

WIAP MEMV · LITERATURSTUDIE 2021

Vibrationsentspannen: was die Wissenschaft weiss

Auswertung von über 100 Veröffentlichungen aus
acht Jahrzehnten

Wirkt Vibration auf Eigenspannungen in Metallteilen, und wenn ja, wie? Die Empa ging dieser Frage im Auftrag der WIAP in einer ausgedehnten Literaturstudie nach. Der Bericht fasst zusammen, was belegt ist, was erklärt werden kann und was noch offen bleibt.

über 100

ausgewertete
Veröffentlichungen

seit 1943

sind
Schwingungsbehandlungen
an Bauteilen beschrieben

30 bis 70 %

Abbau der höchsten lokalen
Eigenspannung in gut
dokumentierten Studien

10 000

Lastzyklen, nach denen der
Abbau in mehreren Studien
abgeschlossen war

— Das Fazit in drei Sätzen

1. Es kann wirken. Mehrere Studien zeigen einen deutlichen Abbau von Eigenspannungen, besonders an Schweissnähten und Kleinproben.

2. Der Weg zum grossen Bauteil ist schwer.

Ergebnisse lassen sich von einfachen Proben nur schwer auf ganze Werkstücke übertragen.

3. Die Formstabilität ist der Hauptnutzen. Viele

Praxisberichte belegen sie indirekt, die direkte Messung am grossen Bauteil ist der nächste Schritt.

— Warum diese Studie?

Das MEMV-Verfahren der WIAP stützt sich auf Erfahrungswissen. Die Studie soll die wissenschaftliche Grundlage dafür schaffen und die Akzeptanz bei Kunden verbessern.

Ehrlicher Blick. Die Studie nennt Belege ebenso wie offene Fragen. Dieses Papier gibt beides wieder.

Eigenspannungen und wie man sie misst

Eigenspannungen bleiben im Bauteil, auch wenn keine äussere Kraft wirkt. Sie entstehen beim Umformen, beim Schweiessen oder beim ungleichmässigen Abkühlen und führen bei der Bearbeitung zu Verzug.

1. Art

Makroskopisch, über Bauteilbereiche verteilt, etwa in einer Schweissnaht oder einem verbogenen Stab. Sie verformen das Bauteil.

2. Art

Mikroskopisch, zwischen den Körnern des Gefüges. Sie gleichen sich über grössere Bereiche aus.

3. Art

Mikroskopisch, an Fehlstellen und Versetzungen im Gitter. Sie führen nicht zu Verformung.

Messverfahren im Überblick

VERFAHREN	WIE ES MISST	REICHWEITE
Röntgen-Beugung	Atomabstand an der Oberfläche, Genauigkeit meist ± 20 MPa, bestenfalls ± 7 MPa, Auflösung etwa 0,1 mm	einige μm tief
Bohrloch-Methode	Dehnungsänderung neben einem Bohrloch (ASTM E837), punktuell, weniger genau nahe der Fliessgrenze	punktuell
Barkhausenrauschen	Magnetische Hysterese ferromagnetischer Metalle	oberflächennah
Ultraschall	Schallgeschwindigkeit hängt von den Eigenspannungen ab	im Volumen
Synchrotron	Beugung mit Synchrotronstrahlung	bis 200 μm
Neutronen-Beugung	Auch für grosse Werkstücke, etwa am POLDI-Instrument des Paul Scherrer Instituts	50 bis 100 mm

Alle Methoden messen Dehnungen, keine Spannungen. Die Spannung wird aus den Elastizitätskonstanten des Werkstoffs berechnet. Deshalb braucht jedes Material seine eigene Kalibrierung.

Ende 2018 hat WIAP bereits ein grosses Werkstück an der POLDI-Anlage untersuchen lassen. Zusätzlich hat WIAP eine eigene Messmethode zum Patent angemeldet, die aus der Veränderung der gemessenen Beschleunigung auf den Eigenspannungszustand schliesst.

