WIAP® Werkzeugmaschinen
Neumaschinen, Drehmaschinen, Sondermaschinen

**Projektarbeit Herbst 2017**
Dauer: 12 Wochen
Betrieb: Freiformschmiede für Stahl-Grossteile
Anlage: MEMV 20E
Team: vier Studierende eines Berufskollegs
Betreuung: Technischer Leiter des Betriebs

WIAP MEMV · PRAXISPROJEKT 2017

# MEMV im Härtetest: Wellen bis 20 Tonnen

## Eine Projektgruppe führt das Vibrationsentspannen in einer Grossschmiede ein

Schmiedeteile für den Schiffs- und Anlagenbau müssen auf hundertstel Millimeter genau laufen, dafür müssen die Eigenspannungen raus. Ein Betrieb wollte wissen, ob Vibrationsentspannen das Glühen ersetzen kann, und erprobte die MEMV 20E drei Monate im Werkstattalltag.

**bis 20 t**
Stückgewicht der behandelten Wellen

**0,008 mm**
Planlauf, den Teile des Schiffsbaus teils erreichen müssen

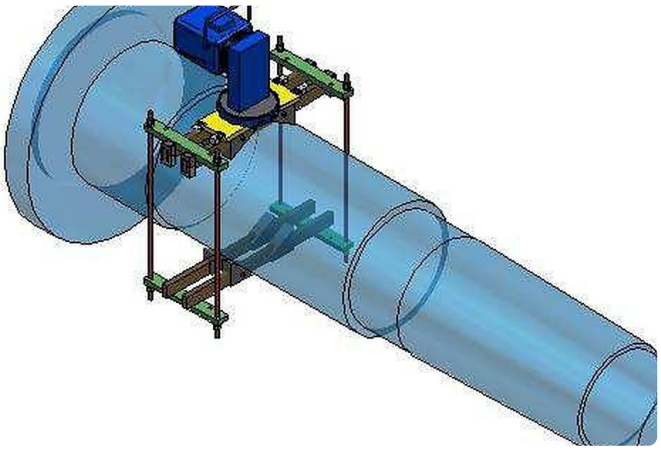
**4 × 10 min**
Behandlung pro Werkstück, je eine Richtung

**alle Ziele**
Festforderungen laut Abschlussbericht erfüllt

## Ausgangslage

Beim Schmieden und Abkühlen kühlt die Oberfläche schneller ab als der Kern. Im Kern bleiben Zugspannungen, die sich bei der Zerspanung lösen und die Teile verziehen.

Bisher halfen nur Spannungsarmglühen: mindestens 48 Stunden im Ofen bei rund 500 bis 550 °C, danach höchstens 20 °C pro Stunde abkühlen. Das kostet Zeit, Energie und Transporte. Vibrieren dauert gut 40 Minuten, direkt in der Halle.



Die Anlage auf einer Welle: Exzenter-Motor, Grundplatte, Flacheisen mit Kontaktbacken, Spannrahmen aus Gewindestangen.

## Der Auftrag

Die Gruppe sollte das Verfahren im Betrieb begleiten und diese Aufgaben lösen:

- Anleitung für angelernte Fachkräfte schreiben
- Produktklassen und Programme festlegen
- Messergebnisse bewerten
- Anlage im Handling verbessern
- Kosten und Energie mit dem Glühen vergleichen
- Auf Wunsch: Restmagnetismus und Ungänzen untersuchen

### Die Anlage in Kürze

Zwei Halbscheiben auf der Motorwelle erzeugen eine Unwucht. Eine Scheibe ist verstellbar: bei 0 % heben sich beide auf, bei 100 % ist die Unwucht am grössten.

Zwei Baugruppen: **1,1 kW** mit rund 0,93 kg und **2,2 kW** mit rund 1,86 kg Exzentermasse. Arbeitsdrehzahl 2800 bis 6000 $min^{-1}$.

