bild 8) konnte unter Biegevibrationen ein Eigenspannungsabbau von 40 % festgestellt werden, s. Bild 9. Dazu mussten jedoch recht hohe Amplituden gewählt werden und die Vibrationsbelastung musste in die Richtung der Zugeigenspannungen gerichtet sein (S. 41). Die Auswertung hat auch ergeben, dass die Oberlast (Mittellast + Amplitude) die wichtigste Einflussgrösse darstellt. Diese muss in der Grössenordnung der Fliessspannung liegen.

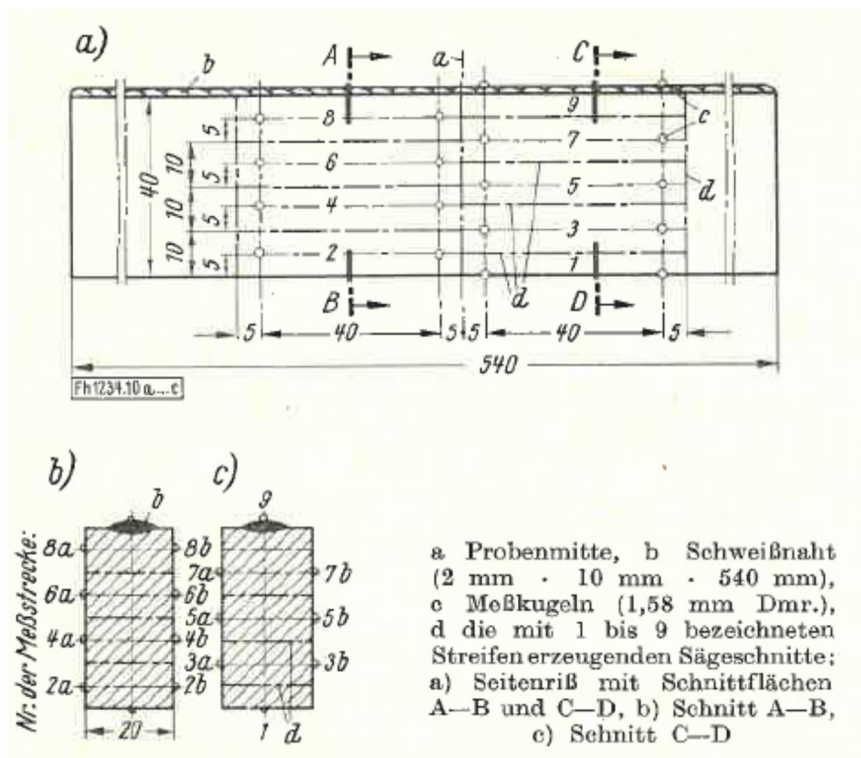


Bild 8: Flachstabprobe aus St 37 mit Schweissnaht und Messpunkten (aus [38])

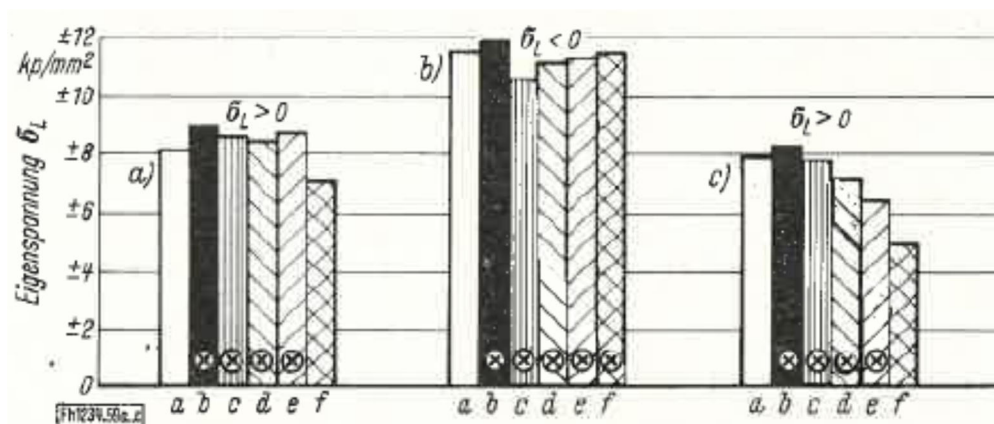


Bild 59a bis e. Gegenüberstellung der durchschnittlichen Eigenspannungshöchstwerte der mit Biegebeanspruchung gerüttelten Proben der Reihe S.

σ_L und schrägliegende Kreuze wie bei Bild 58a und b, Beanspruchungsbedingungen nach Tafel 17, a nicht gerüttelte Proben, b und c mit Rüttler I zugdruck- bzw. biegebeanspruchte Proben, d bis f mit Rüttler II bei einer Unwuchtkraft von 350, 700 bis 1000 bzw. 1300 kp biegebeanspruchte Proben; a) Meßstrecken 1 und 2 auf der Probenunterseite, b) Meßstrecke 5 in der Probenmitte, c) Meßstrecken 8 und 9 auf der Schweißraupenseite

Bild 9: Effekt der Vibrationsbehandlung an Flachstabprobe aus St 37 mit Schweissnaht und Messpunkten (aus [38]): Eine statistisch signifikante Abnahme der Eigenspannung ist nur für die Behandlung mit grosser Unwucht 1300kp auf Biegung gefunden worden ("f")

Dawson hat 1975 eine Dissertation an der Universität von Liverpool abgeschlossen [39]. Seine wichtigsten Ergebnissen hat er dann 1980 zusammen mit Moffat in einem Paper veröffentlicht [52].

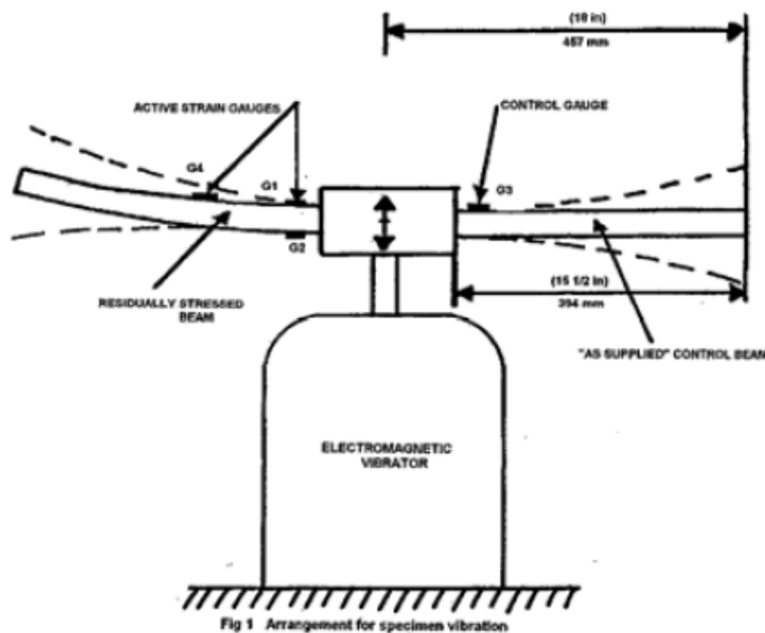


Bild 10: Vibrationsprüfeinrichtung von Dawson (aus [39]).

Dawson untersuchte drei Materialien: Ein warmgewalzter Stahl, ein kaltgewalzter Stahl und eine Aluminium-Legierung. Er verwendete einfache Biegebalken, welche auf einem Vibrator geklemmt wurden, s. Bild 10. Damit untersuchte er das Materialverhalten unter Biegevibration. Er beobachtete die Eigenspannungsveränderungen mittels Dehnmessstreifen. Auch die bleibende Deformation war für ihn ein wichtiger Beobachtungsparameter. Er variierte nun die Vibration systematisch und hat dabei stets die Dehnungsamplitude als Parameter erfasst. Die Belastungen war relative hoch, so dass zyklische elasto-plastische Verformungen an der Probenoberfläche stattfanden. Dabei hat er auch eine Veränderung der Materialeigenschaften festgestellt: Es kommt zu zyklischer Entfestigung, resp. Verfestigung. Die Abnahme der Eigenspannungen an der Oberfläche sind in den ersten Zyklen sehr markant, nehmen dann in den weiteren 1000 Zyklen weiter ab und kommen dann zum Stillstand. Um einen Effekt auslösen zu können müssen dabei die Amplituden im Bereich der Dauerwechselfestigkeit des Materials gewählt werden. Dass dabei eine Ermüdungsschädigung in Kauf genommen werden muss diskutiert er im Detail. Er kommt zum Schluss, dass der Eigenspannungsabminderungseffekt nach max. 10^4 Zyklen vollständig abgelaufen ist und eine weitere Vibration nur noch schädlich sein würde. Die bis dann eingebrachte Ermüdungsschädigung quantifiziert er mit bis zu 25%. Die Abhängigkeit des Spannungsabbau von der Vibrationsamplitude für die drei Materialien fasst er in einem normierten Diagramm zusammen, s. Bild 11. Als Mechanismus des VSR-Effektes diskutiert er zyklische elasto-plastische Verformungen resp. zyklische Relaxation bei gleichzeitiger zyklischer Material Ent- oder Verfestigung. Er betont, dass bei der Beurteilung der Dehnungsamplitude nicht die quasistatischen Materialeigenschaften zum Vergleich herangezogen werden sollen, sondern die zyklischen Materialeigenschaften.

Er bemerkt zudem, dass eine Veränderung der Eigenspannungen an der Oberfläche nicht zwingend zu einer bleibenden Verformung des Biegebalken führen muss. Solange die Zone der plastischen Veränderungen klein sei im Vergleich mit dem elastisch verformten Kern, führe dies nur zu einer inneren Umverteilung der Eigenspannungen. Erst wenn die Plastifizierung grosse Bereiche erfasse, komme es zu bleibenden Verformungen des ganzen Balkens.

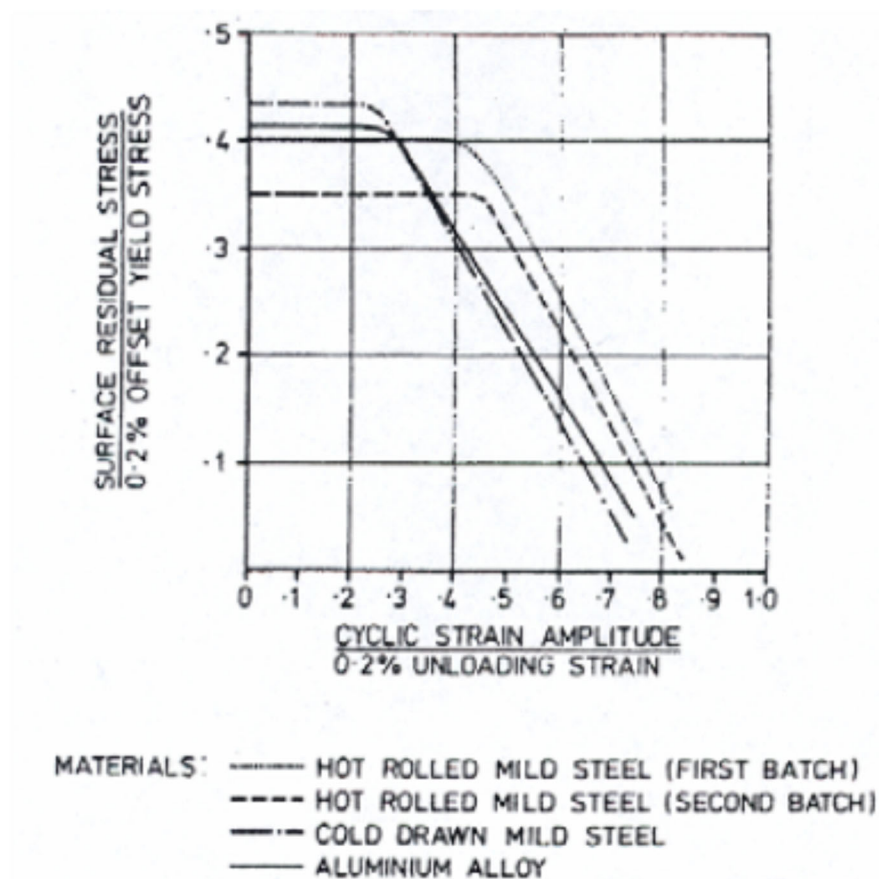


Bild 11: Effekt der Vibrationsbehandlung an Biegebalken (aus [39, 52]): Der Eigenspannungsabbau ist linear abhängig von der Vibrationsamplitude (normierte Dehnungsamplitude).

Zur Übertragbarkeit seiner Ergebnisse auf das Vibrationsentspannen ganzer Werkstücke äussert er sich kritisch: Bei Vibrationsentspannen von ganzen Werkstücken mit einem Exzenter seien die Dehnungsamplituden sehr unterschiedlich je nach Ort im Werkstück. Das Kontrollieren der richtigen Amplitude sei praktisch unmöglich¹.

In der Dissertation von Shankar von 1982 wurde das Vibrationsentspannen an Schweissnähten in einem Baustahl untersucht [21]. Die Veränderungen der Eigenspannungen im Bereich einer linienförmigen X-Naht, s. Bild 12 wurden mittels Bohrloch-Methode und Röntgen-Beugung vor und nach dem Vibrieren analysiert. Die Vibrationen wurden bei Resonanzfrequenz (40 Hz) unter darunter (10, 20 und 30 Hz) während 20 Minuten untersucht. Dabei konnte er zeigen, dass lokal an der Schweissnaht die Spitze der Eigenspannung von ca. 359 MPa auf 276 MPa also um 30 % reduziert werden konnten. Gefügeuntersuchungen haben dabei gezeigt, dass die Versetzungsdichte durch das Vibrieren signifikant erhöht wird. Shankar erklärt also das Vibrationsentspannen mit einer Modellvorstellung der Mikroplastizität. Diese habe die Fließgrenze erhöht jedoch keine Veränderung der Dauerwechselfestigkeit gezeigt; dies an Hand von statischen Tests und Ermüdungsversuchen mit vibrierten und nicht vibrierten Proben. Daher kommt Shankar zum Schluss, dass das Vibrieren zwar die statische Fließgrenze verändert aber keine Ermüdungsschädigung ins Material gebracht hat. Er findet vergleichbare Ergebnisse bei Zubchenko et al (1974,1976), Grudz et al (1972) als auch bei Weiss et al. ([23] 1976) Sowie Nedoseka (1974). Insbesondere in der Studie von Weiss wurden sehr hohe Spannungsamplituden während der Vibration angewendet (17 bis 40 ksi verglichen mit der Fließgrenze des Materials von 29 ksi), s. Bild 13 & 14. Interessant sind auch die Gedanken zu den Bewegungsmustern beim Vibrieren der Platte, s. Bild 15 und 16: Shankar betont, dass es Biege- und Torsionsverformungen braucht um die Eigenspannungen abbauen zu können; eine Ganzkörperbewegung, wie sie bei niedrigen Frequenzen (bis 30 Hz) zu beobachten seien, bringe keine Entspannung. Auch erwähnt er, dass die Wirkung gleichmässig

¹ Dies könnte allenfalls mit neuen Methoden, wie FEM abgeschätzt werden.

im Bauteil verteilt auftreten, was nur mit einer wandernden Welle und nicht mit einer stehenden Welle möglich sei. Das heisst, dass es nötig ist nicht genau in der Resonanz (stehende Welle) sondern leicht darunter zu vibrieren (wandernde Welle).

