

# "Höherfrequente Hämmerverfahren – Vorstellung der neuen DASt-Richtlinie 026"

Dipl.-Ing. (FH) Peter Gerster, IWE

---

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Verfahrensbeschreibung und Wirkungsweise</b> .....	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Forschungsergebnisse</b> .....	<b>3</b>
3.1	IIW Recommendations for the HFMI Treatment .....	3
3.2	DASt-Richtlinie 026 „Ermüdungsbemessung bei Anwendung HFH“ .....	4
<b>4</b>	<b>Qualitätssicherung</b> .....	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Anwendungen der HFMI Technologie in der Praxis</b> .....	<b>7</b>
5.1	Einsatz im Schienenfahrzeugbau .....	7
5.2	Einsatz im Maschinenbau .....	7
5.3	Einsatz im Brückenbau .....	8
5.4	Einsatz bei der Sanierung .....	9
<b>6</b>	<b>Zukunftsaussichten</b> .....	<b>9</b>
<b>7</b>	<b>Quellen und Literatur</b> .....	<b>10</b>

# 1 Einleitung

Dass man mittels Hämmer 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.

Mit dem Einsatz der Ultrasonic Impact Treatment (UIT) Technologie durch 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 wurde, setzt sich diese Technologie in der Praxis immer mehr durch. Durch diese positiven Effekte entwickelten sich dann weitere international zugelassene Varianten von HFMI, die in Bild 1 dargestellt sind. Der Bericht befasst sich mit dem heutigen Stand dieser Technologie und Regelwerke.

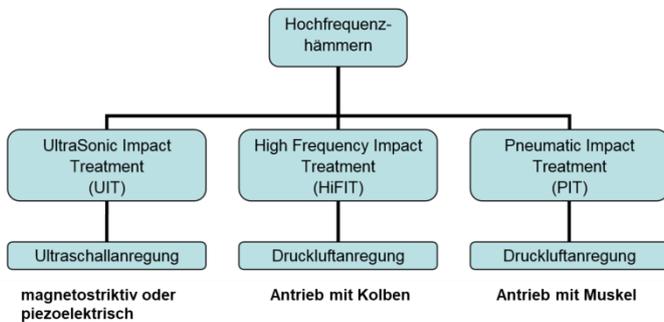


Bild 1: Übersicht der Verfahren



Bild 2: Übersicht zugelassener HFMI-Geräte

# 2 Verfahrensbeschreibung und Wirkungsweise

Im Speziellen wird die Methode bei Schweißverbindungen angewendet, wobei eine wesentliche Erhöhung der Lebensdauer erreicht werden kann. 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.

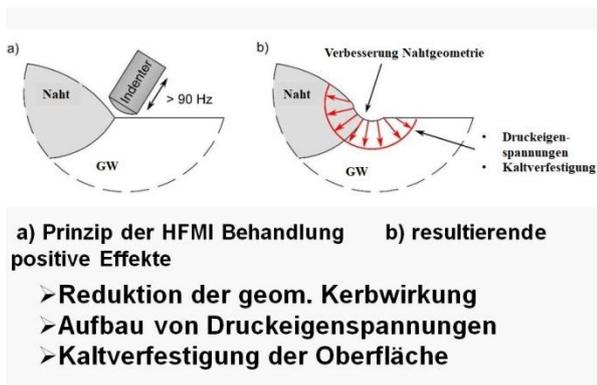


Bild 3: Wirkungsweise HFMI (schematisch)

