

# Höherfrequentes Hämmern – Internationaler Stand der HFMI-Technologie

Peter Gerster, GEC; Frank Schäfers Fa. PITEC

Mit dem Einsatz der Ultrasonic Impact Treatment (UIT) Technologie durch die Firma Applied Ultrasonics fand das höherfrequente Hämmern in Europa im Jahr 2004 seinen Anfang. Durch die anfängliche Skepsis der Wissenschaftler und der Industrie wurde diese Technologie nur zögernd in der Praxis eingesetzt. Nachdem mittlerweile die hervorragenden Ergebnisse bezüglich der Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit und somit signifikanten Verbesserung der Lebensdauer, vor allem bei Schweißkonstruktionen, international erkannt wurden, setzt sich diese Technologie in der Praxis immer mehr durch. Der Bericht befasst sich mit dem heutigen Stand dieser Technologie.

## 1. Einleitung

Dass man mittels Hämmern Druckeigenspannungen erzeugt, die sich positiv auf die Schwingfestigkeit auswirken ist schon sehr lange bekannt. Jedoch war die Wirkung der hierzu verwendeten, herkömmlichen Luftmeißel oder auch Nadelhammer so ungleichmäßig und oft auch oberflächlich, dass dieses Hämmern wegen der mangelnden Reproduzierbarkeit nie anerkannt wurde. Erst durch die Entwicklung des höherfrequenten Hämmerns (in Deutschland bekannt unter HFH, international unter HFMI) wurde von der Wissenschaft diese Technologie anerkannt.

## 2. Internationaler Stand der Technologie

Im Rahmen des International Institute of Welding (IIW) wurde der Effekt von Schweißnahtnachbehandlungen auf die Ermüdungsfestigkeit bereits umfassend untersucht, woraus auch internationale Empfehlungen und Anwendungsrichtlinien entstanden sind. Zahlreiche Untersuchungsergebnisse für geschweißte Stahlverbindungen mit einer Streckgrenze von 235 bis 1300 MPa zeigen beispielhaft, dass durch eine HFH-Nachbehandlung eine wesentliche Steigerung der Ermüdungsfestigkeit von bis zu 225 % im Bereich der Langzeitfestigkeit (ab rund einer Millionen Lastzyklen) erreicht werden kann. Durch vergleichende Versuche an Grundmaterialproben wird außerdem verdeutlicht, dass bei einer Anwendung des Verfahrens die Ermüdungsfestigkeit des Grundmaterials nahezu zur Gänze ausgenutzt werden kann, womit ein hohes Leichtbaupotenzial für geschweißte Strukturen gegeben ist. Dies gilt insbesondere für den Einsatz von höherfesten Stählen, bei denen ja bisher laut Eurocode die Ermüdungsfestigkeit unabhängig von der eingesetzten Festigkeit wäre.

Das höherfrequente Hämmern wurde hierbei unter dem englischen Begriff High Frequency Mechanical Impact (HFMI) eingeführt und basierend auf langjährigen Beobachtungen internationaler Forschungsergebnissen wurden nun Empfehlungen zur Bemessung für eine von der Grundmaterialfestigkeit abhängige Steigerung der Ermüdungsfestigkeit ausgearbeitet, welche nun in dem Dokument „IIW Recommendations for the HFMI Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints“ im Springer-Verlag veröffentlicht wurden. Bild 1a zeigt den Titel dieser Veröffentlichung und Bild 1b einen Auszug aus dem diesem IIW Dokument, aus dem ersichtlich ist, dass mit steigender Streckgrenze die Ermüdungsfestigkeit signifikant zunimmt.