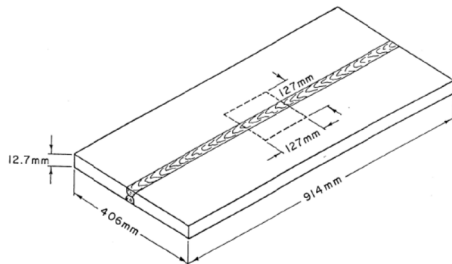


Bild 12: Plattenprobe aus Stahl (SAE 1018) mit Schweissnaht verwendet in der Dissertation von Shankar (aus [21]).

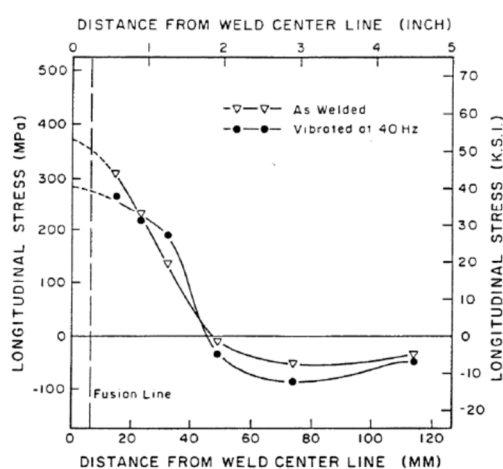


Bild 13: Eigenspannungsverteilung an der Schweissnaht mit der Bohrlochmethode gemessen (aus [21])

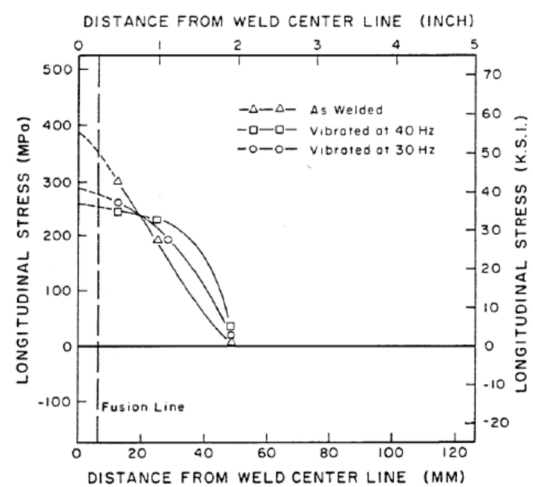


Bild 14: Eigenspannungsverteilung an der Schweissnaht mit der Abtragungsmethode gemessen (aus [21])

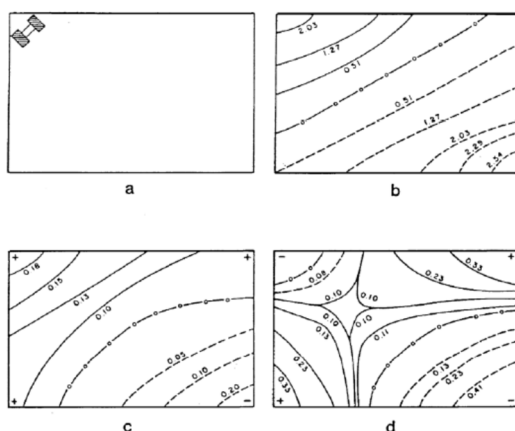


Bild 15: Amplitudenverteilung in der Plattenprobe (Chladni-Klangfiguren) für 10, 20 und 30 Hz Anregung in einer Ecke (aus [21]).

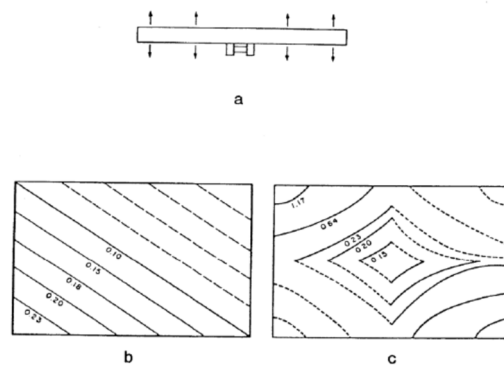


Bild 16: Amplitudenverteilung in der Plattenprobe (Chladni-Klangfiguren) für 10, 30 und 40 Hz Anregung im Zentrum der Platte (aus [21]).

Polnov und Mogil'ner haben eine Regressionsformel entwickelt für die Eigenspannungsabminderung in Schweissnähten basierend auf vibrierenden Balken [53]. Sie geben an, dass bei günstiger Amplituden und Zyklenzahl eine Reduktion der Eigenspannungen um 70 % an der Schweissnaht erreicht werden kann. Eine sehr gute Zusammenfassung über den Wissensstand Mitte der 1980er Jahre gibt Gnirss in [40] und wiederholt diese in [41, 54]. Er kommt zu folgenden Schlussfolgerungen: Einsatzfelder für das VSR, resp. erwartete Wirkungen sind: Dimensionsstabilisierung, Vermeiden von Spannungsrisskorrosion, Risikoreduktion beim Schweißen (?), Reduktion der Eigenspannungen beim Schweißen. Er sagt, dass die Amplitude ein Mindesthöhe erreichen muss, welche am ehesten unter Resonanz erreicht würde. Für ganze Komponenten sei die Wahl verschiedener Frequenzen erforderlich, um die hohen Amplituden nicht nur örtlich begrenzt zu erreichen. Bei den erforderlichen hohen Amplituden sei die Anzahl Zyklen (Vibrationszeit) kurz zu halten, um nicht Ermüdungsschäden zu provozieren. Als Mass für die integrale Wirkung des Vibrierens könnte sich die Abnahme der Dämpfung ergeben. Während der Effekt der besseren Formstabilität am ehesten überprüft werden könne, sei dies in den andern gewünschten Wirkungen schwieriger. Bei Serienproduktion könnte ev. über die Kontrolle des Motorstromes der Prozess überwacht werden. Es gebe jedoch noch viele offene Fragen, insbesondere betreffend der Übertragbarkeit der Ergebnisse von Versuchen an Kleinproben auf grosse Werkstücke.

Eine Mittelstellung zwischen Kleinproben und komplexeren Werkstücken nehmen die von Sun et al verwendeten Stangenprofile ein [55]. Sie haben 6 m lange Stangen (Durchmesser 12 cm) mit dem VSR-Verfahren behandelt. Sie haben dabei die Stahl-Stangen in Resonanz gebracht und haben die dabei entstehende stehende Welle mit Dehnmessstreifen gemessen. Die Messung der Eigenspannungen an der Oberfläche (-165MPa) konnten gleichmässig über die Längsachse um rund 80 MPa reduziert werden auf -87 MPa. Dieser Effekt, dass nicht nur dort wo die Vibration die grössten Spannungen erzeugen sondern auch an anderen Stellen des Stabes die Eigenspannungen abgebaut werden, erklären Sie mit der Versetzungsaktivität: Die Vibration löst dabei Versetzungsbewegungen aus, die sich dann im Bauteil ausbreiten. Sie nennen dies *double-dynamic mechanism*. Die Versetzungsaktivität hat auch die statischen Kennwerte (Flie遡grenze, Zugfestigkeit, Bruchdehnung und Einschnürung) um 3 bis 8 % verändert. Die gleichen Autoren haben auch flache Platten (880 mm x 256 mm x 4 mm) mit Schweissnähten mit dem VSR-Verfahren behandelt, s. Bild 17 & 18 [56]. Dabei konnten sie die Eigenspannung, welche vor der Behandlung im Bereich von ± 100 MPa lagen auf ± 25 MPa (+74/-49 MPa) reduzieren, s. Bild 19. Dies sei vergleichbar mit dem Resultat des Spannungsarmglühens. Beide Studien geben keine genaueren Angaben über das VSR-Verfahren. Die Schlussfolgerung kann teilweise nicht mit den Angaben der Messergebnisse nachvollzogen werden.

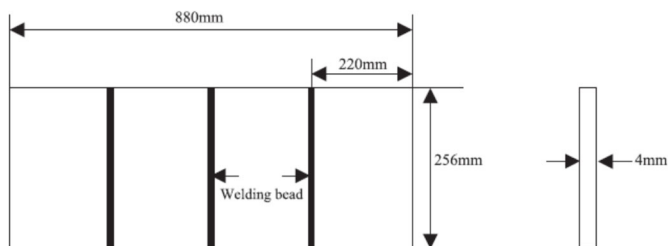


Bild 17: Plattenprobe mit Schweissnähten (aus [56])

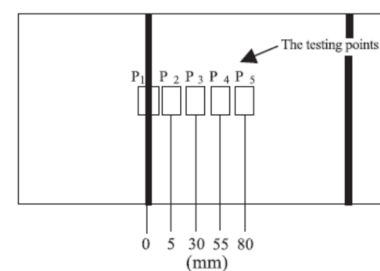


Bild 18: Messpunkte für die Messung der Eigenspannung mit der Bohrloch-Methode (aus [56])

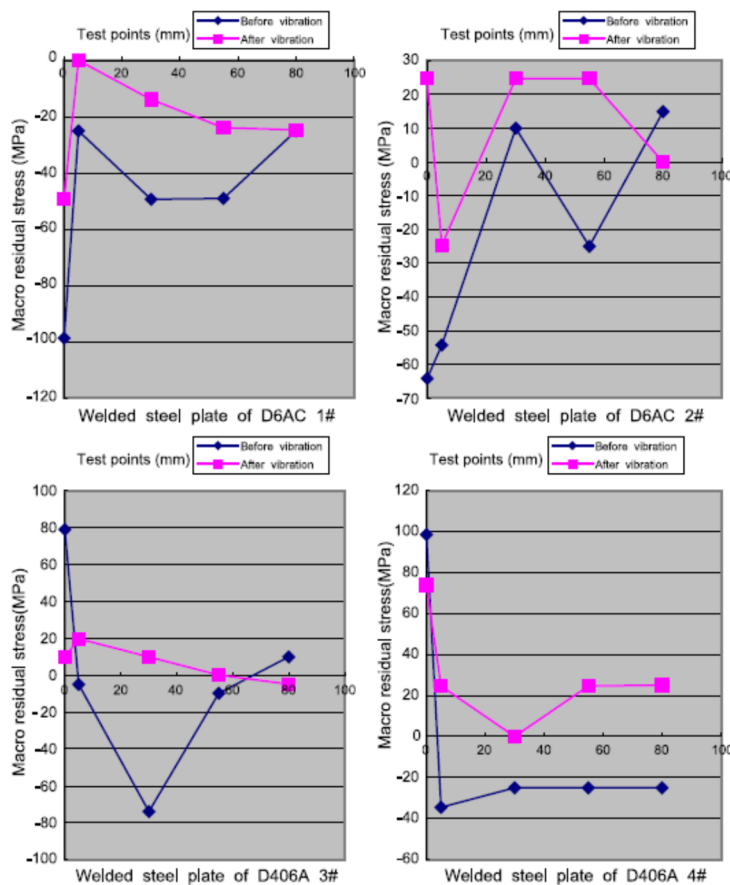


Bild 19: Ergebnisse des Vibrationsentspannens an Schweisssnähten an je zwei Proben aus zwei Stählen (aus [56])

1991 wurde am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit untersucht, ob das Vibrationsentspannen als Alternative zum Spannungsarmglühen bei geschweissten Stahlkonstruktionen eingesetzt werden könnte [57, 58]. Müller und Sonsino kommen dabei zum Schluss, dass dies nicht gegeben sei, da die Eigenspannungen nur gering verändert würden.

Degtyarev und Shul'ginov haben den Zusammenhang zwischen der Abnahme der Eigenspannungen und der Dämpfung einer freien Schwingung untersucht [59]. Sie konnten zeigen, dass die Veränderung der Dämpfung mit der Veränderung der Eigenspannungen synchron ablaufen. Beide Effekte führen sie zurück auf plastische Verformungen (*Strain Aging*). Der Prozess ist nach 5 – 10 Minuten praktisch abgeschlossen, was ca. 10'000 Zyklen entspricht.

Rao et al haben an langen schlanken geschweissten Stahlträgern (Schienen für eine Magnetbahn) das VSR-Verfahren erfolgreich angewendet, s. Bild 20 [60]: Die Schiene wurde auf Gummilager in den Knotenpunkten der ersten Resonanzschwingung aufgelegt. Die Anregung erfolgte an einem freien Ende mittels Exzentermasse; genauere Angaben zur Anregung wurden nicht gemacht. Die Eigenspannungen im Bereich der Schweisssnaht konnten um 30 % reduziert werden, s. Bild 21. Sie beobachteten, dass während der VSR-Behandlung die Amplitude der Resonanz leicht zunahm bei gleichzeitiger leichter Abnahme der Resonanzfrequenz und Dämpfung. Auch haben die gleichen Autoren das VSR-Verfahren erfolgreich an sehr grossen geschweissten Bauteilen für einen Reaktor angewendet, s. Bild 22 [61]: Abminderungen von 30 bis 70 % und Homogenisierung der Eigenspannung haben sie mittels Bohrloch-Methode gemessen, s. Bild 23. In einem späteren Artikel [62] behandeln sie das Materialverhalten an Materialproben. Die Kriechdehnung unter zyklischer Belastung wird in einer Prüfmaschine für den Stahl 304L ermittelt. Das Kriechverhalten kann über die Anzahl Zyklen aufgetragen werden und es ist ersichtlich, dass es zu einer Stabilisierung nach einige 100 Zyklen kommt. Mit Hilfe dieses empirischen Modelles konnten die Autoren die Abminderung der Eigenspannung in einem sehr grossen Werkstück aus dem gleichen Material unter VSR-Behandlung

voraussagen. Die gemessene Abminderung der Eigenspannung auf der Schweissnaht (mittels Bohrlochmethode) liegt leicht höher (10 %) als mit dem empirischen Modell vorausgesagt. Zu bemerken gilt es hier, dass die Eigenspannungen auf der Schweissnaht sehr hoch waren (295 MPa im Vergleich mit der Fließgrenze von 320 MPa). Die relative Abnahme beträgt demnach rund 14 %.