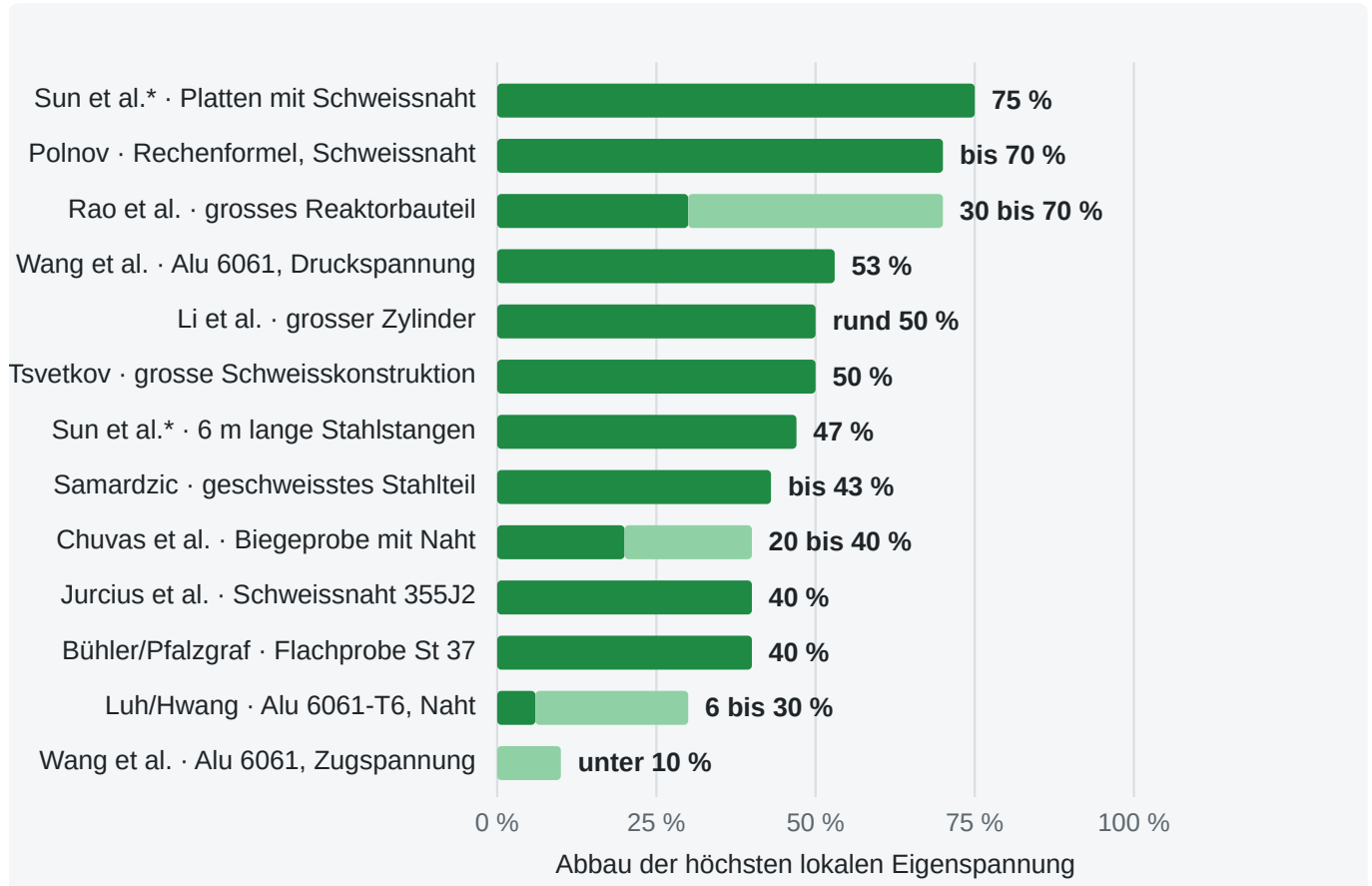
Schwingungen am Werkstück

Erzwungene Schwingung. Beim Vibrationsentspannen regt eine periodische Kraft das Werkstück an. Die Amplitude hängt von Geometrie, Steifigkeit, Massenverteilung sowie Ort, Richtung und Frequenz der Anregung ab.

Resonanz. Nahe einer Eigenfrequenz wird die Schwingung sehr gross. Beschleunigungssensoren zeigen an den Messstellen, wo die Amplitude überhört ist, und liefern ein Bild vom Schwingungsmuster.

Was die Studien gefunden haben

Die Recherche fand viele Arbeiten mit positivem Ergebnis, aber auch einige ohne Wirkung. Die gut dokumentierten Studien zeigen für Schweissnähte meist einen Abbau von 30 bis 70 % der höchsten lokalen Eigenspannung.



Gemeldeter Abbau der höchsten lokalen Eigenspannung. UNTERSCHIEDLICHE PROBEN UND MESSMETHODEN

Eigene Darstellung nach den Angaben der Studie. Dunkel: untere Grenze, hell: Spanne bis zum Höchstwert. * Die Studie bemängelt, dass die Angaben zum Verfahren knapp sind und die Schlussfolgerung teils nicht nachvollziehbar ist.

Keine oder geringe Wirkung

Fraunhofer-Institut 1991: Die Eigenspannungen änderten sich nur gering, das Vibrieren ersetzt das Glühen nicht.