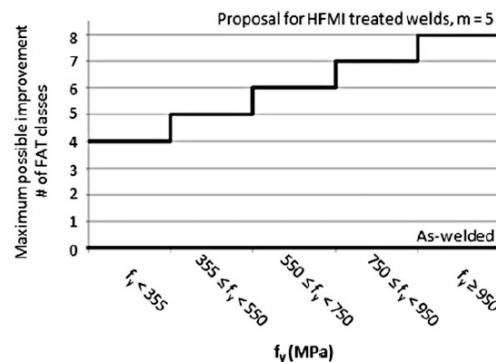
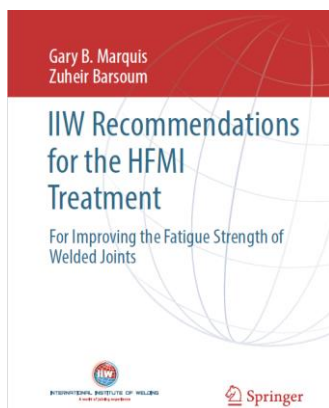


Fig. 16 Maximum increase in the number of FAT classes as a function of  $f_y$  [33]

**Bild 1a:** Titel des IIW Dokuments **Bild 1b:** Erhöhung der FAT Klasse durch HFMI

### 3. PIT Gerät

Am Beispiel des derzeit international führenden Verfahrens des Marktführers PITEC GmbH möchten wir den Stand dieser Technologie einmal näher erläutern.

Der englischsprachige Begriff Pneumatic Impact Treatment (PIT) bezeichnet ein Nachbehandlungsverfahren, wobei durch höherfrequentes Hämmern der Oberfläche eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit erzielt wird. Im Speziellen wird die Methode bei Schweißverbindungen angewendet, wobei eine wesentliche Erhöhung der Lebensdauer erreicht werden kann. Aber auch nicht geschweißte Konstruktionen können durch das gezielte Einbringen von Druckeigenspannungen an den „Hotspots“ in ihrer Schwingfestigkeit verbessert werden. Die Wirkungsweise beruht dabei auf einer Reduktion der geometrischen Kerbwirkung am Nahtübergang, einem Aufbau von Druckeigenspannungen und einer Verfestigung des Materials im nachbehandelten Bereich. Durch die einfache Bedienbarkeit und einer hohen Reproduzierbarkeit zeichnet sich das Verfahren insbesondere für industrielle Anwendungen im Anlagen-, Behälter-, Maschinen- oder Stahlbau, Schienenfahrzeugbau, usw. aus.

Schon in früheren Praktiker Heften wurde bereits ausführlich über den Vorteil von höherfrequenten Hämmerverfahren zur Erhöhung der Lebensdauer bzw. Ermüdungsfestigkeit von Schweißkonstruktionen durch Schweißnahtnachbehandlung mit der PIT Technologie berichtet. Deshalb wird hier nur in Kurzform der Aufbau und die Wirkungsweise des Gerätes erklärt.

Diese Pneumatic Impact Treatment (PIT) Technologie wurde von der Firma PITEC GmbH entwickelt. Hierbei werden neben einer Verfestigung der Oberfläche Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich induziert, sowie bei Schweißnähten die Kerbwirkung der Nahtübergänge wesentlich verbessert. Die beim Schweißen entstehenden sehr hohen Zugeigenspannungen im Nahtübergang, die üblicherweise Werte bis zur Streckgrenze erreichen können, werden mit gleich hohen Druckeigenspannungen überlagert.

Aus diesem Grund setzt sich diese Technologie in der Industrie immer mehr, sowohl in der Neufertigung, als auch bei der qualifizierten Sanierung von Schweißkonstruktionen sowie zur Erhaltung von Anlagenverfügbarkeiten durch.

### 4. Die Wirkungsweise von PIT

PIT ist ein höherfrequentes Hämmerverfahren, das zur Ertüchtigung von Schweißnähten entwickelt wurde. Sowohl die Frequenz, als auch die Schlagkraft können unabhängig voneinander geregelt werden. Nur dadurch ist es möglich, den verschiedenen Anforderungen der unterschiedlichen Materialien gerecht zu werden.