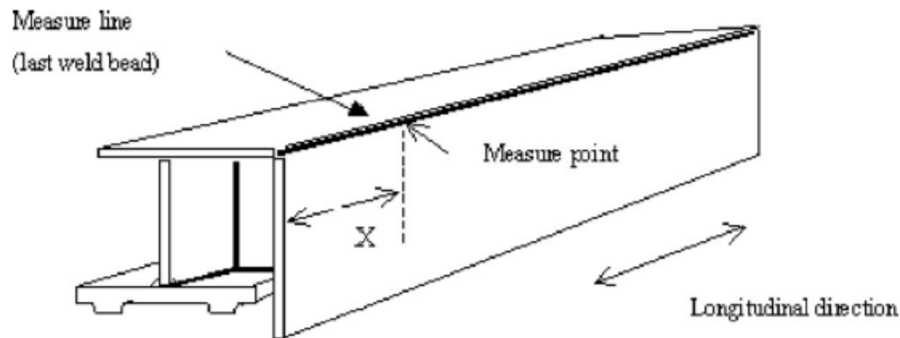


Bild 20: Werkstück mit Schweissnähten (aus [60])

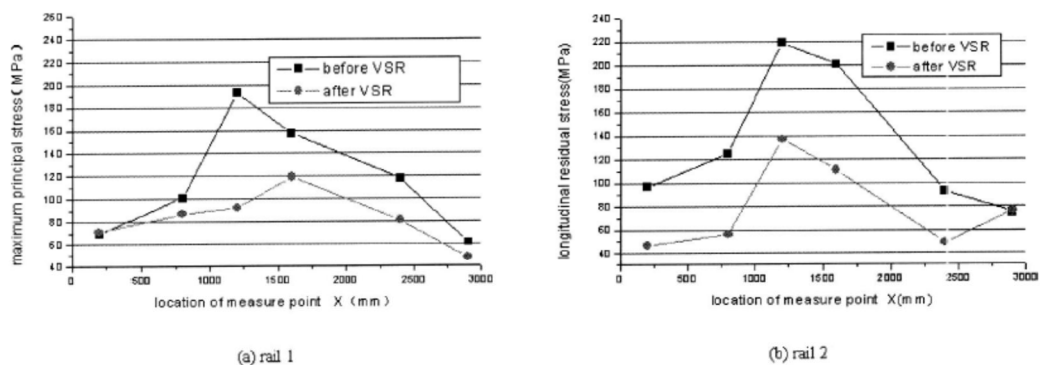


Fig. 6 Maximum principal residual stress before and after VSR

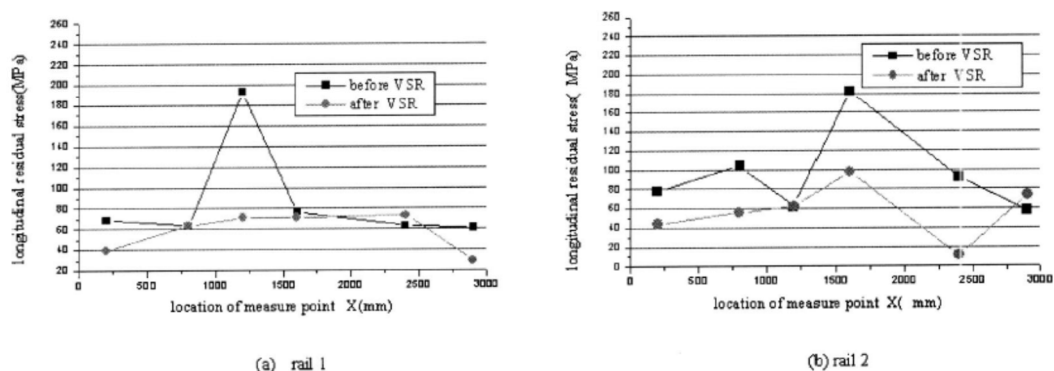


Bild 21: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen vor und nach der Vibrationsbehandlung (aus [60])

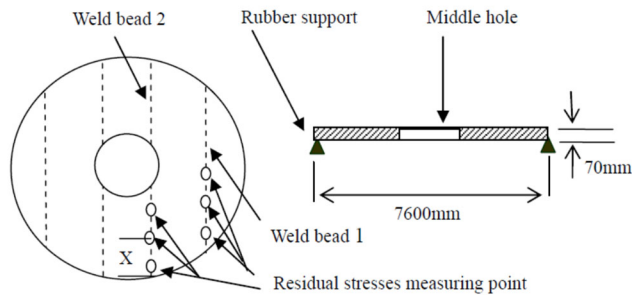


Bild 22: Werkstück mit Messpunkten (aus [61])

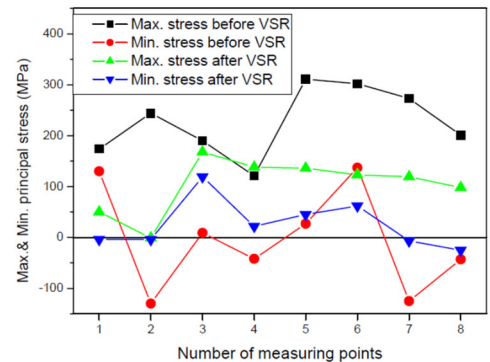


Bild 23: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen vor und nach der Vibrationsbehandlung (aus [61])

Luh und Hwang haben eine modifizierte Bohrlochmethode entwickelt und diese zur Bestimmung der Eigenspannungen an einer Schweißnaht in einer Aluminiumlegierung (6061-T6) vor und nach einer VSR-Behandlung verwendet [63]. Sie haben eine Abnahme der Eigenspannung im Punkt, wo sie am höchsten sind, von 6 bis 30% festgestellt.

Eine wissenschaftliche Bearbeitung des VSR-Verfahrens wurde zwischen 1995 und 2012 an der Universität Strathclyde in Glasgow (Schottland) vorgenommen. In einer frühen Studie von Walker wurde im experimentellen Teil untersucht, wie sich die Eigenspannungen an einfachen Biegebalken, s. Bild 24, die in Resonanz (ca. 100 Hz) gebracht werden, verändern [20]. Die Eigenspannungen wurden durch Kaltwalzen eingebracht (Oberflächen-Eigenspannungen). Der Eigenspannungszustand wurde vor der Behandlung und nach der Behandlung mittels Abtrageverfahren, Beobachtung von mechanischen Eigenschaften (E-Modul) sowie durch Röntgen-Beugungs-Analyse vorgenommen. Das untersuchte Material war ein einfacher Baustahl. Grosse Sorgfalt beim Kaltwalzen ergab eine reproduzierbare Eigenspannungsverteilung in den Probekörpern, was eine wichtige Voraussetzung für die wissenschaftliche Untersuchung des Effektes darstellt. Die Zug-Eigenspannungen an der Oberfläche erreichten beim optimierten Walzprozess nahezu die Bruchgrenze des Materials (450 MPa), waren also sehr hoch. Die Röntgen-Beugungs-Methode erlaubt die Messung der Versetzungsdichte. Die Behandlung mit Vibrationsamplituden von 250, 385, 420 und 550 MPa wurden untersucht. In allen Fällen konnte eine Reduktion der Oberflächen-Eigenspannung nach 10^4 Zyklen festgestellt werden. Die Reduktion war Amplituden- und Zyklen-anhängig, wobei ein stabiler Zustand nach 10^4 Zyklen erreicht wurde. Während der Vibrationsbehandlung nahm die Resonanzfrequenz um ca. 1.5 % ab. Dieser Effekt wird mit einer Reduktion des E-Moduls interpretiert. Bei 550 MPa tritt massive plastische Deformation auf und die Eigenspannungen gehen deutlich zurück. Die Eigenspannungsreduktion mit Amplituden deutlich unterhalb der Fließgrenze kann nicht mit der elasto-plastischen Verformung erklärt werden, so eine Schlussfolgerung der Autoren.

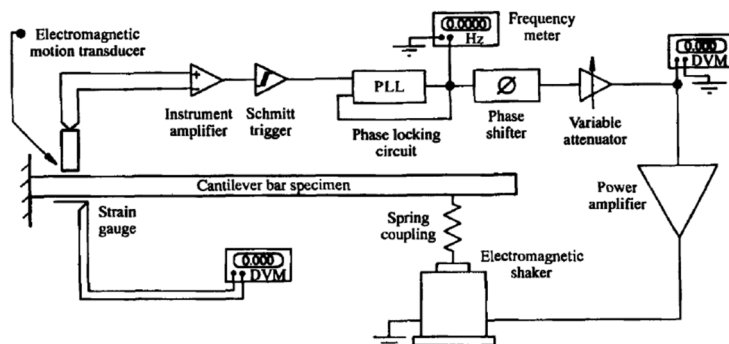


Bild 24: Versuchsanordnung von Walker zur Untersuchung der Vibrationsbehandlung (aus [20])

Ab 1999 hat dann Munsî zusammen mit Waddell und Walker ähnliche Fragestellungen wieder aufgegriffen. A. Munsî hat um die Jahrtausendwende einige Studien publiziert, wobei es immer um Eigenspannungen in der Schweisstchnik ging. Er hat u.a. auch den Einfluss auf das Gefüge (Mikrostruktur) analysiert, wenn die Vibrationen bereits beim Schweissvorgang in die Struktur eingeleitet werden [15]. Das vereinfachte experimentelle Setup, welches immer wieder zum Einsatz kam, legt jedoch den Verdacht nahe, dass er durch das Vibrieren sehr hohe Oberflächenspannungen eingebracht hat, und den Eigenspannungsabbau quasi einem statischen Überbelasten gleich kam ($\rightarrow$ lokales Fliessen $\rightarrow$ Einbringen von Druckeigenspannungen, was die Schwingfestigkeit erhöht). Zumindest zeigen seine Ergebnisse einen grossen Effekt gleich zu Beginn des Vibrierens, und ab 5 Sekunden einen relativ kleinen Einfluss der Dauer der Behandlung. In einer ersten Arbeit [18] untersuchten sie den Einfluss von Vibrationen während dem Anbringen einer Schweissnaht auf die Eigenspannungen, s. Bild 25. Eine Vibration mit 50 Hz und einer Amplitude von 0.25 oder 0.5 mm veränderte die Eigenspannungen nur sehr schwach ($\pm 5\%$), s. Bild 26. Vibrationen mit 500 Hz und 0.08 mm zeigten keine Wirkung. Die Eigenspannungen wurden mit der Röntgen-Beugungs-Methode bestimmt. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen untersuchten die Autoren in [13] die Wirkung von Torsionsvibrationen (resp. Schubspannungen) in geschweissten Rohren auf die Eigenspannungen, s. Bild 27 & 28. Dabei untersuchten sie den Einfluss der Amplitude und Zeitdauer bei Vibrationen mit 25 Hz. Während bei nicht geschweissten und bei liniengeschweissten Rohren keine oder nur eine sehr schwache Reduktion der Eigenspannungen beobachtet wurden, war der Effekt bei Punktschweissungen deutlich. Dabei konnte der Effekt schon bei rel. niedrigen Amplituden und eher kurzen Einwirkzeiten beobachtet werden. Die grosse Wirkung bei Punktschweissungen erklären sich die Autoren durch mikrostrukturelle Veränderungen des Gefüges. Die gefundenen experimentellen Ergebnisse seien durch elasto-plastische Verformungen nicht erklärbar. In allen Fällen sind Umschichtungen der Eigenspannungen zu beobachten, ohne einen positiven Effekt zu erzeugen. In einer weiteren Studie derselben Autoren [14] wurde die Auswirkung des Vibrationsentspannens auf die Lebensdauer von Flachproben mit einer Schweissnaht untersucht (s. Bild 25). Dabei wurden eher wenig Zyklen bei rel. hohen Spannungsamplituden bei 25 Hz gewählt. Verglichen wurde diese VSR-Behandlung mit unbehandelten Proben und mit wärmebehandelten Proben (70 Min. bei 913°). Während die wärmebehandelten Proben im Vergleich zu den unbehandelten Proben eine kürzere Lebensdauer (!) ergaben, wiesen die VSR-behandelten Proben eine um 17 % bis 43 % längere Lebensdauer auf. Die Verkürzung der Lebensdauer wurde mit einer Rekristallisation des Gefüges erklärt. Die signifikante Lebensdauerverlängerung wurde mit nur 4 Sekunden Vibration bei 25 Hz (d. h. 100 Zyklen) mit einer Amplitude von 370 MPa erreicht. Erklärungen zu diesem Befund wurden keine gegeben. In einer weiteren Studie wurde der Effekt der VSR-Behandlung in Kombination mit dem Elektropolieren untersucht [16]. Elektropolieren verändert die Eigenspannungen, welche beim Schweissen in der Nähe der Schweissnaht in den oberflächennahen Schichten (50 μm , d. h. ca. 1.5 Korngrössen werden beim Elektropolieren abgetragen) erzeugt werden deutlich. Die nachgelagerte VSR-Behandlung reduziert die Eigenspannungen weiter um rund 60 %. Die VSR-Behandlung war effektiv, auch mit Schwingungen von 25 Hz von nur 5 Sekunden Dauer (Amplitude 300 MPa). Bei Proben ohne Elektropolieren war die Reduktion immer noch signifikant um 75 MPa (ca. 25 %). Während der Effekt vom gewählten Spannungsniveau für die Amplitude abhängt, gibt es keinen Effekt der Vibrationsdauer. Eine Modellvorstellung, dass eine Energieabsorption stattfinden würde während der VSR-Behandlung, konnte mit diesen experimentellen Ergebnissen nicht bestätigt werden.

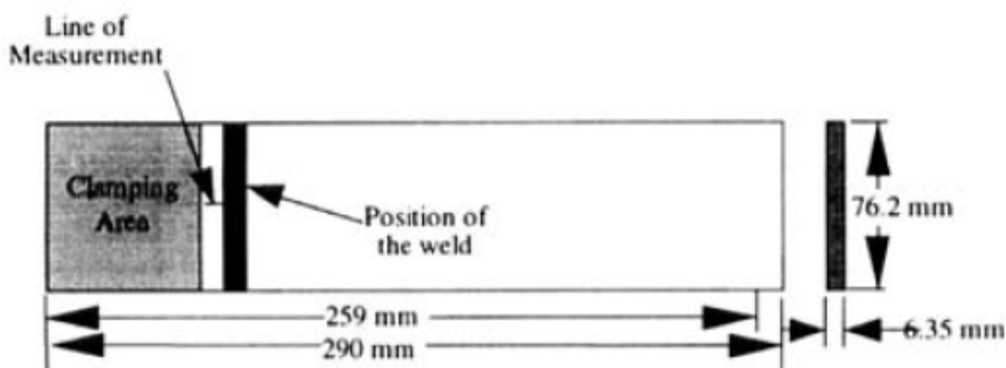


Bild 25: Flachprobe mit Schweissnaht für die Vibrationsbehandlung in Biegung (aus [18])

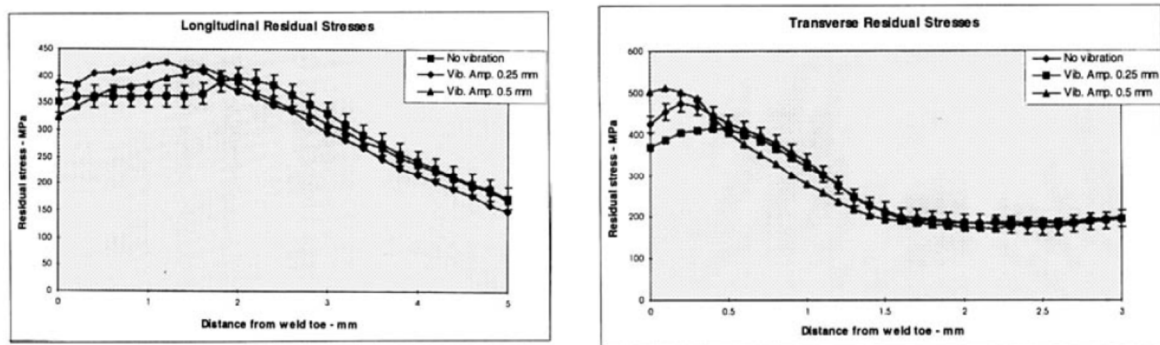


Bild 26: Ergebnisse der Eigenspannungsmessungen vor und nach der Vibrationsbehandlung (aus [18])