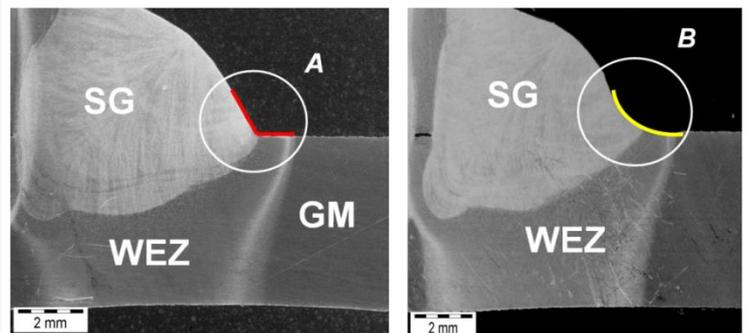


Bild 4: Wirkungsweise HFMI am Makroschliff

Gegenüber bisherig üblichen Nachbehandlungsverfahren, wie zum Beispiel Schleifen, Kugelstrahlen oder Spannungsarmglühen, wobei eine Steigerung der Ermüdungsfestigkeit bzw. Lebensdauer meist nur durch einen Effekt erzielt wird, kommen bei den HFMI-Verfahren folgende Wirkungsweisen kombiniert in einem Arbeitsgang zur Geltung (siehe auch Bilder 3 und 4):

- Reduktion der geometrischen Kerbwirkung

Durch die Nachbehandlung wird der für die Ermüdungsbeanspruchung kritische Übergang vom Grundmaterial zur Schweißnaht ausgerundet (siehe Bilder 2 und 3), wodurch dies zu einer wesentlichen Reduzierung der geometrischen Kerbwirkung in diesem Bereich führt. Speziell bei kerbscharfen Geometrien, wie zum Beispiel Schweißnahtenden, trägt dieser Effekt wesentlich zur Wirkungsweise bei.

- Verfestigung des Materials

Bedingt durch die Umformung des Materials findet im nachbehandelten Bereich eine lokale Verfestigung statt. Je nach Werkstoff und Verfestigungsverhalten kann dies zu einer wesentlichen Erhöhung der Härte und somit auch zu einer Festigkeitssteigerung führen.

- Aufbau von Druckeigenspannungen

Zusätzlich zur lokalen Verfestigung werden Druckeigenspannungen eingebracht, welche entgegen den ermüdungsrelevanten Zugspannungen wirken und dadurch die gesamte Beanspruchung in der höchstbelasteten Zone senken. Zur Verifikation des sich ausbildenden Eigenspannungszustandes durch die Nachbehandlung können Messungen der Eigenspannungen mittels Röntgendiffraktometrie oder Bohrlochmethode dienen, aber auch eine Abschätzung des lokalen Eigenspannungszustandes basierend auf einer numerischen Simulation ist möglich. Im Bild 5 sind die vorhandenen hohen Zugeigenspannungen (blaue Kurve) nach dem Schweißen eines S700MC dargestellt. Die Werte liegen im Bereich der Zugfestigkeit des Grundwerkstoffes. Die Simulation des Eigenspannungsverlaufes nach der PIT-Behandlung (rote Kurve) zeigt, dass durch diese Behandlung Druckeigenspannungen ebenfalls in der Höhe der Festigkeit des Grundwerkstoffes im oberflächennahen Bereich eingebracht werden. Deutlich ist auch die Tiefenwirkung der Druckeigenspannungen (bis ca. 2,3 mm) zu erkennen. Auch die Messergebnisse der Druckeigenspannungen mit der klassischen Bohrlochmethode (bis ca. 1 mm Tiefe) stimmen speziell bei dem Experiment 2 sehr gut mit der Simulation überein. Das Ergebnis dieser verschiedenen Faktoren spiegelt sich sehr deutlich in dem Wöhler-Schaubild Bild 6 an dem Werkstoff S355 wieder.