ABLAUF

# So wird eine Welle entspannt

Aufbau, Eigenresonanz suchen, Programm schreiben, in vier Richtungen vibrieren. Das Team hat daraus eine Anleitung gemacht, mit der angelernte Fachkräfte arbeiten können.

### 1. Lagern und aufspannen

Die Welle liegt auf Holzprismen mit Gummiunterlagen (rund 50 Shore A, innen hohl). So kann sie nicht wandern, und die Vibration geht nicht in den Boden.

Der Exzenter sitzt bei etwa einem Drittel der Länge, nicht über einer Lagerstelle und nicht in der Totzone. Zuerst wird das Oberteil am Kran vormontiert, dann die Anlage mit den Gewindestangen M20 auf 150 Nm auf der Welle fixiert und mit Wasserwaage oder Messlaser ausgerichtet.

### 2. Eigenresonanz finden

Im Handbetrieb wird die Drehzahl langsam erhöht, bis die Eigenresonanz deutlich hörbar wird. Diese Grenze wird notiert und rasch durchfahren, denn sie belastet alle Bauteile der Anlage.

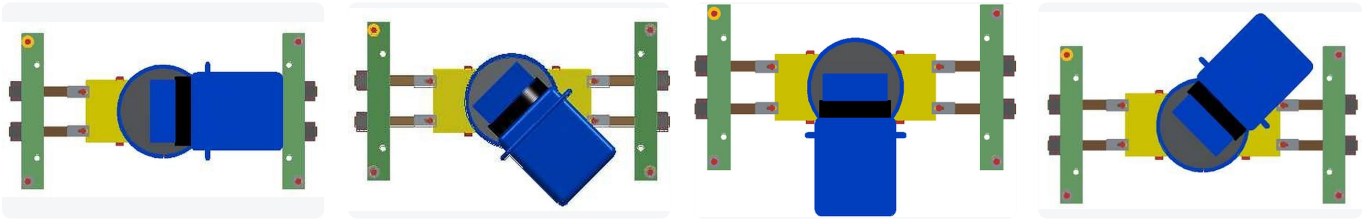
### 3. Programm schreiben

Das Programm liegt knapp unter der Eigenresonanzgrenze, **10 Minuten pro Richtung**. Die Grenze muss in jeder Richtung neu ermittelt werden.

> **Beispiel, 6-t-Welle.** Grenze bei 4500 $min^{-1}$, gefahren wurde 4400. Eine zweite, baugleiche Welle liess sich mit denselben Werten behandeln.

### 4. Vier Richtungen vibrieren

Der Motor wird nacheinander auf 0°, 45°, 90° und 135° zur Wellenachse gestellt. Anfangs wurde auf Herstellervorgabe nur in drei Richtungen gearbeitet, heute sind es vier.



0° 45° 90° 135°

Die vier Wirkrichtungen des Exzenters, Draufsicht auf die Anlage.

## Messen: zwei Wege, die sich ergänzen

### Manuell

Mit einem Handmessgerät (Beschleunigung) werden bis zu zwölf Messpunkte in vier Richtungen am Anfang und am Ende jedes Durchgangs erfasst, im Protokoll notiert und in einer Tabelle ausgewertet.



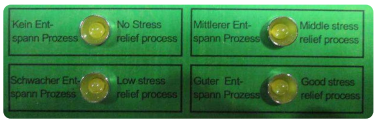
### Stationär

Ein Beschleunigungssensor sitzt fest am Bauteil, das Steuergerät zeichnet die Beschleunigung über den ganzen Durchgang auf und druckt das Diagramm.




### Am Steuergerät

Nach rund 60 s und kurz vor Schluss wird die Beschleunigung verglichen. Vier Leuchten zeigen: kein, schwacher, mittlerer oder guter Entspannprozess.