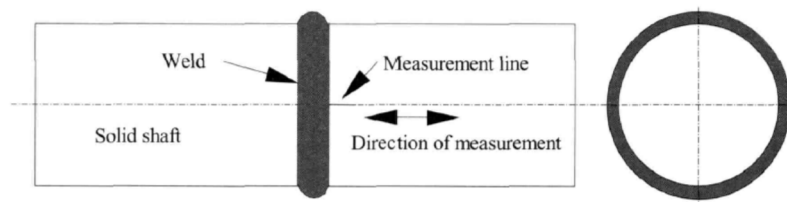


Fig. 3 Position of the measurement line in the welded specimen

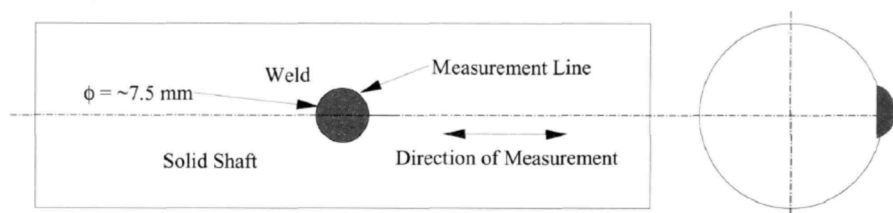


Fig. 4 Position of weld and measurement line

Bild 27: Rohrprobe mit Schweissnaht und Stabprobe mit Punktschweissung für die Vibrationsbehandlung unter Torsion (aus [13])

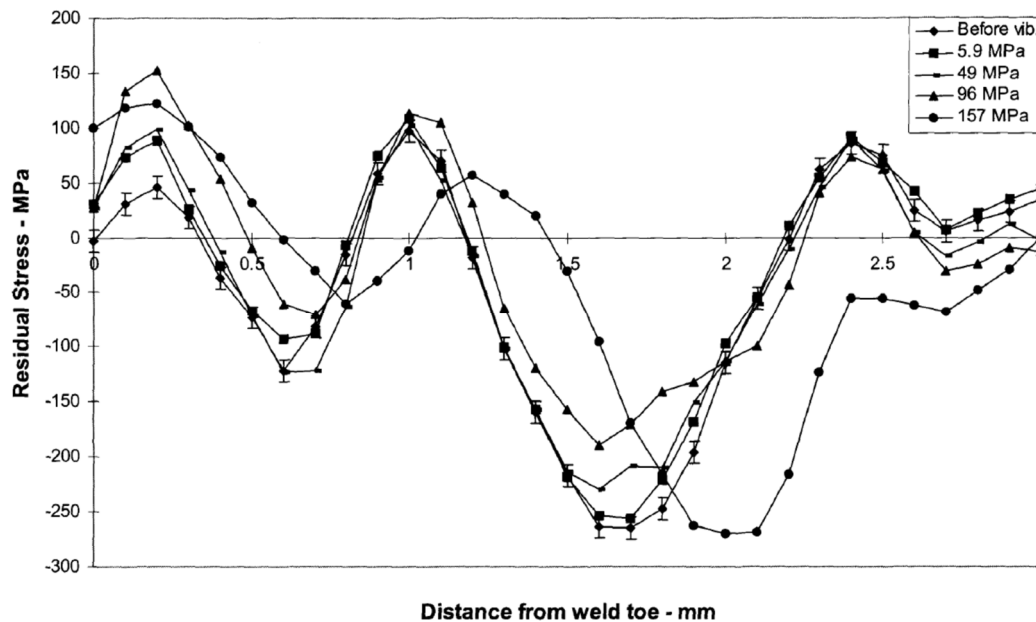
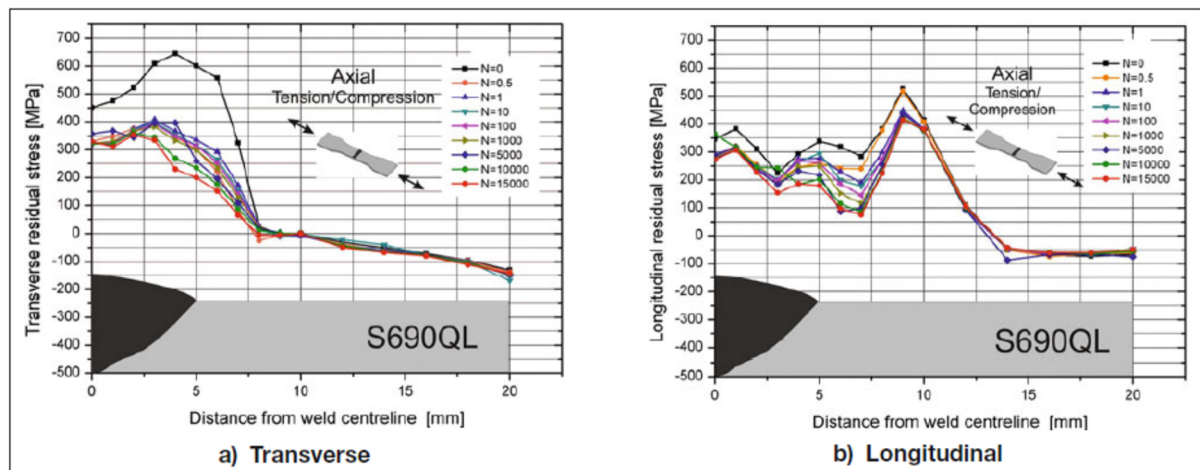


Bild 28: Ergebnisse der Vibrationsbehandlung an Rohrprobe mit Schweissnaht unter Torsion (aus [13])

Farajian et al haben die Eigenspannungen in einer Schweissnaht unter statischer und zyklischer Belastung gemessen, s. Bild 29 [64, 65]. Sie untersuchten die Veränderung der Eigenspannung in Funktion der maximalen Spannung und Zyklenzahl. Sie kommen zum Schluss, dass die Mises-Plastifizierungshypothese die Veränderung der Eigenspannung gut erfassen kann. Zudem streichen sie hervor, dass der erste Zyklus die massgebende Eigenspannungsabminderung hervorruft. Alle weiteren Zyklen verändern die Eigenspannung dann nur noch wenig.



Stress amplitude = 400 MPa, nominal stress ratio = -1.

Bild 29: Ergebnisse der Vibrationsbehandlung an einer Zugprobe mit Schweissnaht unter axialer Wechsel- last (aus [65])

Die Dissertation von A.S. Tsvetkov an der Polytechnischen Universität von St. Petersburg behandelt das Vibrationsentspannen an grossen geschweissten Bauteilen umfassend [66]. Von dieser Arbeit liegt nur eine deutsche Zusammenfassung vor. Es wurde versucht eine systematische Untersuchung der Prozessparameter vorzunehmen: Zuerst gibt er an, wie hoch theoretisch die maximale Vibrationsspannung sein kann in Funk- tion der Frequenz und der Amplitude einer hypothetischen Anregung. Für einen typischen Ferrit-Perlit-Stahl der Festigkeitsklasse 390, ergibt dies 242 MPa bei 100 Hz und einer Amplitude von 1 cm (!). Für die Posi- tionierung des Erregers sowie die Ausrichtung gibt er (leider in der deutschen Übersetzung schlecht

verständliche) Empfehlungen. Er erläutert, dass das Schwingungsmuster, welches durch die Chladni-Klangfiguren sichtbar gemacht werden kann, im Bereich bis 120 Hz Anregungsfrequenz das gleiche bleibt. Er empfiehlt die Vibration bei mindestens zwei Resonanzfrequenzen über eine Vibrationsdauer von 15 Minuten durchzuführen. Er geht dann auf die Problematik ein, dass bei einer zu hoch gewählten Amplitude die Ermüdungsfestigkeit reduziert werden kann. Er schlägt eine maximale Dehnungsamplitude von 0.3 % vor. Die Abminderung der Eigenspannung durch die VSR-Behandlung sei von 200 MPa auf 100 MPa; was etwas weniger ist als durch ein Spannungsarmglühen (200 MPa auf 70 MPa). Er hat auch das Mikrogefüge des Materials untersucht und findet keine Unterschiede zwischen dem VSR-behandelten Material und dem spannungsarm-geglühten Material.

Sedek et al geben eine ganz andere Sichtweise zur Wirksamkeit des VSR-Verfahrens in [67] wieder, s. Bild 30. Sie weisen darauf hin, dass beim VSR nur Spannungen von maximal 50 MPa erzeugt werden können und diese weit unterhalb der Fließgrenze sind. Daher könne nicht von einer wesentlichen Veränderung der Eigenspannungen durch elasto-plastische Umformung während dem Vibrieren ausgegangen werden. Sie weisen auf Lücken in der Bereitstellung von Fakten zu diesem Zusammenhang in den gängigsten Publikationen hin. Was sie jedoch nicht abstreiten ist die Effektivität des VSR-Verfahrens zur Erreichung von Formstabilität, s. Bild 31. Sie deuten jedoch diese Wirkung mit *Mikro-Relaxation* und Phasenumwandlungen, welche durch die Vibrationen angeregt würden. Der Effekt sei vergleichbar mit der Lagerung der Werkstücke im Freien über 800 Tage (*Seasoning*). Sie verweisen auf eigene Studien, die diese Zusammenhänge dokumentieren sollen.

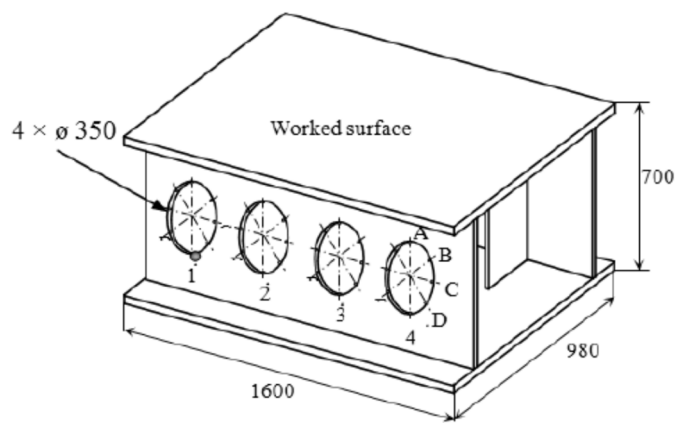


Bild 30: Werkstück zur Untersuchung des Vibrationsentspannens und Wärmebehandlung (geschweisster Stahl) (aus [67])

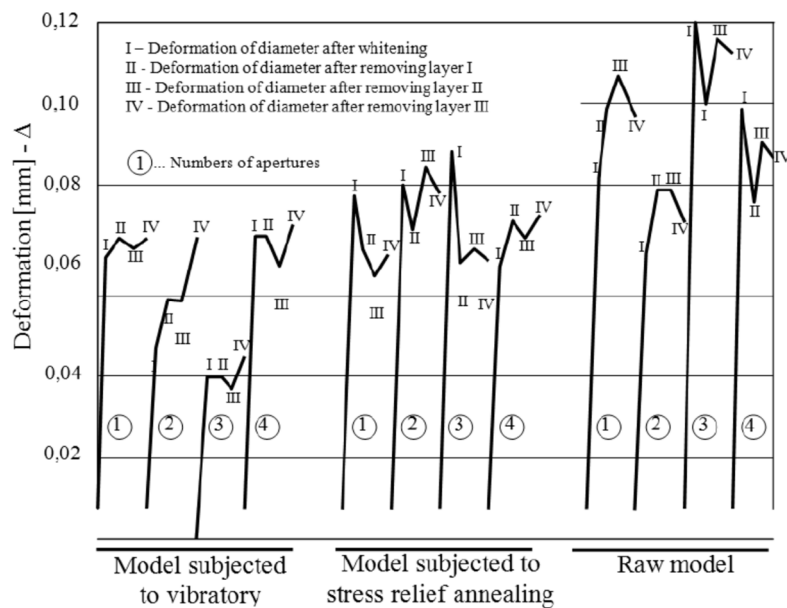


Bild 31: Ergebnisse der Vibrations- resp. Wärmebehandlung am Werkstück – Deformationen der Bohrungen nach anschliessender mechanischer B(aus [67])

Wang et al haben an einer Aluminium-Legierung 6061 eine Abnahme der Druckeigenspannungen um 53 % jedoch weniger als 10 % bei den Zugspannungen in einer kaltgewalzten Platte festgestellt [68, 69]. Sie haben auch intensiv die Änderung der Textur während dem Kaltwalzen und auch während der VSR-Behandlung untersucht. Zum Mechanismus der hinter dem VSR-Effekt steht, geben sie ein zyklisches Kriechen an, welches die während dem Kaltwalzen eingebrachten Texturänderungen wieder rückgängig machen kann. Damit Spannungsänderungen auftreten sei ein Vibrationsschwelle zu überschreiten. Die Versuchsmethodik haben sie dann auch an einer Magnesium-Legierung angewendet [70].

Samardzic hat das VSR-Verfahren an einem geschweissten Werkstück (Bild 32) aus Stahl-52-3 N angewendet und fand punktuell eine bis zu 43 % reduzierte Eigenspannung bei gleichzeitiger Erhöhung der mittleren Eigenspannung um 8 %, s. Bild 33 [71].

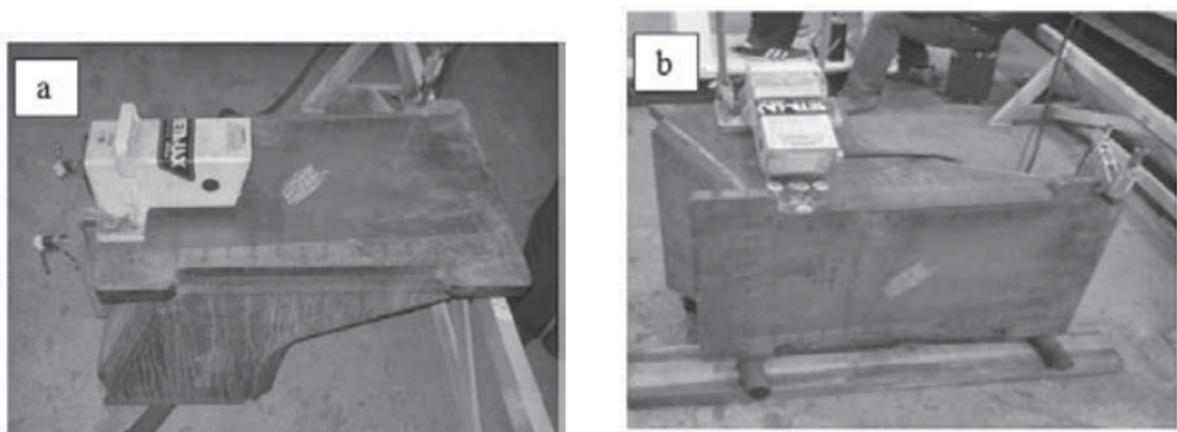


Bild 32: Werkstück zur Untersuchung des Vibrationsentspannens und Wärmebehandlung (geschweisster Stahl) (aus [71])

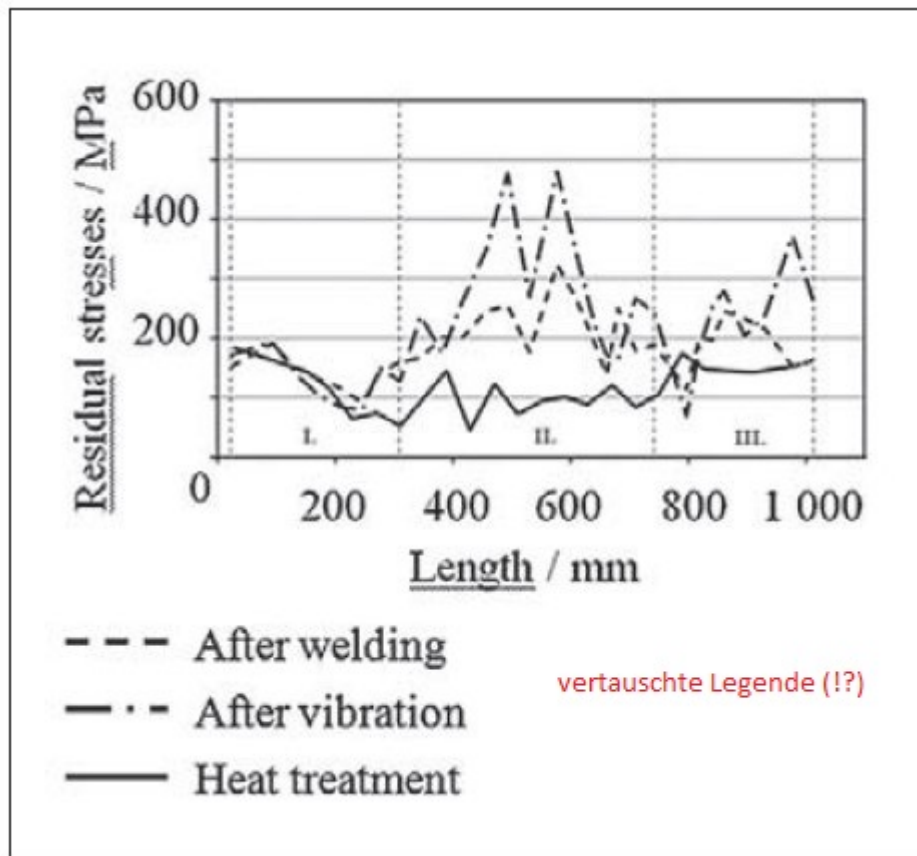


Bild 33: Ergebnisse der Vibrations- resp. Wärmebehandlung am Werkstück – Eigenspannungsverteilung (aus [71])

Song untersuchte die Ermüdungsfestigkeit von VSR-behandelten und unbehandelten einfachen Zugproben aus einer 7075-T651 gewalzten Platte [72]. Er konnte eine leicht verbesserte Ermüdungsfestigkeit bei VSR-behandelten Proben beobachten.