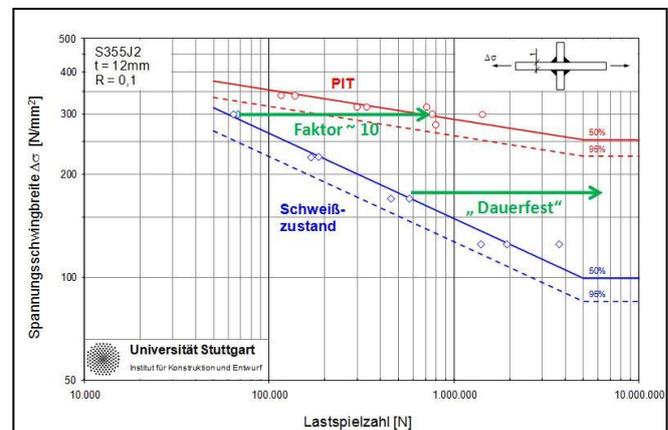
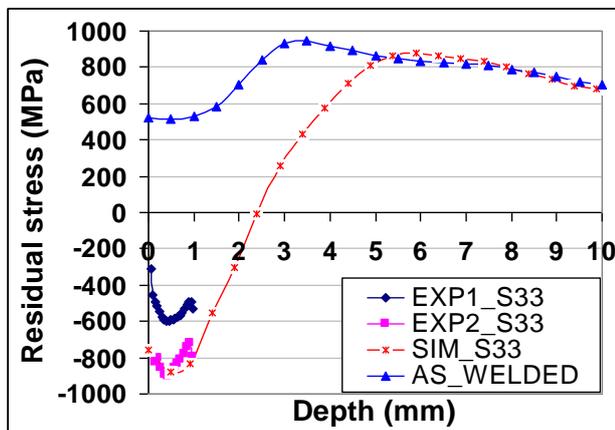


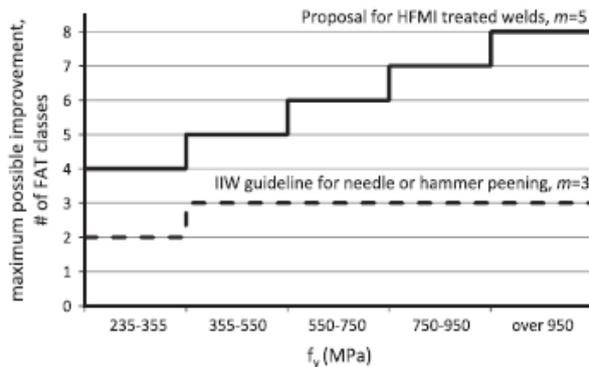
Bild 5: Eigenspannungen längs zur Schweißnaht (S700) Bild 6: Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit S355

### 3 Forschungsergebnisse

#### 3.1 IIW Recommendations for the HFMI Treatment

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. Das höherfrequente Hämmern wurde hierbei unter dem englischen Begriff High Frequency Mechanical Impact (HFMI) Treatment eingeführt und basierend auf aktuellen Forschungsergebnissen wurden Vorschläge für eine von der Grundmaterialfestigkeit abhängige Steigerung der Ermüdungsfestigkeit ausgearbeitet, welche derzeit in die Richtlinien eingefügt werden.

Bild 7 zeigt in einem Auszug aus dem IIW Dokument XIII-2452r1-13 von Marquis et al. pdf 2 Tabellen über vorgeschlagene Erhöhungsfaktoren. Hier sieht man deutlich die wesentlich höheren Faktoren gegenüber dem konventionellen Hämmern.



**Table 6**

Existing IIW FAT classes for as-welded and hammer or needle peened welded joints and the proposed FAT classes for HFMI treated joints as a function of  $f_y$ .

$f_y$ (MPa)	Longitudinal welds	Transverse welds	Butt welds	
All $f_y$	As-welded, $m = 3$ [2]			
	71	80	90	
	Improved by hammer or needle peening, $m = 3$ [1]			
$f_y \leq 355$	90	100	112	
$355 < f_y$	100	112	125	
Improved by HFMI, $m = 5$				
	$235 < f_y \leq 355$	112	125 <sup>a</sup>	140 <sup>a</sup>
	$355 < f_y \leq 550$	125	140	160
	$550 < f_y \leq 750$	140	160	180
	$750 < f_y \leq 950$	160	180 <sup>a</sup>	–
	$950 < f_y$	180	–	–

<sup>a</sup> no data available.