BEWERTEN

# Wann ist eine Entspannung gelungen?

### Manuelle Messung

Aus den Werten vorher und nachher ergeben sich pro Durchgang die «totale Veränderung» und die «totale Verschiebung». Zeigen beide eine deutliche Änderung, gilt der Prozess als wirksam. Im Betrieb galt **10 m/s²** als Grenzwert: darunter gilt die Entspannung als nicht erfolgreich, der Auftrag wird gesperrt und die Fertigungs- und Qualitätsstelle entscheiden.

### Stationäre Messung

Das Steuergerät vergleicht die Beschleunigung nach 60 s mit der kurz vor Ende. Im gezeigten Beispiel sanken sie von +4,82 auf +1,38 m/s². «Mittlerer» oder «guter» Entspannprozess in mindestens einem Durchgang gilt als Erfolg.

> **Nur zusammen aussagekräftig.** Ein Sensor sieht nicht jede Richtung gleich gut: Steht er in X-Richtung, spürt er bei 0° fast nichts und bei 90° am meisten. Deshalb galt: weder auf die manuelle noch auf die stationäre Messung verzichten.

### Der Beleg kommt in der Drehbank

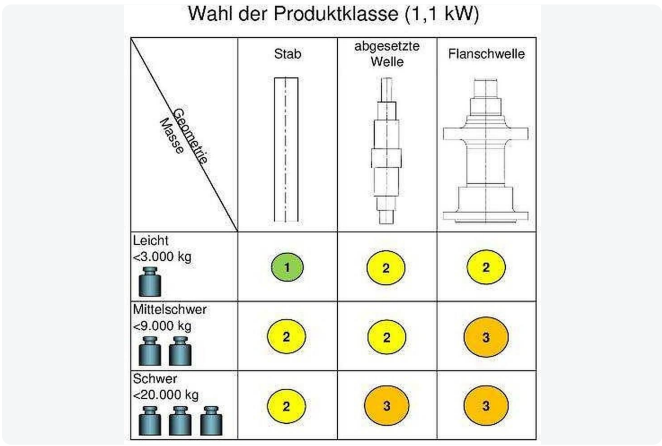
Den eigentlichen Beweis liefert die folgende Bearbeitung: Rundlauf und Planschlag werden beim Drehen laufend überwacht und im Massprotokoll festgehalten. Liegen sie in der Toleranz, ist die Entspannung bestätigt. Andere Verfahren schieden aus Kostengründen aus: Röntgen, Ultraschall und Bohrlochverfahren messen nur an der Oberfläche oder punktuell, brauchen viele Messungen oder zerstören das Bauteil.

### Was das Team verbessern würde

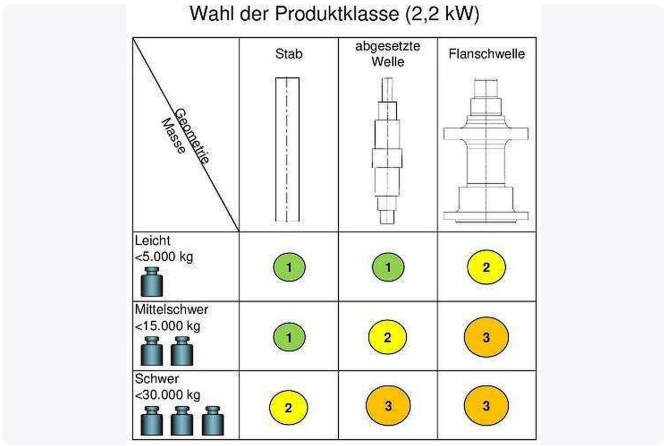
- Werte direkt am Tablet erfassen statt handschriftlich
- Mehrere stationäre Sensoren, bis zu vier sind mittelfristig vorgesehen
- Funksensor statt dünnem Kabel
- Programme im Steuergerät speichern

## Produktklassen: Masse mal Form

Je schwerer und komplizierter ein Teil, desto mehr Energie braucht es. Die Gruppe hat die Teile in einer 3×3-Matrix aus Masse und Geometrie (Stab, abgesetzte Welle, Flanschwelle) eingeteilt. Daraus folgt ein Richtwert für die Exzenterstellung: Klasse 1 über 25 bis 50 %, Klasse 2 über 50 bis 75 %, Klasse 3 über 75 bis 100 %. Die Werte sind Ausgangspunkte, im Einzelfall wird nachjustiert.