Die kleinsten Proben, an denen VSR studiert wurde, sind sogenannte Almenstreifen [73]. Diese sind repräsentativ für dünne Blechen (Dicke bis 2.3mm). Die Studie zeigt auf, dass mit Ultraschall-Behandlung hoher Intensität Eigenspannungen, welche durch Kugelstrahlen (Shot Peening) in die Blechstreifen eingebracht wurden, markant vermindert werden können. Das Verfahren ist jedoch auf dünne Bleche beschränkt.

Djuric et al untersuchten die Eigenspannungszustände an einer Schweißnaht vor und nach einer VSR-Behandlung mit verschiedenen Messmethoden [74]. Röntgen-Beugung, Barkhausenrauschen und digitale Bildkorrelation wurden an den gleichen Proben verwendet und verglichen. Während sowohl die Röntgen-Beugung als auch die digitale Bildkorrelation keinen Einfluss der VSR-Behandlung erfassen konnten, zeigte das Barkhausenrauschen einen gewissen Effekt. Die Autoren befürchten eine Schädigung der Mikrostruktur. Chuvas et al haben das VSR-Verfahren mit einem Rauschsignal im Bereich von 50 bis 500 Hz auf eine einfach Biegeprobe mit einer Schweißnaht untersucht [75]. Das Rauschen beinhaltet dabei auch die beiden tiefsten Resonanzfrequenzen. Die VSR-Behandlung hat dabei eine Abminderung der grössten Eigenspannung von 40 % longitudinal und 20 % transversal ergeben. Die Studie untersuchte im Speziellen die Unsicherheit der Eigenspannungsmessung mit der Röntgen-Beugungs-Methode.

Li et al haben das VSR-Verfahren erfolgreich an einem grossen geschweissten Zylinder angewendet, s. Bild 34 & 35 [76]. Sie konnten eine Abminderung der höchsten Eigenspannungen von rund 50 % feststellen, s. Bild 35. Im Vergleich dazu wurde mit einem lokalen thermischen Verfahren die Eigenspannungen um 20 bis 57 % reduziert, s. Bild 36. Sie haben das Schwingungsmuster während der VSR-Behandlung mittels Finite-Element-Simulation auch modelliert, s. Bild 37.

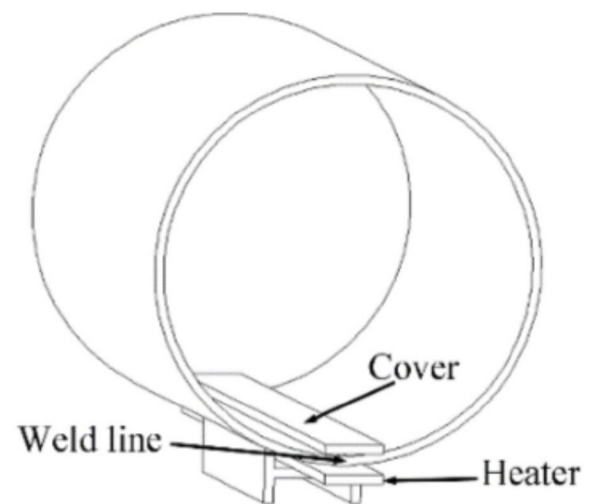
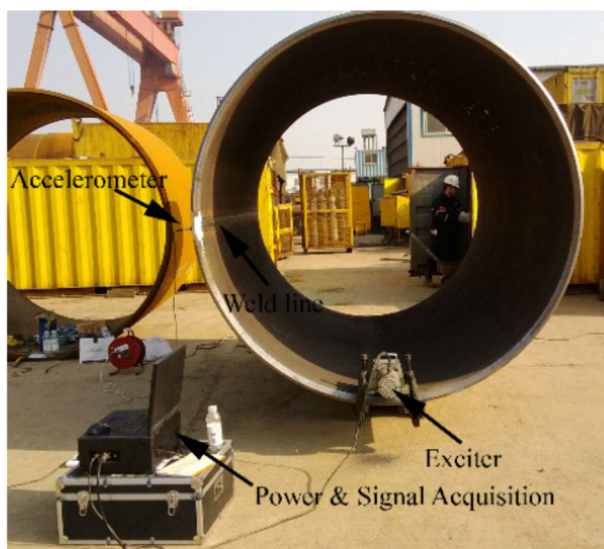


Bild 34: Werkstück zur Untersuchung des Vibrationsentspanns und Wärmebehandlung (geschweisster Stahl) (aus [76])

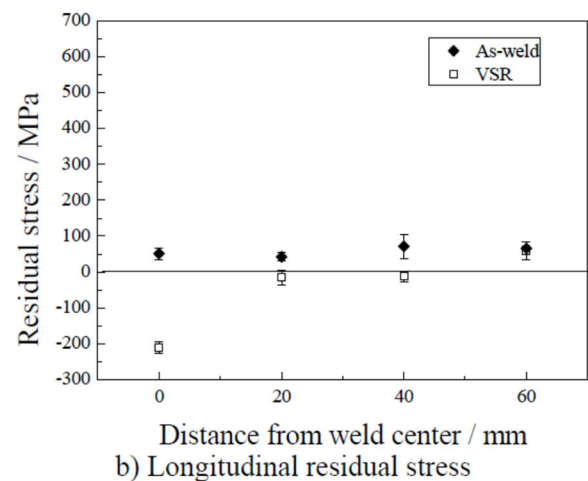
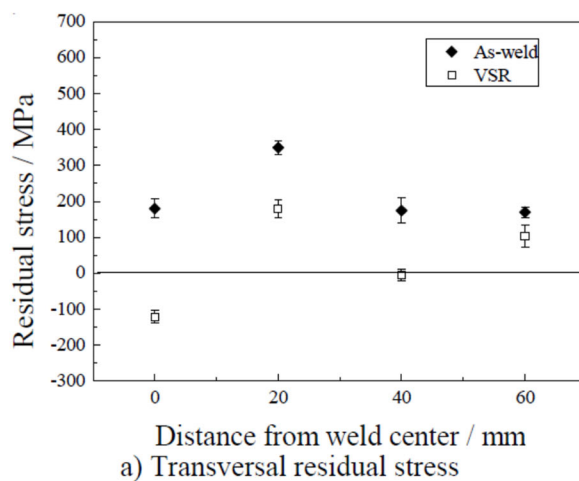


Bild 35: Ergebnis der Vibrationsbehandlung am Werkstück – Verteilung der Eigenspannung bei der Schweissnaht (aus [76])

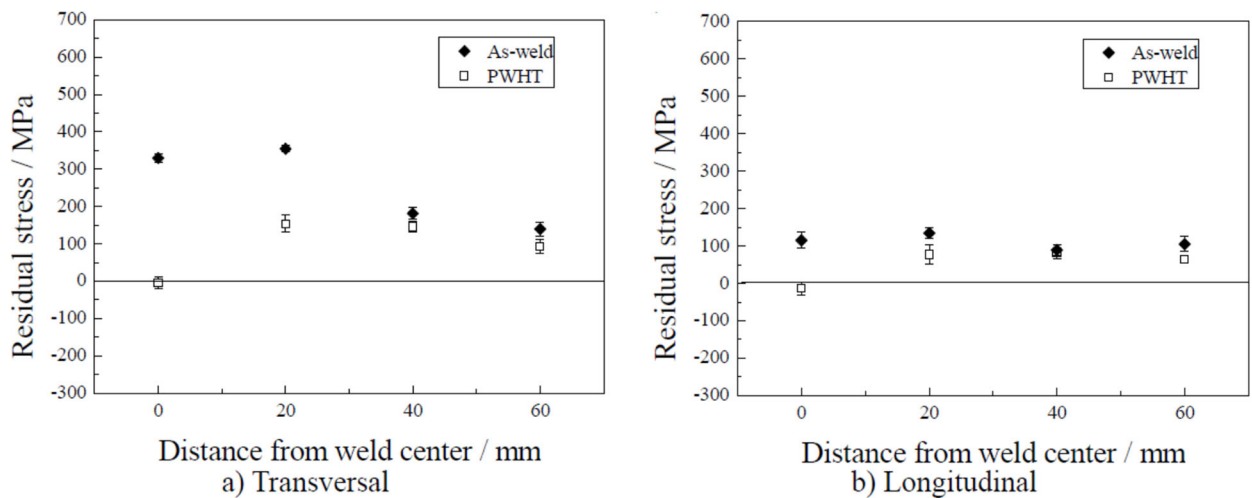


Bild 36: Ergebnis der Wärmebehandlung am Werkstück – Verteilung der Eigenspannung bei der Schweisnaht (aus [76])

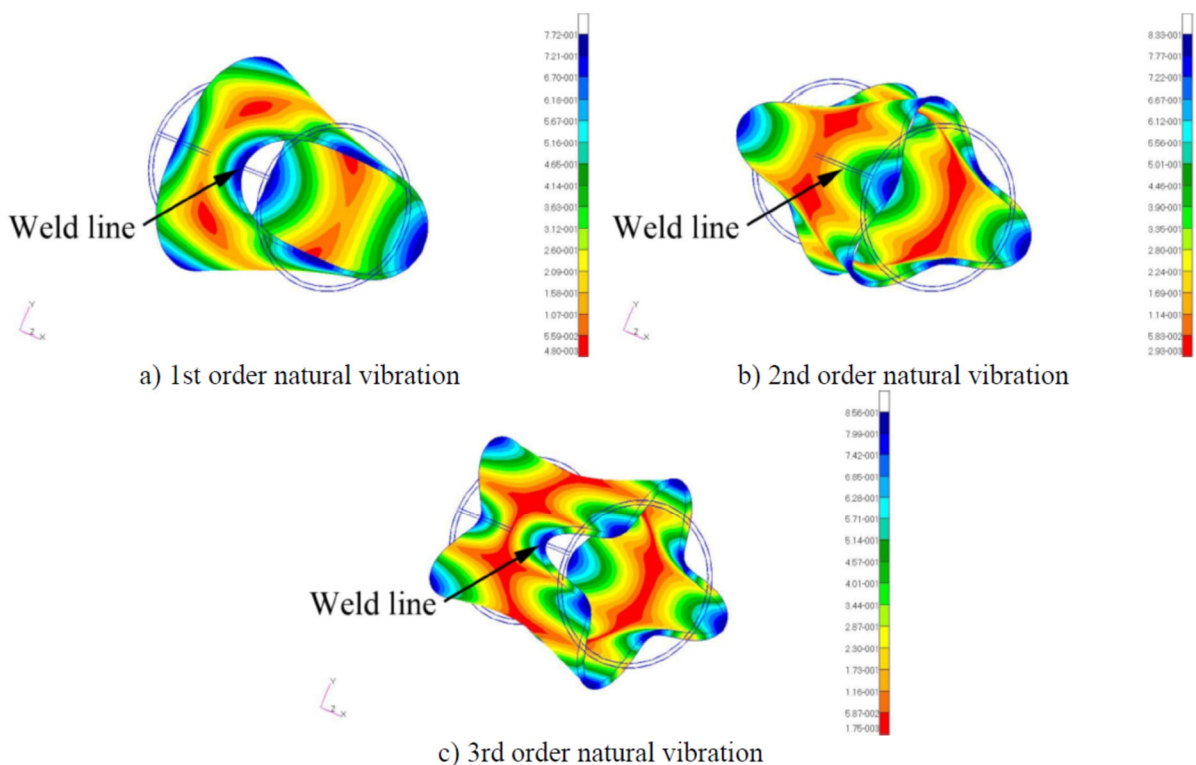


Bild 37: Ergebnis der dynamischen Finite-Element-Analyse am Werkstück zur Untersuchung des Vibrationsentspannens und Wärmebehandlung (geschweisster Stahl) (aus [76])

Mohanty et al untersuchten CO₂-Laserstrahl-geschweisste Werkstücke aus einem AISI 316 Stahl [77]. Sie finden einen Effekt der VSR-Behandlung: die Druck-Eigenspannungen gingen um 100 MPa zurück. Gao et al haben das VSR-Verfahren an Rundproben aus einer gewalzten Platte aus der Aluminiumlegierung 7075-T651 angewendet und den Effekt der Vibrationsamplitude auf die Ermüdungsfestigkeit untersucht [78]. Für tiefe Amplituden (bis 0.04 mm) steigt die Ermüdungsfestigkeit zuerst mit der Amplitude an, bevor sie bei Amplituden über 0.04 mm wieder abnimmt. Damit zeigt sich für diese Material eine optimale Vibrationsamplitude bei ca. 0.04 mm.

Sheremet et al haben Überlegungen zu Optimierung des VSR-Verfahrens angestellt [79]. Sie ergründen, welche Parameter die Energieminimierung, die Verkürzung der Behandlungszeit und die Qualität der VSR-Behandlung beeinflussen können.

Yang et al zeigen den Effekt des VSR auf geschweisste Teile mittels Simulation (sowohl Prozesssimulation wie auch dynamische Simulation zu Wellenausbreitung), s. Bild 38 - 41 [80, 81].