**Bild 7: Auszug aus IIW Dokument**

Zahlreiche Untersuchungsergebnisse für geschweißte Stahlverbindungen mit einer Streckgrenze von 235 bis 1300 MPa zeigen beispielhaft, dass durch eine PIT-Nachbehandlung eine wesentliche Steigerung der Ermüdungsfestigkeit von bis zu 250 % 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. Des Weiteren wird gezeigt, dass diese Nachbehandlungstechnik eine effektive Möglichkeit zur Ertüchtigung bereits bestehender Strukturen darstellt. [12]

Bereits im Oktober 2016 sind die IIW-Empfehlungen für das höherfrequente Hämmern zur Erhöhung der Ermüdungsfestigkeit erschienen und zwar unter dem Titel:

**„IIW Recommendations for the HFMI Treatment.**

*For Improving the Fatigue Strength of Welded Joints.“*

(erschienen im Springer-Verlag Okt. 2016)

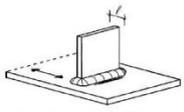
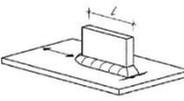
### 3.2 DAST-Richtlinie 026 „Ermüdungsbemessung bei Anwendung HFH“

Da es schwierig und zeitraubend ist einen Eurocode zu ändern, hat man in Deutschland beschlossen, ein nationales Dokument in Form einer „DAST-Richtlinie für das Höherfrequente Hämmern“ zu entwickeln. Hierzu wurde von den Universitäten Stuttgart und Karlsruhe bereits vor 4 Jahren ein Forschungsvorhaben mit dem Ziel die Entwicklung einer DAST-Richtlinie für HFH-Verfahren beantragt und genehmigt bekommen. Bereits in der Fachzeitschrift „Stahlbau 87 (2018), Heft 10“ wurde von Auditoren der Universität Stuttgart und Karlsruhe [21] in einem Fachbeitrag mit dem Titel:

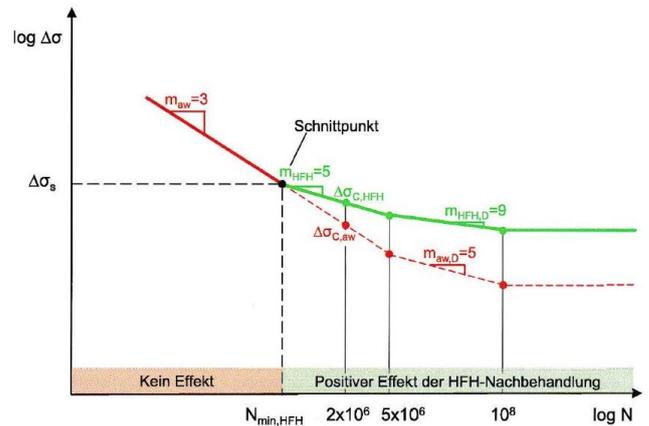
**„Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren“**

eine Zusammenfassung der durchgeführten Untersuchungen und Vorschlag eines DAST-Richtlinien-Entwurfs berichtet. Diese DAST-Richtlinie 026 ist vom Deutschen Ausschuss für Stahlbau in 2019 veröffentlicht worden und ist nun bei der Stahlbau Verlags- und Service GmbH in Düsseldorf erhältlich.

Die Richtlinie beschreibt die Ermüdungsnachweisführung von Schweißdetails bei Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren (HFH). Mit der bauaufsichtlichen Einführung wird dadurch die Berücksichtigung der HFH-Verfahren bei der Bemessung neuer und bestehender Konstruktionen auch im gesetzlich geregelten Bereich möglich. Die verbesserten Ermüdungsfestigkeiten in den Tabellen 2 bis 6 gelten nur bei Anwendung qualifizierter HFH-Verfahren. Als qualifiziert gelten die HFH-Verfahren HiFIT, PIT und UIT (siehe auch Bild 2), da diese Verfahren den ausgewerteten Versuchsdaten zu Grunde liegen und in ihrer Wirkungsweise und Effektivität nachgewiesen wurden und vergleichbar sind. Die Ermüdungsbemessung unter der Verwendung dieser DAST-Richtlinie für andere als die vorgenannten HFH-Verfahren muss auf Grundlage einer Bauartgenehmigung erfolgen.