Baugruppe 1,1 kW: leicht unter 3000 kg, mittelschwer unter 9000 kg, schwer unter 20 000 kg.




Baugruppe 2,2 kW: leicht unter 5000 kg, mittelschwer unter 15 000 kg, schwer unter 30 000 kg.

ZUSATZFRAGEN DES BETRIEBS

# Magnetismus und Ungänzen

Zwei Wünsche gingen über die Pflichtaufgaben hinaus. Beide Antworten sind klar, auch wenn sie nicht jeder erhofft hat.

### Kann Vibration Restmagnetismus entfernen?

Nach der Magnetpulverprüfung blieb eine Welle zu stark magnetisch: Gefordert waren unter 8 A/cm, an vier Messstellen lagen die Werte zwischen 9,9 und 28,4 A/cm. Ab etwa 8 A/cm stört Restmagnetismus den Lauf von Drehteilen, ab etwa 4 A/cm hält er Späne fest.

Die Welle wurde 45 Minuten in drei Richtungen vibriert (Exzenter 25 %, bis 4600 $min^{-1}$) und währenddessen und danach mit dem Feldstärkemessgerät geprüft.

**Ergebnis:** keine Abweichung von den Werten davor. Das Vibrationsentspannen entmagnetisiert nicht.

### Vergrössert Vibration vorhandene Fehler?

Ein weichgeglühtes, unbearbeitetes Schmiedeteil mit Ultraschallbefund diente als Probe. Acht repräsentative Fehlerstellen wurden blank geschliffen und im Impuls-Echo-Verfahren nach DIN EN 10228-3 geprüft, die Geräteparameter wurden gespeichert.

Danach vibrierte das Teil 4 × 10 Minuten (90°, 45°, 135°, 0°, zwischen 3900 und 4800 $min^{-1}$, Exzenter 25 %). Die grösste Änderung der Beschleunigung gab es an einer Messstelle mit 18,2 auf 8,6 $m/s^2$.

**Ergebnis:** bei der Wiederholung keine Abweichung. Die Ungänzen haben sich nicht verändert oder vergrössert.

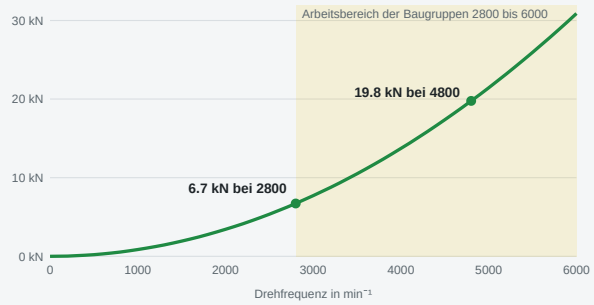
## Was im Alltag brach, und was das Team daraus macht

Für Teile dieser Grösse lagen bei Projektstart noch keine Erfahrungen vor. Der Versuch zeigte schnell die Grenzen der Anlage. Die Gruppe hat jede Schwachstelle beschrieben, berechnet und eine Lösung vorgeschlagen oder umgesetzt.

### Gesehene Probleme

- Geschweisste Klemmbacken: Schweissnähte gerissen, Gewinde zerstört, nach drei Einsätzen ausgetauscht
- Aufspannung wandert, Schrauben lösen sich
- Abgerissene Schrauben zwischen Grundplatte und Niederhalter
- Gewinde im Drehring ausgerissen, Madenschraube an der Exzenterscheibe gelöst
- Unklare Marke an der Exzenterverstellung

**Die Rechnung dazu.** Bei 1,8625 kg Exzentermasse, 42 mm Schwerpunktradius und 4800 $min^{-1}$ wirkt eine Fliehkraft von rund **19 765 N**. Jede der vier Schrauben trägt davon ein Viertel, also etwa 4941 N Wechselkraft.