Die mechanischen Impulse werden durch gehärtete Bolzen, welche in der Geometrie auf die jeweilige Anwendung angepasst sind, auf eine zu behandelnde Oberfläche übertragen. Der Fluidic Muscle (Fa. Festo) arbeitet hierbei in einem optimalen Frequenzbereich und überzeugt durch hohe Dynamik bei geringer Masse. Dieser Antrieb arbeitet sehr zuverlässig und verschleißarm.

Um die Vibrationen durch das höherfrequente Hämmern für den Bediener möglichst gering zu halten und um die Reproduzierbarkeit unabhängig vom Bediener zu gewährleisten, arbeitet das System gegen ein integriertes Federsystem, so dass das Handgerät von der Schlagkraft vollkommen entkoppelt ist. Ergebnisse über die Prüfung der sicherheitstechnischen Anforderung "Schutz gegen schädliche Schwingungen" durch das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (BGIA) bestätigen einen sehr geringen Wert von gerade einmal rund 5 m/sec<sup>2</sup>.



**Bild 3:** Transportkoffer



**Bild 4:** Blick aufs Handgerät Hintergrund Steuergerät

Die erforderliche Ausrüstung zeigt Bild 3 im Transportkoffer, während im Bild 4 das Handgerät mit der Steuereinheit im Hintergrund dargestellt wird.

### 5. Vorteile der PIT Technologie

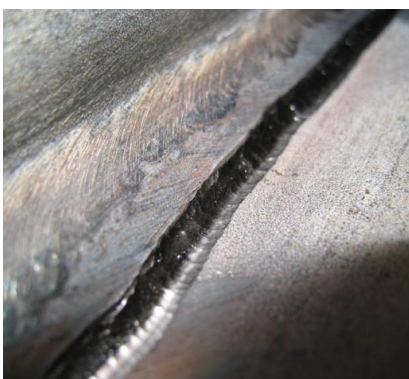
Aufgrund der gesammelten umfangreichen Erfahrungen des PIT Teams bereits im Einsatz der UIT Technologie in Europa, haben sich folgende Vorteile herauskristallisiert:

- das derzeit führende HFMI Verfahren
- trotz gleichem Effekt, leichter und günstiger als Ultraschallverfahren
- bietet die höchste Anwendungsvielfalt
- sehr geringe Handarmvibration von nur ungefähr 5 m/Sek.<sup>2</sup> nachgewiesen
- umfangreichstes Angebot
- effektiver als herkömmliche Nachbehandlungsmethoden
- Geschwindigkeiten von linear 20 cm/min oder flächig 10 cm<sup>2</sup>/min
- volle Leistung bei nur 250 Ltr/min bei 6 bar
- robuster Bauweise für industriellen Einsatz
- besonders nachhaltiges Qualitätskonzept

### 6. Anwendungsvielfalt der PIT Technologie

Die PIT Technologie bietet sicherlich die meisten verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten von allen Nachbehandlungsverfahren.

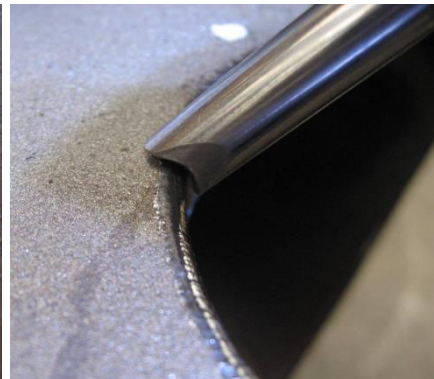
Der Normalfall der HFMI Behandlung ist die Behandlungsspur des Nahtübergangs zum Grundwerkstoff zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit (siehe Bild 5).