Skizze des Konstruktionsdetails	Symbol für Schweißverbindung	Beschreibung
		Unbelastete Quersteife gemäß DIN EN 1993-1-9 Tab. 8.4, Detail 6
		Querbelastete Stumpfnah gemäß DIN EN 1993-1-9 Tab. 8.3, Detail 5
		Unbelastete Längsteife gemäß DIN EN 1993-1-9 Tab. 8.4, Detail 1

**Bild 8: Schweißnahtdetails**



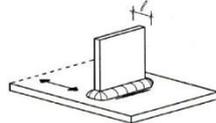
**Bild 9: Verlauf der erhöhten Kerbfälle (grün)**

Bild 8 zeigt die in der DASt-Richtlinie berücksichtigten Schweißnahtdetails:

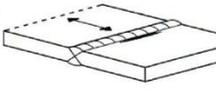
- a) unbelastete Quersteife b) querbelastete Stumpfnah c) unbelastete Längsteife

Der Ermüdungsnachweis erfolgt entsprechend der DIN EN 1993-1-9 mit erhöhten Kerbfällen  $\Delta\sigma_{c,HFH}$  unter Berücksichtigung  $m_{c,HFH} = 5$  und  $m_{D,HFH} = 9$

Im Bild 9 ist der Verlauf der zu den erhöhten Kerbfällen gehörigen Wöhlerlinien in grün dargestellt. Die HFH-Behandlung wird erst unterhalb eines Schwellenwertes der Schwingbreite  $\Delta\sigma_s$  bzw. bei Lastwechselzahlungen oberhalb einer Grenzlastwechselzahl  $N_{min,HFH}$  wirksam. Dieser Schnittpunkt definiert die Mindestschwingspielzahl und die Spannungsschwingbreite, ab der eine HFH-Behandlung rechnerisch ansetzbar und vorteilhaft ist. Diese Mindestschwingspielzahlen für das jeweilige Konstruktionsdetail sind in den Tabellen 3, 5 und 7 der Richtlinie angegeben.

Skizze des Konstruktionsdetails	Durch qualifizierte HFH-Verfahren verbesserte Ermüdungsfestigkeit für das Nennspannungskonzept $\Delta\sigma_{c,HFH}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (1, 3), 4)		
	Spannungsverhältnis R [-] (2)		
	Stahlgüte S nach DIN EN 10025		
	-1,0	0,1	0,5
	S235 ≤ S < S355	100	80
	S355 ≤ S < S550	160	90
	S550 ≤ S ≤ S700	160	125

**Bild 10: Kerbdetail unbelastete Quersteife**

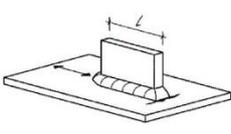
Skizze des Konstruktionsdetails	Durch qualifizierte HFH-Verfahren verbesserte Ermüdungsfestigkeit für das Nennspannungskonzept $\Delta\sigma_{c,HFH}$ [N/mm <sup>2</sup> ] (3), 4), 5)		
	Spannungsverhältnis R [-] (2)		
	Stahlgüte S nach DIN EN 10025		
	-1,0	0,1	0,5
	S235 ≤ S < S355	1.)	1.)
	S355 ≤ S < S550	160	100
	S550 ≤ S ≤ S700	160	140

**Bild 11: Kerbdetail querbelastete Stumpfnah**

Für das Kerbdetail unbelastete Quersteife ergibt sich für einen S355 bei einem Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$  eine erhöhte Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_{c,HFH} = 140$ . Dies entspricht einer Erhöhung um **5 Kerbfälle**. Wirksam wird die Erhöhung ab einer Schwingbreite von  $\Delta\sigma_s = 325$  N/mm<sup>2</sup> laut Tabelle 3 der Richtlinie. Grenzwerte werden tabellarisch angegeben (siehe Bild 10).