Fliehkraft $F = m \cdot (2\pi \cdot n / 60\ s)^2 \cdot r$ bei maximaler Exzentereinstellung, eigene Darstellung nach den Angaben der Projektdokumentation.

VERBESSERUNGEN

# Sieben Änderungen an der Anlage

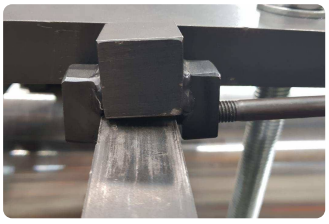
Aus den Problemen entstanden konkrete Konstruktionsvorschläge. Mehrere wurden während des Projekts gebaut, andere nur vorgeschlagen.

### 1. Klemmbacken aus Vollmaterial

Aus fünf Ideen wählte das Team die seitliche Klemmbacke mit vier Schrauben: gute Flächenpressung, kein Verkanten, keine Schweissnaht. Das Muster wurde gefräst, geprüft und für die restlichen drei Backen freigegeben.



Rohling mit Nut.



Eingebaut auf dem Flacheisen.

### 2. Getrennte Aufnahme von Zug und Scherung

Die Schrauben (M12, Festigkeitsklasse 12.9) nehmen nur Zugkräfte auf, geschlitzte Spannhülsen (ISO 13337, Nennmass 16 mm) die Querkräfte. Die Hülsen halten bei Sicherheit 2 und Anwendungsfaktor 1,5 gerechnet die Last: 14,8 kN gegen 49 kN zulässig. Grosse Scheiben (Ø 30 mm) decken die weiteren Bohrungen ab.

### 3. Libelle für die Waage

Eine abnehmbare Libelle an der Seite der Grundplatte zeigt, ob die Anlage waagerecht liegt. Abnehmbar, damit die Vibration sie nicht zerstört.

### 4. Muttern sichern

Die Muttern der Gewindestangen lösten sich. Vorläufig wird gekontert. Vorgeschlagen sind Schnellkontermuttern, die sich mit einer Viertel- bis halben Drehung sichern lassen.

### 5. Exzenter in 7,5°-Schritten einstellen

Die Schraube mit der groben Meisselmarke wird plangefräst und rastet über ein federndes Druckstück alle 7,5° ein. Alle 90° gibt es eine tiefere Raste, ein Pfeil markiert 0°.



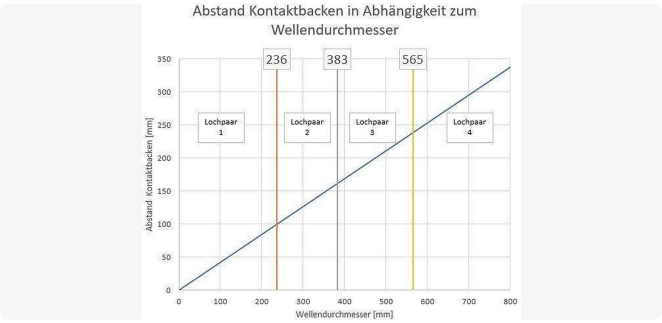

Verstellen des Exzenters mit Inbusschlüssel, Skala auf der Scheibe.

### 6. Vibrationsrichtung per Raste

Statt nach Augenmass dreht man den Motor in vier Bohrungen im Innenring, markiert mit der Gradzahl. Ein Aluminiumhalter mit federndem Druckstück bleibt an der Anlage.

### 7. Kontaktbacken für jeden Durchmesser

Damit die Welle mittig an den Backen anliegt, wurden die Flacheisen mit weiteren Lochpaaren versehen. Der Lochabstand hängt vom Wellendurchmesser ab und wurde mit der Sehnenformel berechnet.