**Bild 5:** Behandlungsspur



**Bild 6:** Zwischenlagenbehandlung



**Bild 7:** Kantenbehandlung

In der Praxis gibt es jedoch häufig Stellen, die durch Schleifen oder einen flachen Auslauf der Naht keine ausreichende Erhöhung bieten. Um auch hier eine nachhaltige Behandlung sicher zu stellen, behandeln gut ausgebildete Anwender diese Stellen flächig von ca. Mitte der WEZ bis ca. Mitte der Naht selbst. Durch die mögliche flächige Behandlung mit dem PIT Gerät können auch einzelne Zwischenlagen von Schweißnähten behandelt werden (siehe Bild 6). Dadurch werden die sich lagenweise aufbauende Schrumpfspannungen nachweislich reduziert, was auch einem möglichen Verzug entsprechend entgegenwirkt.

Das PIT Verfahren bietet bisher als einziges Verfahren mit einem konkaven Bolzen die Möglichkeit der Behandlung von Kanten an Stirnflächen oder Bohrungsränder an (siehe Bild 7). Die dadurch eingebrachten Druckeigenstressungen in der Randzone verhindern ebenfalls sehr effektiv eine frühe Rissbildung.

Eine Spannungsrissskorrosion tritt auf, wenn folgende Bedingungen vorherrschen:





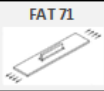
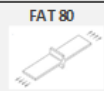
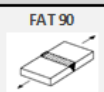
- Korrosionsempfindliches Material (z.B. CrNi-Stähle, spez. Alu-legierungen)
- Korrosives Medium
- Zugeigenstressungen

Wenn nun bei solchen Schweißkonstruktionen die Zugeigenspannungen an den Schweißnahtoberflächen und Wärmeeinflusszonen durch Druckeigenspannungen in diesen Bereichen überlagert werden können, dann ist auch die Gefahr der Spannungsrissskorrosion gebannt.

Die effiziente und robuste Bauweise des Systems erlaubt neben den manuellen Anwendungen auch die problemlose Anwendung am Roboter. Außerdem gibt es ein spezielles Handgerät für den Einsatz unter Wasser (siehe auch: Der Praktiker Heft 9 2011).

### 7. Das wirtschaftliche Potenzial einer PIT Behandlung

Durch die neu veröffentlichten IIW Empfehlungen (Okt.2016) hat der Konstrukteur in seinem Berechnungsverfahren nun die Möglichkeit je nach Nachbehandlungsverfahren und Streckgrenze des eingesetzten Werkstoffes relativ einfach die entsprechende FAT-Klasse zu bestimmen. Um dies zu verdeutlichen haben wir in der nachfolgenden Tabelle 1 die Bemessungsempfehlungen des IIW einmal anhand der 3 gängigsten Schweißdetails in einer übersichtlichen Form dargestellt:

FAT Klassen der Details im geschweißten Zustand	Streckgrenze fy	Schleifen		WIG/TIG Dressing		Hammer-/Needle Peening		PIT	
		Faktoren	FAT-Klassen	Faktoren	FAT-Klassen	Faktoren	FAT-Klassen	Faktoren	FAT-Klassen
									
		Neigung m=3		Neigung m=3		Neigung m=3		Neigung m=5	
<b>Längssteife</b>									
	235 fy ≤ 355	1,30	FAT 90	1,30	FAT 90	1,30	FAT 90	1,57	FAT 112
	> 355 fy ≤ 550					1,50	FAT 100	1,76	FAT 125
	> 550 fy ≤ 750							1,97	FAT 140
	> 750 fy ≤ 950							2,25	FAT 160
<b>Quersteife</b>									
	235 fy ≤ 355	1,30	FAT 100	1,30	FAT 100	1,30	FAT 100	1,56	FAT 125
	> 355 fy ≤ 550					1,50	FAT 112	1,75	FAT 140
	> 550 fy ≤ 750							2,00	FAT 160
	> 750 fy ≤ 950							2,25	FAT 180
<b>Stumpfstoß</b>									
	235 fy ≤ 355	1,30	FAT 112	1,30	FAT 112	1,30	FAT 112	1,55	FAT 140
	> 355 fy ≤ 550					1,50	FAT 125	1,77	FAT 160
	> 550 fy ≤ 750							2,00	FAT 180
	> 750 fy ≤ 950							2,00	FAT 180
		> hohes Fehlerpotential - Unterschliff od. Schleifbrand - zusätzliche Kerben od. Riefen - Staub/Lärm/zeitintensiv		> nur in Wannenlage > Spannungsprofil		> wenig reproduzierbar > hohe Handarmvibration		> höchste Verbesserung > hohe Reproduzierbarkeit > nachhaltige Qualitätssicherung > ~ 20 cm/min.	
<b>Referenzen:</b>									
> Hobbacher A., IIW recommendations for fatigue design of welded joints and components, WRC bulletin 520, New York: The Welding Research Council, 2009 > Marquis et al., Fatigue strength improvement of steel structures by high-frequency mechanical impact: proposed fatigue assessment guidelines, Weld World 57, pp. 803-822, 2013 > IIW Recommendations on High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints (in press)									