Djuric et al.: Röntgen-Beugung und digitale Bildkorrelation zeigten keinen Einfluss, das Barkhausenrauschen einen gewissen.

Gifford: Mit der Bohrloch-Methode wurde kein Effekt gemessen, allerdings lag die Messstelle weit von der Naht.

Frühe Grossversuche

Bühler und Pfalzgraf 1962: Glühen (2 Stunden bei 550 °C) entspannte fast vollständig, zwei Jahre Lagerung im Freien nichts. An einer geschweissten Flachprobe brachte Biegevibration mit hoher Amplitude 40 % Abbau.

Battelle 1972: Eine grosse Studie fand den erhofften Effekt nicht. Dawson nennt sie einen grossen Misserfolg.

Ganze Werkstücke: Am klarsten überzeugen Rao, Samardzic und Li.

Hochfestes Aluminium. Gao et al. fanden an der Legierung 7075-T651 einen Bestwert der Ermüdungsfestigkeit bei etwa 0,04 mm Schwingungsamplitude, darüber sinkt sie wieder. Song sah nach Vibration eine leicht bessere Ermüdungsfestigkeit.

Wie der Abbau erklärt wird

Es gibt keine einheitliche Theorie. Die Literatur kennt vier Erklärungen, die je nach Bauteilgrösse und Art der Eigenspannung unterschiedlich passen.

1. Standard-Modell

Eigenspannung und Schwingenspannung überlagern sich. Wird die Fließgrenze örtlich überschritten, verformt sich der Werkstoff plastisch, und die Eigenspannung sinkt. Der Abbau geschieht schon in den ersten wirksamen Schwingungen.

2. Versetzungen

Die Vibration erzeugt neue Versetzungen (Frank-Read-Mechanismus), die sich an energetisch günstigere Stellen bewegen. Röntgenmessungen zeigen, dass die Versetzungsdichte beim Vibrieren steigt, beim Glühen dagegen sinkt.

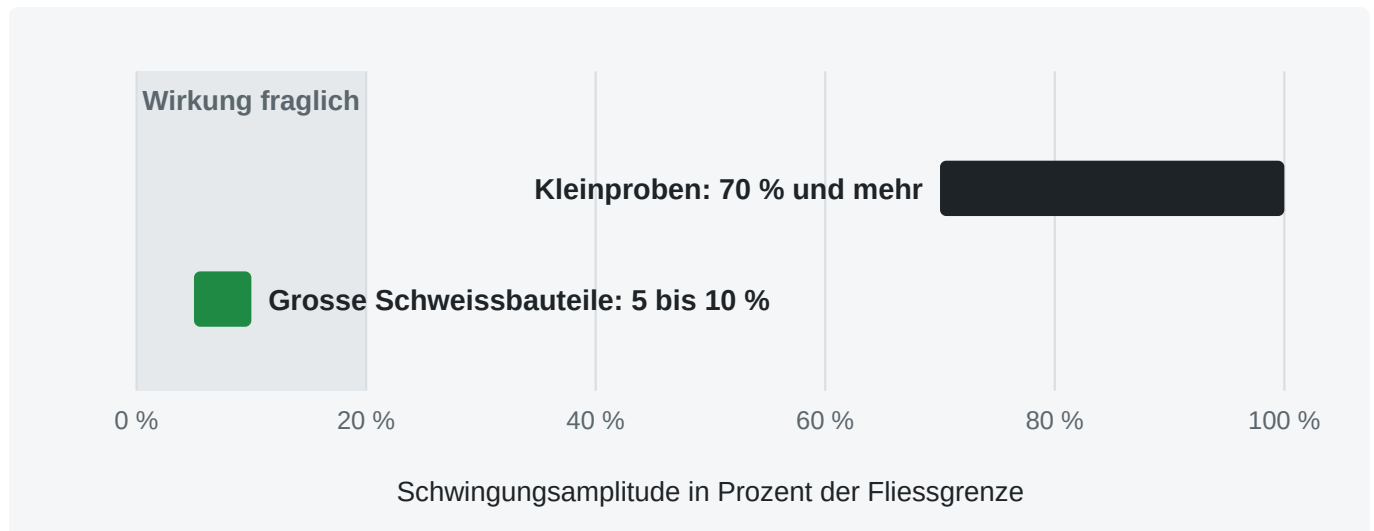
3. Phasenumwandlung

Walker: In grossen Bauteilen kühlt Stahl so langsam ab, dass Restaustenit zurückbleibt. Schon kleine Schwingungen lösen dort die Umwandlung zu Martensit aus und verlagern Eigenspannungen.