Abstand der Kontaktbacken in Abhängigkeit vom Wellendurchmesser, vier Lochpaare.

**Noch offen.** Der ausgerissene Gewindering soll künftig mit geformtem statt geschnittenem Gewinde gefertigt werden. Das ist laut Dokumentation ein Hinweis und nicht erprobt. Zusätzlich wurde eine Abflachung am Ring vorgeschlagen, damit eine Mutter eingesetzt werden kann, statt zu reparieren.

EINFÜHRUNG IM BETRIEB

# Arbeitsplatz, Sicherheit, Kosten

### Arbeitsplatz

Statt den Hallenkran zu belegen, ist ein fester Platz beim Warenausgang vorgesehen: ein Säulenschwenkkran (Ausleger 4 m, 125 kg, 270° Schwenk, 2,8 m Hub), Auflageböcke mit Gummiauflage (120 × 120 × 80 cm), Werkzeugwagen mit Schaumeinlagen, fahrbare Anlagenwand, Tisch für Steuergerät und Drucker sowie eine fahrbare Treppe, denn der Motor sitzt schnell 1,40 m hoch.

### Sicherheit

- Schulung an der Anlage, die Anleitung allein genügt nicht
- Gehörschutz: 70 bis 120 dB, besonders laut bei langen, dünnen Teilen und Schweisskonstruktionen
- Augen- und Fussschutz, nie allein arbeiten
- Exzenter nur bei Stillstand und gedrücktem Not-Aus verstellen
- Kein Körperkontakt während der Vibration

## Vibrieren gegen Glühen: die Rechnung

Verglichen wurde nur der Entspannungsprozess selbst: $CO_2$ mit 0,527 kg/kWh für Strom und 0,220 kg/kWh für Gas (11,45 kWh/m³), Kosten mit 11,93 Cent/kWh Strom und 3,35 Cent/kWh Gas im Mittel des Vorjahres. Personalkosten fehlen, weil dazu keine Angaben vorlagen.

| $CO_2$ PRO BEHANDLUNG | KG |
|---|---|
| MEMV mit 1,1 kW, 0,8 h, 75 % Last | **0,35** |
| MEMV mit 2,2 kW, 0,8 h, 75 % Last | **0,70** |
| Glühen, 6-t-Welle (206 m³ Gas) | **519** |
| Glühen, 8-t-Welle (361 m³ Gas) | **909** |
| Glühen, 11-t-Welle (422 m³ Gas) | **1063** |

**0,21 €**
Strom für eine Vibrationsbehandlung mit dem 2,2-kW-Motor

**115,07 €**
Gas für einen Glühprozess bei durchschnittlich 300 m³

**ca. 3450 €**
Ersparnis pro Jahr bei 30 Werkstücken, die vibriert statt geglüht werden

Glühen verursacht mindestens das 700-Fache an $CO_2$, und die reinen Verfahrenskosten sind etwa 548-mal höher.

## Das Ergebnis

Alle Festforderungen sind erfüllt, die Abnahme durch den Betrieb lautete «sehr zufriedenstellend», die Wiederholbarkeit wurde dokumentiert. Bedienen sollen nur angelernte Fachkräfte mit Grundkenntnissen der Mechanik. Mehrere Änderungsvorschläge gingen laut Dokumentation an WIAP.

**Quelle.** Dokumentation zur Maschinenbau-Projektarbeit Herbst 2017, «Etablierung eines neuen mechanischen Behandlungsverfahrens zur Minimierung von Eigenspannungen in freiformgeschmiedeten Stahlbauteilen mittels kontrollierter Vibration», Projektgruppe eines Berufskollegs, Betrieb anonymisiert. Zusammenfassung in eigenen Worten, die Zahlen stammen aus der Projektdokumentation.

**WIAP AG Ltd SA**
Industriestrasse 48L
CH-4657 Dulliken

Tel +41 62 752 42 60
wiap@widmers.info
www.wiap-ag.ch