**Tabelle 1:** Im direkten Vergleich zeigt sich das technische und wirtschaftliche Potenzial von Pneumatic Impact Treatment (PIT) am deutlichsten

Dies bedeutet in der Praxis:

<b>Am Beispiel einer Quersteife aus folgendem Werkstoff:</b>	<b>S355</b>	<b>S700</b>	<b>S960</b>
Einstufung im geschweißten, unbehandelten Zustand:	FAT 80	FAT 80	FAT 80
Durch Schleifen Verbesserungsfaktor 1,3 erreicht man:	FAT 100	FAT 100	FAT 100
Durch TIG Dressing Verbesserungsfaktor 1,3 erreicht man:	FAT 100	FAT 100	FAT 100
Durch klassisches Hammer-Peening Faktor 1,3 (1,5) erreicht man:	FAT 100	FAT 112	FAT 112
Durch PIT (HFMI) Verbesserungsfaktor lt. Tab. erreicht man:	FAT 125	FAT 160	FAT 180

Das heißt bei der Verwendung eines hochfesten Stahles S960 könnte man anstelle der FAT-Klasse 80 unbehandelt nach einer PIT Behandlung mit einer FAT-Klasse 180 rechnen (wobei FAT 160 schon dem unbeeinflussten Grundwerkstoff entspricht). In diesem Fall könnte man auch bei zyklisch schwingenden Belastungen mit hochfesten Stählen doch extrem leichter bauen.

### 8. Zukunftsaussichten der Technologie

Das vorgestellte IIW Dokument erleichtert nun doch dem Konstrukteur diese Technologie vor allem im „gesetzlich nicht geregelten Bereich“ anzuwenden. Aber auch im „gesetzlich geregelten Bereich“ gibt es immer häufiger, Zustimmungen im Einzelfall. Im Schienenfahrzeugbau ist diese Technologie durch versch. umfangreichen Versuchen bereits etabliert.

Da es schwierig ist eine Europäische Norm aufgrund solcher signifikanter Ergebnisse relativ kurzfristig zu ändern, laufen bereits seit 2 Jahren an der Universität in Stuttgart (am Institut für Konstruktion und Entwicklung) und am KIT der Universität in Karlsruhe im Rahmen eines Forschungsauftrags, umfangreiche Untersuchungen, mit dem Ziel eine DAST-Richtlinie für das höherfrequente Hämmern zu erstellen.

Eine Zusammenfassung über die verschiedenen Möglichkeiten von Schweißnahtnachbehandlungen finden Sie auch in Kooperation mit DVS Media im Dezember 2016 neu erschienenen Buch:

Schweißnahtnachbehandlungen WEKA Media Praxislösungen Artikel-Nr.: 500524 ISBN:978-3-8111-6888-6 (siehe Link <http://www.dvs-media.eu/de/neuerscheinungen/3528/schweissnahtnachbehandlung> )

oder in dem elektronischen Regelwerk: „Schweißaufsicht kompakt“ vom WEKA Verlag