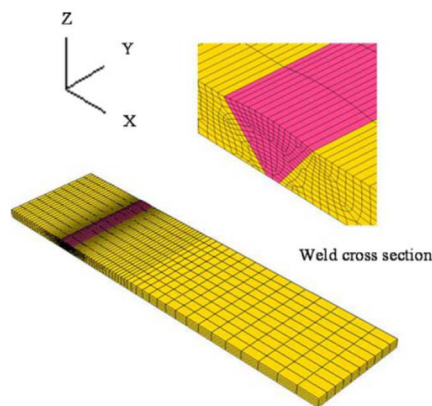


Bild 38: FE-Modell einer Flachprobe mit Schweißnaht (aus [80])

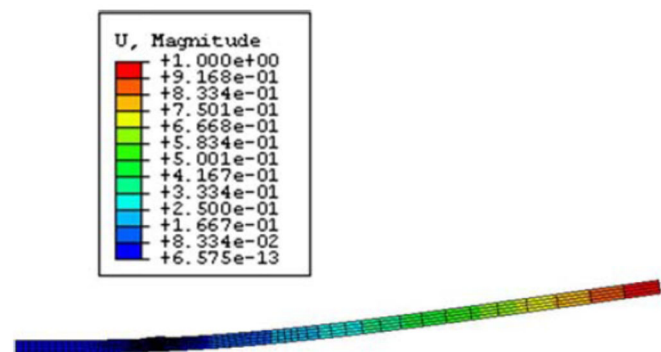


Bild 39: FE-Modell der schwingenden Flachprobe (aus [80])

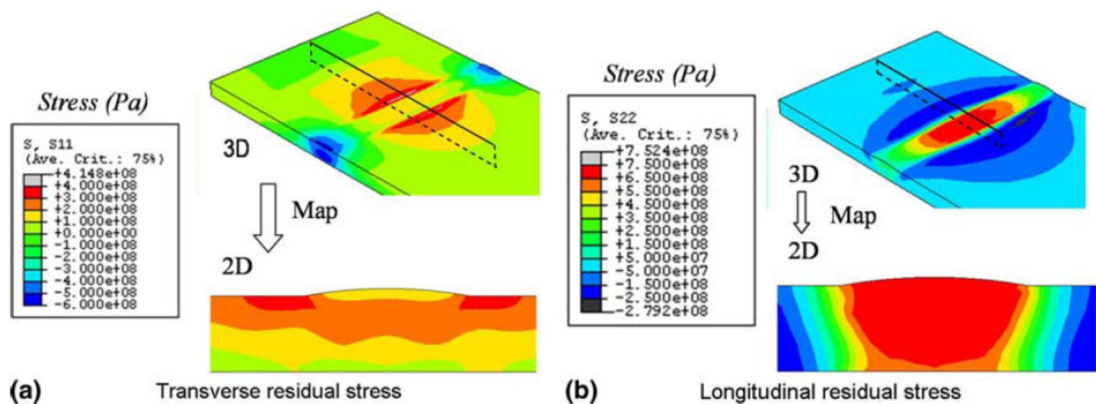


Bild 40: Ergebnis der Finite-Element-Analyse der Eigenspannungen in der Schweißnaht in der Flachprobe vor der Vibrationsbehandlung (aus [80])

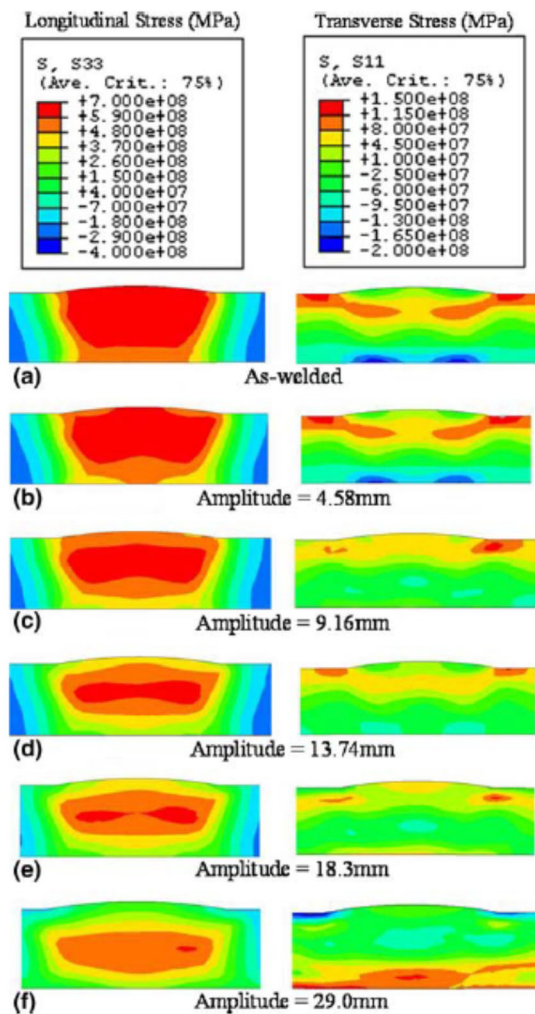


Bild 41: Ergebnis der Finite-Element-Analyse nach der Vibrationsbehandlung in Abhängigkeit von der Schwingungsamplitude (aus [80])

3.2.5 Literatur zu Theorien des Vibratory Stress Relief

Viele Studien zur VSR-Methode weisen auf die fehlende Erklärung der beobachteten Effekte durch theoretische Modelle hin, z. B. diejenige von Walker. Eine erste Publikation von Walker et al [20] geht den darunterliegenden Prozessen nach, die zum Eigenspannungsabbau durch Vibration führen sollen. Darin äussern sich die Autoren zuerst zur fehlenden kohärenten Theorie der Ausführung. Beim VSR gehe es im Wesentlichen um das Vibrieren des Werkstückes bei Resonanz, dies um hohe Spannungsamplituden erzeugen zu können. Eine solche Vibrationsbehandlung ermögliche es, die Eigenspannungen in Bauteilen von einigen Kilogramm bis zu hunderte von Tonnen in einem erheblichen Masse zu reduzieren. Sie geben dazu auch 16 Referenzen an. Obschon das Verfahren weitverbreitet sei, fehle es an wissenschaftlichen Daten. Laborversuche seien nicht eindeutig resp. ergebnislos ausgefallen. Die Anwendbarkeit sei mind. ungewiss. Die Autoren streichen die Notwendigkeit von plastischen Verformungen in der Regel in Form von intragranularen mikroplastischen Prozessen, Verschiebungen von einzelnen Versetzungen an Positionen niedriger Energie hervor ("operation of plastic deformation mechanisms – usually in the form of intragranular microplastic processes as individual dislocation segments move to positions of lower energy"). Sie zitieren frühere Arbeiten, welche zweierlei Mechanismen angeben: Einerseits die Superposition von Eigenspannungen und den Spannungen durch die Vibration, die örtlich die Fließgrenze überschreiten. Diese als Standard-Modell bezeichnete Modellvorstellung würde eine instantane Verringerung der Eigenspannungen erzeugen, d.h. bereits nach den ersten wirksamen Schwingungen. Eine Vibration mit vielen hundert oder tausend Zyklen wäre nach dieser Modellvorstellung nicht notwendig. Alternative Modellvorstellungen bleiben wage und sprechen

nur unspezifisch von *Versetzungseffekten* (*Dislocation Effects*). Mittels der Röntgen-Beugungs-Analyse konnten sie zeigen, dass die Versetzungsdichte während der Vibrationsbehandlung zunimmt bei gleichbleibender Korngrösse. Diese Ergebnisse seien nur mit einem Modell der Vibrationsentspannung erklärbar, welches auf plastische Verformungen auf mikroskopischer Ebene abstütze. Ein der Wärmebehandlung analoger Mechanismus sei ausgeschlossen, da bei der Wärmebehandlung die Versetzungsdichte massiv abnehme, was beim Vibrationsentspannen nicht geschehe; im Gegenteil: hier nimmt die Versetzungsdichte zu, was mit einem Frank-Read-Mechanismus² in Verbindung gebracht wird. Die so neu gebildeten Versetzungen können sich dann frei bewegen und sich in eine energetisch günstige Position begeben, so dass die Eigenspannungen abgebaut werden. Diese Bewegung der freien Versetzungen sei ähnlich wie die Diffusion und könne durch leichte Temperaturerhöhung gefördert werden.

Das Standard-Modell zur theoretischen Erklärung des VSR-Effektes ist die elasto-plastische Verformung. Dabei geht man von der linearen Superposition der Eigenspannungen im Bauteil und der zyklischen Belastung während des Vibrierens aus. Wichtigster Materialparameter ist dabei die Fließgrenze. Wird die maximale Spannung (d. h. die Überlagerung der Eigenspannung und zyklischer Spannung) an einem Punkt im Material erreicht und überschritten, tritt plastische Verformung ein. Bei der Entlastung kommt es durch elastische Verformung zu Druckeigenspannung an Stellen wo vorher Zugeigenspannungen waren. Ein Finite-Element-Modell eines einfachen Biege-Probestückes zeigt diesen Effekt auch in der numerischen Simulation [82, 83]. Der umgekehrte Fall kann auch auftreten: Bei Druckeigenspannungen, z. B. erzeugt durch Kugelstrahlbehandlung, kann es eine starke Abminderung der grössten Druckeigenspannungen durch das Vibrieren geben. Der grösste Effekt wird gemäss diesem Modell bei der Resonanzfrequenz erwartet [82]. Ein interessanter Aufsatz aus dem Jahre 1985 in einem Praxis-Journal gibt eine theoretische Erklärung, warum die Wahl der Frequenz etwas unterhalb der Resonanzfrequenz optimal ist für den VSR-Effekt [84]: Während genau bei der Resonanzfrequenz die Amplitude zwar am grössten ist, ist die Dämpfung dort sehr gering. Etwas unterhalb der Resonanzfrequenz hingegen sei die Dämpfung maximal. Da die Dämpfung diejenige Energie darstellt, die im Material (in Wärme) umgewandelt wird, sei bei dieser Vibrationsfrequenz die beste Eigenspannungsreduktion zu erwarten. Diese Begründung der Frequenzwahl nimmt auch Jurcius in [85] auf. Er vergleicht das Spannungsarmglühen mit dem VSR-Verfahren und stellt Veränderungen von Materialkennwerten (Bruchgrenze, Kerbschlagarbeit und Härte) nach beiden Verfahren fest. Dass dabei Eigenspannungen abgebaut wurden, begründet er mit einer Magnetfeld-Messung (Barkhausenrauschen), die für beide Verfahren ähnliche Änderungen ergeben hat. In [11, 86] wenden die Autoren Ultraschall, Röntgen-Beugung und auch digitale Bildkorrelation für die Messung von Eigenspannungen an einer Schweissnaht an. Sie vergleichen wiederum das thermische mit dem mechanischen Verfahren und können zeigen, dass VSR ähnlich wirkt wie das Spannungsarmglühen: Eine Reduktion der Eigenspannungen auf der Schweissnaht von 40 % ist möglich. Die wesentlichen Kenndaten (Festigkeit, Duktilität und Härte) des Stahls 355J2 bleiben unverändert.

Walker erwähnt in [20] zwei Modellvorstellungen: das Standard-Modell oder auch Plastizitätsmodell nach Klotzbucher und Kraft und das nur vage formulierte Modelle der *Versetzungseffekte*. In [19] geht dann Walker detailliert auf die möglichen Modellierungen der beobachteten VSR-Effekte ein. Dabei kommt er zu folgender Unterscheidungsmerkmalen, die berücksichtigt werden müssen:

² Definition des Frank-Read-Mechanismus aus (<https://www.spektrum.de/lexikon/physik/frank-read-quelle/5279>): Von Frank und Read erdachter Mechanismus, der es ermöglicht, im unter einer Schubspannung stehenden *Realkristall* bei Vorhandensein von unbeweglichen Versetzungsknoten mit einer einzigen *Versetzungslinie* sehr große *Abgleitungen* zu erhalten. Es kann sich dabei auch um Versetzungen handeln, deren Beweglichkeit unter den praktisch auftretenden Spannungen so gering ist, daß sie als solche Verankerungen wirken können. Bei genügend großer Schubspannung werden sich die Versetzungsstücke zwischen zwei Knoten so ausbreiten, daß schließlich ein positives und ein negatives Versetzungsstück mit gleichen Burgers-Vektoren einander näher kommen. Die von den Versetzungslinien eingeschlossenen Schnittflächen können dann miteinander verschmelzen; die beiden Linienstücke heben sich weg, und es stellt sich im wesentlichen wieder die ursprüngliche Versetzungsanordnung ein. Durch diesen Mechanismus der *Versetzungsquellen* können immer neue, vom Netz abgelöste Versetzungsringe erzeugt werden, und damit ist es möglich, die in Metallen zu beobachtende große, oft viele 100 % betragende Verformbarkeit zu erklären.

- 1) Grösse der Proben resp. Bauteile
- 2) Art der Generierung von Eigenspannungen: Kaltverfestigung durch Walzen und Shot Peening, wärmebedingte Eigenspannungen durch Schweiessen, oder Abkühlung mit unterschiedlicher Abkühlrate im gleichen Bauteil z. B. beim Giessen

Während z. B. Munsir [12-18] den VSR-Effekt an Kleinproben mit Schweißnähten studiert hat, sind die Phänomene bei sehr grossen geschweissten Bauteilen ganz anders zu verstehen. Während der Effekt des Eigenspannungsabbaus durch Vibrationsbehandlung bei den Kleinproben nur für hohe Dehnungsamplituden (70 % und mehr der Fließgrenze) hervorgerufen werden kann, reichen bei grossen geschweissten Bauteilen eine Dehnungsamplitude von lediglich 5 bis 10 % der Fließgrenze. Dieser deutliche Unterschied könne nur durch verschiedene Mechanismen, resp. Modellvorstellungen erklärt werden. Das Standard-Modell geht von einer Superposition von Eigenspannungen und von den Spannungen während der Vibration aus. Falls diese Überlagerung nun Spannungen im Bereich der Fließgrenze ergeben, so kann das Standard-Modell den Abbau von Eigenspannungen durch elasto-plastische Verformung erklären. Nach Walker findet dies bei geschweissten Kleinproben, wie sie Munsir studiert hat statt. Das Standard-Modell wurde durch Kwofie in einem sehr detaillierten analytischen Simulations-Tool modelliert [87]. Auch bestehen Finite-Element-Simulationen von solchen Kleinproben, s. [80, 88]. Hingegen vermag das Standard-Modell den Effekt bei grossen Bauteilen und niederen Amplituden nicht zu erklären. Er gibt dafür eine ganz andere Erklärung ab: Es handelt sich dabei (mind. bei Baustahl) um eine Gefügeumwandlung/Phasenumwandlung die durch die Vibration ausgelöst wird. Bei grossen Bauteilen sei die Abkühlungsrate viel tiefer als bei Kleinproben (3.5 Std statt 30 Sek). Dies führe dazu, dass Austenite-Phasen teilweise nicht in Martensite umgewandelt werden. Diese Bereiche des Gefüges verharren nach der Abkühlung in einem thermodynamisch metastabilen Zustand. Wird nun das Bauteil vibriert, werden Versetzungen gebildet, welche sich im Gefüge bewegen können. Diese Bewegungsfreiheit ermöglicht die Allokation von Versetzungen an energetisch günstigeren Stellen (Martensite-Nuclei), wodurch eine Umwandlung von Austenite zu Martensite ausgelöst wird. Diese mikroskopische Phasenumwandlung führt zu Umlagerungen von Eigenspannungen. Zur Bildung der Martensite-Nuclei seien nur geringe Vibrationsamplituden erforderlich. Auch das zyklenabhängige Verhalten des VSR-Effektes könne gut mit dieser Mobilisierung von Versetzungen erklärt werden.