4. Mikro-Relaxation

Sedek: Die Schwingenspannung erreicht nur bis 50 MPa, weit unter der Fließgrenze. Die Wirkung auf die Formstabilität ähnelt der Lagerung im Freien über 800 Tage.

Wie gross muss die Amplitude sein?



Nötige Amplitude nach Walker. SCHEMATISCH, NACH DEN ANGABEN DER STUDIE

Bei Kleinproben braucht es hohe Amplituden, bei grossen Schweissbauteilen genügen nach Walker 5 bis 10 % der Fließgrenze. Dawson und die Empa halten eine Wirkung unter 20 % für sehr fraglich.

Frequenz knapp unter der Resonanz

Ein Praxis-Aufsatz von 1985 begründet, dass die Dämpfung knapp unterhalb der Resonanz am grössten ist. Dort wandelt sich die meiste Schwingungsenergie im Material um. Shankar fand, dass der Abbau gleichmässiger gelingt, wenn eine wandernde statt einer stehenden Welle entsteht.

Die Resonanz allein erklärt es nicht

Die Empa weist darauf hin, dass ein kleines Materialvolumen nichts von den Eigenfrequenzen des Bauteils weiss. Entscheidend ist die Dehnungsamplitude an der Stelle. In einem komplexen Werkstück ist sie sehr ungleich verteilt.

Zahl der Zyklen. Dawson, Walker und Degtyarev sehen den Abbau nach etwa 10 000 Zyklen (5 bis 10 Minuten) abgeschlossen, danach droht Ermüdungsschaden. Dawson bezifferte ihn auf bis zu 25 %.

Stand des Wissens und was folgt

Was belegt ist

Positive Ergebnisse stammen vor allem von Biegebalken, Schweissnähten und kaltverformten Oberflächen und passen zum plastischen Modell. Dafür braucht es Amplituden von etwa 70 % der Fließgrenze oder mehr, über der Dauerfestigkeit. Ermüdungsschäden sind dann nicht ausgeschlossen.

Was schwierig bleibt

Bei ganzen Werkstücken sind Ort, Richtung und Grösse der Dehnungsamplitude nicht frei wählbar, weil jede Schwingungsform ihr eigenes Muster hat. Mehrere Frequenzen und Richtungen verändern es, aber nur begrenzt gezielt.

— Drei offene Fragen

Übertragbar?

Wie weit gelten Ergebnisse von einfachen Kleinproben für grosse Werkstücke?

Anderer Effekt?

Gibt es neben der plastischen Verformung einen zweiten Mechanismus, etwa Gefügeumwandlung, Versetzungen oder Textur?

Simulierbar?

Wie gut bildet die Finite-Elemente-Simulation die Behandlung grosser Werkstücke ab?

— Weiteres Vorgehen

1. Verifikation an einem Werkstück

Ein typisches, erfolgreich behandeltes Werkstück wird genau dokumentiert, mit Eigenspannungen, Werkstoffverhalten, Unwucht, Frequenz und Beschleunigungen. Die Simulation wird damit überprüft und prognostiziert die Dehnungsamplituden an Schweissnähten.

2. Simulation an neuen Werkstücken

Für neue Werkstücke wird die Schwingung bei verschiedener Lagerung und Anregung simuliert. Ziel ist die beste Anordnung und am Ende eine Anleitung zur Behandlung.

— Was das für WIAP bedeutet

Mehrere Richtungen

Laut ihren Patentschriften regt WIAP in mehreren der drei Raumrichtungen an und steuert mit Beschleunigungssensoren. Die Studie bestätigt, dass Richtung und Frequenz das Schwingungsmuster verändern.

Erste Messung 1999

In einer Diplomarbeit der FH St. Gallen verzogen sich Stahlteile, die beim Spannungsarmglühen Verformungen zeigten, nach Vibration mit einer WIAP-Anlage nicht.

Formstabilität im Fokus

WIAP-Erfahrungsberichte messen die Wirkung an der Formstabilität. Die Studie nennt das indirekt und empfiehlt zusätzlich die direkte Messung der Eigenspannungen.

Quelle. Studienbericht Nr. 5211.01839-1, Ausgedehnte Literaturstudie über den Abbau von Eigenspannungen durch das Einbringen von Schwingungen und Wellen. Empa, Dübendorf, 10. März 2021, im Auftrag der WIAP AG (Innosuisse-Innovationsscheck). Zusammenfassung in eigenen Worten, massgebend ist der Originalbericht.

WIAP AG Ltd SA

Industriestrasse 48L
CH-4657 Dulliken

Tel +41 62 752 42 60

wiap@widmers.info
www.wiap-ag.ch