4 BEWERTUNG DES STAND DES WISSENS UND ERFAHRUNG

4.1 State-of-the-Art betreffend Eigenspannungsabbau mittels Vibrationen

Die Recherche zum Thema Vibrationsentspannen resp. "Vibration Stress Relief" hat über 100 Publikationen identifiziert, welche das Thema behandeln. Die gefundenen Publikationen ergeben ein uneinheitliches Bild. Obschon schon während dem 2. Weltkrieg solche Verfahren angewendet wurden, waren die Mechanismen und die Wirkungsweisen der in der Praxis angewendeten Verfahren noch 1980 unbekannt und deren Wirksamkeit umstritten. Dawson und Moffat bemühen sich in [52] in der Einleitung zu ihrer Studie einen Überblick über den Stand der Forschung zu geben. Sie geben dabei ihren Eindruck wieder, dass die Effektivität des Verfahrens mind. für die Verbesserung der Formstabilität bei Praktikern anerkannt ist. Demgegenüber seien die Wissenschaftler im Allgemeinen noch unentschieden. Zu viele auch umfangreiche Studien hätten Zweifel an der Wirksamkeit nicht ausräumen können. Zu diesem Schluss kommt auch Coules 2013 in seinem Übersichtspaper [89]. Dawson diskutiert eine 1972 fertiggestellte grosse Untersuchung am Battelle Memorial Institute ([39] ab S. 2.44). Diese grosse Studie habe umfangreiche Experimente umfasst, welche allesamt ein sehr ernüchterndes Ergebnis gebracht hätten. Die erwarteten Resultate wurden keineswegs gefunden; entweder war ein VSR-Effekt in der Streuung untergegangen oder die Amplituden mussten so hoch angesetzt werden, dass die Bauteile brachen. Die ganze Studie müsse als grosser Misserfolg bezeichnet werden. Die von Dawson beschriebene allgemeine Situation scheint sich auch nach 50 Jahren kaum geändert zu haben.

Die wichtigsten experimentellen Nachweise, dass der Prozess funktionieren kann, finden sich bei Walker et al [20], Munsif et al [13, 16, 18], Hahn [82], Sun et al. [55, 56], Farajian et al [64, 65], Jurcius et al [11, 86], Wang et al [69, 70], Chuvas et al [75], Li et al [76] und Mohanty [77]. Diese Arbeiten weisen positive Ergebnisse aus (Abbau der Makro-Eigenspannungen um 50 % oder mehr). In der Regel geben die Studien die notwendigen Angaben zu den Details über die experimentellen und analytischen Methoden und Verfahren, um die Ergebnisse nachvollziehen zu können. Die positiven VSR-Ergebnisse konnten in folgenden Fällen und unter folgenden Randbedingungen erzeugt werden:

- 1) Die Eigenspannungsabminderungen wurden in diesen Studien an kleinen Proben wissenschaftlich untersucht. Dabei handelt es sich um Biegebalken, welche dynamisch in eine Biegeschwingung versetzt wurden. Beispiele sind die Arbeiten von Dawson [39, 52], Walker und Munsif [12-18] und Zhao [88].
- 2) Eigenspannungen an Schweissnähten. Diese sind lokal sehr hoch und können bis in den Bereich der Fließgrenze gehen. Die Mehrzahl der Studien, die einen positiven Effekt gezeigt haben wurden an Schweissnähten gefunden. Die Angaben zur Eigenspannungsabminderung beziehen sich dabei immer auf den lokalen Wert der höchsten Eigenspannung auf der Schweissnaht.
- 3) Eigenspannungen, welche durch Kaltverformung erzeugt wurden sind in der Regel an der Oberfläche sehr hoch und können durch einmalige oder wenige Zyklen von Belastungen reduziert werden, wenn die gewählten Dehnungsamplituden im Bereich von 70 % oder mehr der Fließgrenze gewählt werden. Dies haben Walker et al an Baustahl [20] und Wang et al an Aluminiumlegierungen [68, 69] beobachtet.

Die dokumentierten Veränderungen des Eigenspannungszustandes können weitgehend mit einem klassischen elasto-plastischen Modell erklärt werden. Die Autoren weisen darauf hin, dass die Dehnungsamplituden, die gewählt werden müssen um Eigenspannungen abzubauen zu können, höher sind als die Dauerwechselfestigkeit. Daher sind Ermüdungsschäden durch diese Art von Vibrationsbehandlung nicht ausgeschlossen und müssen in der praktischen Arbeit beachtet werden.

Die grosse Schwierigkeit besteht in der Übertragbarkeit der Ergebnisse aus einfachen Kleinproben auf ganze Werkstücke. Studien an ganzen Werkstücken, wie z. B. diejenigen von Bühler und Pfalzgraf [38], Dreger [46], Adams et al [48], Claxton [42, 43], Fabbri [44], und Daffner [37] sind entweder als Erfahrungsberichte aufzufassen oder können keinen positiven Effekt zeigen. Ausnahmen sind die Studien von Rao [60,

61], Samardzic [71] und Li [76] welche einen Effekt an grösseren Werkstücken nachvollziehbar dokumentieren. Die Ergebnisse sind jedoch schwierig zu verallgemeinern. Eine Systematik der Mechanismen kann darin nicht erkannt werden.

Die Verformungsmuster bei der Vibration solcher Werkstücke sind sehr komplex und hängen von verschiedenen Faktoren ab: Geometrie des Werkstücks, Lagerung des Werkstückes, Anregungsrichtung, und Anregungsfrequenz. Ausser die Geometrie des Werkstückes können alle andern Faktoren mind. teilweise oder in Grenzen gewählt werden. Eine Schwingungsform bedeutet jedoch auch, dass die lokalen Verformungsarten (Zug/Druck, Biegung, Torsion) und deren Amplituden nicht frei einstellbar sind. Dies macht die Planung und Kontrolle einer gezielten Vibrationsbehandlung in der Praxis sehr schwierig. Mit der Variation der Frequenz über mehrere Eigenfrequenzen hinweg ergibt sich eine deutliche Variation des Schwingungsmusters. Damit können verschiedene Zonen im Werkstück einer starken Verformung unterworfen werden. Die Lage dieser Zonen sind jedoch nicht frei wählbar oder können nicht auf gewünschte Bereiche im Werkstück, z. B. an Schweissnähte gelegt werden. Auch die Variation der Anregungsrichtung kann begrenzt eine Variation des Schwingungsmuster erbringen.

Die Abminderung von Eigenspannungen durch Vibrationen mit kleinen Dehnungsamplituden ($<20\%$ der Fließgrenze) bleibt sehr fraglich. Insbesondere Dawson beurteilt die Möglichkeit, dass mit kleinen Amplituden (unterhalb der Dauerwechselfestigkeit) ein Effekt erzeugt werden kann, als gering [39].

Viele Autoren gehen davon aus, dass man bei Resonanzfrequenz schwingen muss [80, 88]. Sie vermischen dabei den Einfluss von Last und Amplitude, gehen nie konkret auf die Dehnungsamplitude ein. Ein lokales Materialvolumen interessiert sich nicht um die Eigenfrequenzen; dies ist eine Bauteileigenschaft! Bei der Schwingung eines komplexen Werkstücks sind die Dehnungsamplituden jedoch sehr unterschiedlich verteilt.

Das mehrachsige Vibrationsentspannen MEMV, wie es in den Patenten der Firma Wiap AG [2, 3] beschrieben wird, wurde noch nicht wissenschaftlich untersucht; entsprechende Publikationen gibt es noch keine. In einer Projektarbeit von Absolventen einer Technikerschule wurde eine Wiap-Anlage für grosse Wellen angewendet [37]. Somit kann diese Literaturstudie den Unterschied zwischen den üblichen VSR-Verfahren und dem neuartigen MEMV noch nicht dokumentieren. Insbesondere die Auswirkung einer Anregung in unterschiedlicher Richtung und die Überlagerung von bis zu acht unterschiedlichen Anregungen in verschiedenen Richtungen sind noch nicht systematisch untersucht worden. Die Beobachtungen der lokalen Beschleunigungswerte deuten darauf hin, dass die Anregungsrichtung einen grossen Einfluss auf die Bewegungsmuster hat. Die Änderung der dabei eingebrachten el. Energie (Stromstärke in Ampere) deutet auf eine unterschiedliche Vibration hin. Dabei kann man davon ausgehen, dass die unterschiedliche Anregungsrichtungen je nach Bauteilart in unterschiedlichen Zonen des Bauteils wirken.

4.2 Offene Fragen

Trotz der zahlreich vorhandenen Literatur bleiben doch auch gewisse – zum Teil fundamentale – Fragen teilweise nicht zufriedenstellend geklärt:

- 1) Welchen Einfluss hat die Anregungsrichtung und die Anregungsstärke auf die Entspannung? Können die unterschiedlichen Ergebnisse auf eine wirksame resp. unwirksame Anregungsrichtung oder –stärke zurückgeführt werden?
- 2) Wieweit sind die teilweise positiven Ergebnisse, welche an Kleinproben mit einfacher Geometrie gefunden wurden, auf grosse Werkstücke übertragbar?
- 3) Gibt es neben der elasto-plastischen Verformung bei Vibrationen mit grosser Amplitude einen signifikanten andern Effekt, welcher die Eigenspannungen beeinflussen kann? Wie etwa eine Gefügeveränderung (Initiierung Martensit-Umwandlung)? Veränderung der Versetzungsdichte oder der Textur?
- 4) Wieweit kann die Finite-Element-Simulation den Effekt einer MEMV-Behandlung an grossen Werkstücken wiedergeben? Hier stehen folgende Fragen im Vordergrund
 - a. In welche Richtungen sollen, je nach Bauteilart, die Vibrationen angeregt werden?
 - b. Welche Zonen des Bauteils werden dabei je nach Bauteilart in Schwingung versetzt?
 - c. Wie wichtig ist die Anregungsstärke (Amplitude) auf den Entspannungseffekt?
- 5) Wieweit kann das MEMV-Verfahren aus heutiger Sicht automatisiert werden, so dass möglichst alle Zonen eines Bauteils die zur Entspannung notwendigen Vibrationszyklen in genügender Stärke erfahren haben?
 - a. Horizontale Richtungsänderung der Anregung von 0° bis 360°
 - b. Vertikale Richtungsänderung der Anregung von 0° bis 90°
 - c. Variation der Amplitude jeweils von 0% bis 100%
- 6) Wieweit hat die Art der Ankopplung des Erregers (mittels Schraubzwingen oder andere Fixation) einen Einfluss auf den Entspannungseffekt?
- 7) Wieweit hat die Art der Lagerung des Bauteils (Gummi-Unterlage oder harter Boden) einen Einfluss auf den Entspannungseffekt?

4.3 Weiteres Vorgehen

4.3.1 Verifikation des MEMV®-Verfahrens an einem typischen Werkstück

- Wahl eines typischen Werkstück, an dem das Verfahren erfolgreich angewendet wurde.
- Messung der Eigenspannungen, oder Annahme von typischen Eigenspannungen
- Materialcharakterisierung: Spannungs-Dehnungs-Verhalten (statisch, zyklisch)
- Dokumentation der Anregungsart (Lage und Richtung der Exzentermasse, Unwucht, Frequenz, gemessene Beschleunigungen an ausgewählten Messpunkten)
- Simulation der Behandlung: Verifikation des Schwingungsmusters an Hand der Beschleunigungswerte an ausgewählten Messpunkten
- Prognose von Dehnungsamplituden an ausgewählten Stellen/Zonen (z. B. Schweissnähte)

4.3.2 Simulation des MEMV®-Verfahrens an neuen Werkstücken

- Wahl von neuen Werkstücken die vibrationsentspannt werden sollen
- Simulation der Schwingung mit Variation der Lagerung und Anregungsart (Lage und Richtung der Exzentermasse, Unwucht, Frequenz)

- Wahl der optimalen Anordnung (Werkstücklagerung, Anregungsart) in Bezug auf optimale Dehnungsamplituden an ausgewählten Stellen/Zonen (z. B. Schweissnähte)
- Können Kriterien angegeben werden die zu einer optimalen Behandlung führen? (Anleitung zur Behandlung / Handbuch)

5 SCHLUSSFOLGERUNGEN & AUSBLICK

Der aktuelle Entwicklungsstand des MEMV-Verfahrens lässt weiterhin ein grosses Potenzial offen, um die eingesetzten Apparaturen wie auch den Prozess selber (der effiziente und effektive Einsatz der Vibratoren und der Messtechnik) weiterzuentwickeln. In einem Folgeprojekt könnten somit die nachstehend aufgeführten Themenschwerpunkte gesetzt werden:

- Einsatz von numerischen Simulationswerkzeugen zur Optimierung des Verfahrens, und zur individuellen Planung von MEMV-Behandlungen (mittels Finite-Elemente-Simulation, FEM)
- Prozessoptimierung (Planung & Überwachung mittels moderner Messtechnik), mit dem Ziel
 - o das ganze Bauteilvolumen mit der Behandlung zu erreichen, und eine gleichmässige Beanspruchungs-Verteilung zu erzielen,
 - o Überwachen von Resonanzfrequenzen und Dämpfung, um eine Aussage über den erfolgreichen Abschluss der Behandlung zu haben,
 - o und schlussendlich um Prozesszeiten zu optimieren (Anzahl der Anregungspunkte und –Richtungen minimieren)
- Nachweis des Effekts bei grossen geschweissten Bauteilen (inkl. Durability), wenn durch das MEMV nicht grosse ('globale') Strukturverformungen eingebracht werden können
- Auswahl und Validierung einer Technik zum Messen der Oberflächeneigenspannungen "im Feld" (durch WIAP), um eine weitere genaue Aussage über den Erfolg machen zu können.

Ein zukünftiges F&E-Projekt könnte z.B. in die nachstehend aufgeführten (chronologischen) *Arbeitspakete* gegliedert werden:

1. Wahl eines typischen mittelgrossen geschweissten Bauteils (Referenz)
2. Finite-Element Simulationen von verschiedenen Anregungsarten (Variation von Richtung, Frequenz und Amplitude)
3. Parameterstudie und Bewertung der verschiedenen Anregungsarten
4. Anwendung des MEMV-Verfahrens an Referenz- Exemplaren mit Messung der Schwingungsmuster
5. Verifikation mittels Eigenspannungsmessung und Ermüdungsversuchen an Muster-Bauteilen
6. Vergleich von FE-Simulation und Experiment

REFERENZVERZEICHNIS

1. Widmer, H.P., *Petition von der WIAP AG-Ltd-SA – Thema Energieeffizienz*. 2019, Wiap AG.
2. Widmer, H.P., *Schweiz. Patentanmeldung: Verfahren und Vorrichtung zur Vibrationsentspannung von Werkstücken*. 2014: Schweiz.
3. Widmer, H.P., *Schweiz. Patentschrift: Verfahren und Vorrichtung zur Vibrationsentspannung von Werkstücken*. 2018: Schweiz.
4. Wang, H., L. Zhu, and B. Xu, *Residual Stresses and Nanoindentation Testing of Films and Coatings*. 2018: Springer.
5. Widmer, H.P., *Schweiz. Patentschrift: Verfahren zur Messung der Eigenspannungen von Werkstücken*, E.I.f.G. Eigentum, Editor. 2020: Schweiz.
6. Wikipedia. *Eigenspannungen*. 2021; Available from: <https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenspannung>.
7. Siegen, U., *Eigenspannungen*, in *Experimentelle Methoden der Werkstoffwissenschaften*, U. Siegen, Editor. 2021: Siegen.
8. Macherauch, E. *Residual Stresses*. in *Application of Fracture Mechanics to Materials and Structures*. 1984. Dordrecht: Springer Netherlands.
9. Decker, I., et al. *Nutzen numerischer Simulationen für das Einrichten realer Schweißprozesse*. DVS-Berichte, Bd. 186, S.34-38 1997; Available from: <http://www.wendelstorf.de/doc/1997/dvs186/html/jw3884.html>.
10. Hellwig, C. *Seminar Eigenspannungen - Fluch oder Segen*. in *Empa-Tagungsband zum Seminar Eigenspannungen*. 1996. Empa Library.
11. Jurčius, A., A. Valiulis, and O. Černašėjus, *Influence of Vibratory Stress Relief on Residual Stresses in Bridge Structural Members Weldments*. The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering, 2011. **6**: p. 243-248.
12. Munsî, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *A method for determining X-ray elastic constants for the measurement of residual stress*. Strain, 2003. **39**(1): p. 3-10.
13. Munsî, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *Vibratory stress relief - An investigation of the torsional stress effect in welded shafts*. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2001. **36**(5): p. 453-464.
14. Munsî, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *The influence of vibratory treatment on the fatigue life of welds: A comparison with thermal stress relief*. Strain, 2001. **37**(4): p. 141-149.
15. Munsî, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *The effect of vibratory stress on the welding microstructure and residual stress distribution*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2001. **215**(2): p. 99-111.
16. Munsî, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *Modification of residual stress by post-weld vibration*. Materials Science and Technology, 2001. **17**(5): p. 601-605.
17. Munsî, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *Vibratory weld conditioning: Treatment of specimens during cooling*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2000. **214**(3): p. 129-138.
18. Munsî, A.S.M.Y., A.J. Waddell, and C.A. Walker, *Vibratory weld conditioning - the effect of rigid body motion vibration during welding*. Strain, 1999. **35**(4): p. 139-143.
19. Walker, C.A., *A theoretical review of the operation of vibratory stress relief with particular reference to the stabilization of large-scale fabrications*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2011. **225**(3): p. 195-204.
20. Walker, C.A., A.J. Waddell, and D.J. Johnston, *Vibratory stress relief—an investigation of the underlying processes*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering, 1995. **209**(1): p. 51-58.
21. Shankar, S., *VIBRATORY STRESS RELIEF OF MILD STEEL WELDMENTS*, in *Oregon Graduate Center*. 1982: Bangalore.
22. ASTM, *Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*. 2020.

23. Weiss, S., G.S. Baker, and R.D. Das Gupta, *Vibrational Residual Stress Relief in a Plain Carbon Steel Weldment*. Welding Journal (Miami, Florida), 1976. **55**(2): p. 47s-51s.
24. Lüthi, T., *Beitrag zur Ermittlung von Eigenspannungen mit Ultraschall - Anwendung auf Schweissnähte*, in *Empa-Bericht Nr. 219*. 1990.
25. Van Petegem, S., *POLDI – Time-of-Flight Diffractometer for Engineering*. 2020.
26. Widmer, H.P., *Metall entspannen mit Vibration*. 2018, Wiap AG.
27. Widmer, H.P., *Schweiz. Patentanmeldung: Verfahren zur Messung von Eigenspannung in Werkstücken*. 2019.
28. Zappa, E. and N. Hasheminejad, *Digital Image Correlation Technique in Dynamic Applications on Deformable Targets*. Experimental Techniques, 2017. **41**(4): p. 377-387.
29. Wikipedia *Vibratory stress relief*. 2020.
30. SMM, R., *Metall-Entspannen mit Vibration*. Schweiz. Maschinenmarkt, 2009.
31. Advancedvsr. *FEATURED VSR APPLICATION* 2021; Available from: <https://www.advancedvsr.com/>.
32. Group, V.T. 2021; Available from: <https://vsrtechnology.net/>.
33. Mücke, K., *Eigenspannungen mit Schwingungen reduzieren*, in *Schweizer Maschinenmarkt SMM*. 2018.
34. *Vibratory Stress Relief*. Available from: <https://www.vibratorystressrelieving.com/vibratory-stress-relieving.html>.
35. Widmer, H.P., *Schweiz. Patentanmeldung: Vibrationsvorrichtung und Verfahren zur Vibrationsentspannung von Werkstücken*. 2019.
36. Widmer, H.P., *Schweiz. Patentschrift: Vorrichtung zur Vibrationsentspannung von Werkstücken*. 2021: Schweiz.
37. Daffner, M., et al., *Etablierung eines neuen mechanischen Behandlungsverfahrens zur Minimierung von Eigenspannungen in freiformgeschmiedeten Stahlbauteilen mittels kontrollierter Vibration*. 2017: Wetter, Germany.
38. Bühler, H. and H.G. Pfalzgraf, *Untersuchungen über den Abbau von Eigenspannungen in Gusseisen und Stahl durch mechanisches Rütteln und langzeitlagerung im Freien*. VDI-Forschungsheft. 1962, Germany: VDI-Verlag GmbH.
39. Dawson, R., *Residual Stress relief by vibration*, in *Mechanical Engineering*. 1975, Liverpool.
40. Gnirss, G., *Rütteln und Vibrationsentspannen; Shaking and vibratory stress relief*. TÜ. Technische Überwachung, 1986. **27**(11): p. 439-442.
41. Gnirss, G., *Vibration and Vibratory Stress Relief. Historical Development, Theory and Practical Application*. Welding in the World, 1988. **26**: p. 4-8.
42. Claxton, R.A., *Vibratory stress relieving - an effective alternative to thermal treatment for component stabilisation? (Part 1)*. Heat Treatment of Metals, 1991. **18**(2): p. 53-59.
43. Claxton, R.A., *Vibratory stress relieving - an effective alternative to thermal treatment for component stabilisation? (Part 2)*. Heat Treatment of Metals, 1991. **18**(3): p. 85-89.
44. Fabbroni, M., *Eigenspannungs-Minderung durch Vibrieren*, E. Breuer, Editor. 1999, Fachhochschule für Technik St. Gallen: St. Gallen, Schweiz.
45. McGoldrick, R.T. and H.E. Saunders, *SOME EXPERIMENTS IN STRESS-RELIEVING CASTINGS AND WELDED STRUCTURES BY VIBRATION*. Journal of the American Society of Naval Engineers, 1943. **55**(4): p. 589-609.
46. Dreger, D., *Good vibes reduce stresses in metal parts*. Machine Design, 1978. **50**(13): p. 100-103.
47. Doeblen, E., *Abbau von Eigenspannungen durch Vibration*
Reduction of residual stresses by means of vibration. Werkstatt und Betrieb, 1981. **114**(7): p. 459-French.
48. Klauba, B.B. and C.M. Adams. *PROGRESS REPORT ON THE USE AND UNDERSTANDING OF VIBRATORY STRESS RELIEF*. 1982. New York, NY, USA: ASME.
49. Klauba, B.B., C.M. Adams, and J.T. Berry. *Vibratory stress relief: Methods used to monitor and document effective treatment, a survey of users and directions for further research*. in *International Conference: Trends in Welding Research*. 2005.
50. Gifford, D.J. *Vibratory Stress Relief*. in *Metals and Materials Symposium*. 1983. Lower Hutt.
51. Widmer, H.P., *Film10C_HP_Alles_r4g_jim_r8_klein4*. Wiap AG.

52. Dawson, R. and D.G. Moffat, *Vibratory stress relief: A fundamental study of its effectiveness*. Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of the ASME, 1980. **102**(2): p. 169-176.
53. Polnov, V.G. and M.N. Mogil'ner, *Determination of the conditions of vibrational treatment of welded structures aimed at reducing residual stresses*. Svar. Proiz., 1984. **2**: p. 32-33.
54. Gnirss, G., *Vibration and Vibratory Stress Relief. Historical Development, Theory and Practical Application*
Inidan Welding Journal 1990. **22**.
55. Sun, M.C., Y.H. Sun, and R.K. Wang, *The vibratory stress relief of a marine shafting of 35# bar steel*. Materials Letters, 2004. **58**(3-4): p. 299-303.
56. Sun, M.C., Y.H. Sun, and R.K. Wang, *Vibratory stress relieving of welded sheet steels of low alloy high strength steel*. Materials Letters, 2004. **58**(7-8): p. 1396-1399.
57. Müller, F. and C.M. Sonsino, *EINFLUSS DES VIBRATIONSENTSPANNENS AUF DIE SCHWINGFESTIGKEIT VON REPARATURGESCHWEISSTEN NÄHTEN IM VERGLEICH ZUM SPANNUNGSARMGLÜHEN*, O. Buxbaum, Editor. 1991, Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF FhG): Darmstadt, Germany.
58. Sonsino, C.M., et al., *INFLUENCE OF STRESS RELIEVING BY VIBRATION ON THE FATIGUE BEHAVIOUR OF WELDED JOINTS IN COMPARISON TO POST-WELD HEAT TREATMENT*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1996. **19**(6): p. 703-708.
59. Degtyarev, V.A. and V.S. Shul'ginov, *Influence of the vibrotreatment of structural elements with residual stresses on their damping ability*. Strength of Materials, 1997. **29**(5): p. 531-537.
60. Rao, D., J. Ge, and L. Chen, *Vibratory Stress Relief in Manufacturing the Rails of a Maglev System*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004. **126**(2): p. 388-391.
61. Rao, D.L., et al., *Reduce the Residual Stress of Welded Structures by Post-Weld Vibration*. Materials Science Forum, 2005. **490-491**: p. 102-106.
62. Rao, D., et al., *The effectiveness evaluation of 314L stainless steel vibratory stress relief by dynamic stress*. International Journal of Fatigue, 2007. **29**(1): p. 192-196.
63. Luh, G.C. and R.M. Hwang, *Evaluating the effectiveness of vibratory stress relief by a modified hole-drilling method*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1998. **14**(11): p. 815-823.
64. Farajian, M., T. Nitschke-Pagel, and K. Dilger, *Mechanisms of residual stress relaxation and redistribution in Welded high-strength steel specimens under mechanical loading*. Welding in the World, 2010. **54**(11-12): p. R366-R374.
65. Farajian, M., R.C. Wimpory, and T. Nitschke-Pagel, *Relaxation and stability of welding residual stresses in high strength steel under mechanical loading*. Steel Research International, 2010. **81**(12): p. 1137-1143.
66. Tsvetkov, A.S., *ERHÖHUNG DER ZUVERLÄSSIGKEIT GROSSER GESCHWEISSTER KALTBESTÄNDIGER KONSTRUKTIONEN FÜR VERANTWORTLICHE ZWECKE WÄHREND EINER VERRINGERUNG RESIDUAL STRESSES*. 2011, St. Petersburg Polytechnic University: St. Petersburg, Russia.
67. Sędek, P. and M.S. Węglowski. *Application of mechanical vibration in the machine building technology*. in *Key Engineering Materials*. 2012. Trans Tech Publ.
68. Wang, J.-S., et al., *Texture Evolution and Residual Stress Relaxation in a Cold-Rolled Al-Mg-Si-Cu Alloy Using Vibratory Stress Relief Technique*. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013. **44**(2): p. 806-818.
69. Wang, J.-S., et al., *The effect of residual stress relaxation by the vibratory stress relief technique on the textures of grains in AA 6061 aluminum alloy*. Materials Science and Engineering: A, 2014. **605**: p. 98-107.
70. Wang, J.-S., et al., *The relationships between residual stress relaxation and texture development in AZ31 Mg alloys via the vibratory stress relief technique*. Materials Characterization, 2015. **99**: p. 248-253.
71. Samardžić, I., et al., *Influence of vibrations on residual stresses distribution in welded joints*. Metalurgija, 2015. **54**(3): p. 527-530.
72. Song, J. and Y. Zhang, *Effect of vibratory stress relief on fatigue life of aluminum alloy 7075-T651*. Advances in Mechanical Engineering, 2016. **8**(6): p. 1687814016654379.

73. Shalvandi, M., et al., *Influence of ultrasonic stress relief on stainless steel 316 specimens: A comparison with thermal stress relief*. Materials in engineering, 2013. **46**: p. 713-723.
74. Djuric, D., et al., *Vibration Stress Relief Treatment of welded high-strength martensitic steel*. Welding in the World, 2013. **55**(1-2): p. 86-93.
75. Chuvas, T.C., D.A. Castello, and M.P. Cindra Fonseca, *Residual stress relief of welded joints by mechanical vibrations*. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2016. **38**(8): p. 2449-2457.
76. Li, S., et al., *A combined computational and experimental study on vibration stress relief for large welded DH36 steel tube*. Journal of Vibroengineering, 2016. **18**(3): p. 1486-1496.
77. Mohanty, S., et al., *The residual stress distribution of CO2 laser beam welded AISI 316 austenitic stainless steel and the effect of vibratory stress relief*. Materials Science and Engineering: A, 2017. **703**: p. 227-235.
78. Gao, H., et al., *Fatigue life of 7075-T651 aluminium alloy treated with vibratory stress relief*. International Journal of Fatigue, 2018. **108**: p. 62-67.
79. Sheremet, O., et al., *DEFINITION OF ENERGY EFFICIENT LAW OF MECHANICAL IMPACT IN VIBRATORY STRESS RELIEF OF METAL PARTS*. 2019.
80. Yang, Y.P., *Understanding of Vibration Stress Relief with Computation Modeling*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2008. **18**(7): p. 856-862.
81. Yang, Y.P., S.A. David, and T. DebRoy. *Finite element modeling of vibration stress relief after welding*. in *Trends in Welding Research (7th International Conference)*. 2005. Callaway Gardens Resort, Pine Mountain, Georgia, USA.
82. Hahn, W.F., *Vibratory Residual Stress Relief and Modifications in Metals to Conserve Resources and Prevent Pollution*. 2002, Center of Environmental and Energy Research (CEER). p. 8.
83. Zhuang, W.Z. and G.R. Halford, *Investigation of residual stress relaxation under cyclic load*. International Journal of Fatigue, 2001. **23**: p. 31-37.
84. Hebel, A.G., *Subresonant vibrations relieve residual stresses*. Metall Progress, 1985. **Nov. 1985**: p. 51-55.
85. Jurčius, A., A.V. Valiulis, and V. Kumšlytis, *Vibratory stress relieving - It's advantages as an alternative to thermal treatment*. Journal of Vibroengineering, 2008. **10**(1): p. 123-127.
86. Jurčius, A., et al., *Influence of vibratory stress relief on residual stresses in weldments and mechanical properties of structural steel joint*. Journal of Vibroengineering, 2010. **12**(1): p. 133-141.
87. Kwofie, S., *Plasticity model for simulation, description and evaluation of vibratory stress relief*. Materials Science and Engineering: A, 2009. **516**(1-2): p. 154-161.
88. Zhao, X.C., et al., *Simulation of vibration stress relief after welding based on FEM*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2008. **21**(4): p. 289-294.
89. Coules, H.E., *Contemporary approaches to reducing weld induced residual stress*. Materials Science and Technology, 2013. **29**(1): p. 4-18.