Für das Kerbdetail querbelastete Stumpfnah ergibt sich für einen S355 bei einem Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$  eine erhöhte Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_{c,HFH} = 140$ . Dies entspricht einer Erhöhung um **4 Kerbfälle**. Wirksam wird die Erhöhung ab einer Schwingbreite von  $\Delta\sigma_s = 272$  N/mm<sup>2</sup> laut Tabelle 5 der Richtlinie. Aufgrund mangelnder Daten wird für Werkstoffgüten < S355 keine Verbesserung angegeben (siehe Bild 11).

Für das Kerbdetail unbelastete Längsteife ergibt sich für einen S355 bei einem Spannungsverhältnis von  $R = 0,1$  eine erhöhte Ermüdungsfestigkeit  $\Delta\sigma_{c,HFH} = 112$ . Dies entspricht einer Erhöhung um **4 Kerbfälle**. Wirksam wird die Erhöhung ab einer Schwingbreite von  $\Delta\sigma_s = 317$  N/mm<sup>2</sup> laut Tabelle 7. Aufgrund mangelnder Daten wird für Werkstoffgüten < S355 keine Verbesserung angegeben (siehe Bild 12).

 Stahlgüte S nach DIN EN 10025	Durch qualifizierte HFH-Verfahren verbesserte Ermüdungsfestigkeit für das Nennspannungskonzept $\Delta\sigma_{C,HFH}$ [N/mm <sup>2</sup> ] 1), 4), 5), 6)		
	Spannungsverhältnis R [-] <sup>3)</sup>		
	-1,0	0,1	0,5
S235 ≤ S < S355	2.)	2.)	2.)
S355 ≤ S < S550	112	112	80
S550 ≤ S ≤ S700	125	125	80

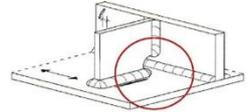
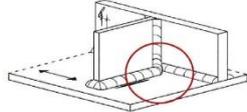
Eignung	Skizze	Beschreibung
✗		Eingeschweißte Quersteife mit kreisrundem oder schrägem Freischnitt. Gefahr der unzureichenden Nachbehandlung im Bereich des Freischnitts
✓		Eingeschweißte eingepasste Quersteife ohne Freischnitt

Bild 12: Kerbdetail unbelastete Längssteife

Bild 13: nicht geeignete Ausführungsvariante

Im Kapitel 7 der Richtlinie werden konstruktive Anforderungen der verschiedenen Konstruktionsdetails behandelt. Bild 13 zeigt ein Beispiel über ungeeignete Freistriche bei eingeschweißten Quersteifen. Bei zyklisch beanspruchten Konstruktionen sollten solche Freistriche vermieden werden, da diese auch schweißtechnisch schwieriger auszuführen sind auch in diesem Bereich nicht vernünftig nachbehandelt werden können. Bezüglich der Anforderungen an die Schweißnähte ist zu gewährleisten, dass die zu behandelten Nahtübergänge auch gut zugänglich sind. Außerdem müssen die Anforderungen nach Kerbfallkatalog der DIN EN 1993-1-9 unter Berücksichtigung der Bewertungsgruppe und Vorgaben nach der DIN EN 1090 und der DIN EN ISO 5817 eingehalten werden. Im Kapitel 8 in der Richtlinie werden dann die Anforderungen an die Qualität behandelt, die hier im Kapitel 4 beschrieben sind.

## 4 Qualitätssicherung

Laut der DASt-Richtlinie 026 gelten folgende Mindestanforderungen:

- Die Anwendung der qualifizierten HFH-Verfahren hat durch einen geschulten und qualifizierten Bediener zu erfolgen
- Die Prüfung von Bediener muss in Anlehnung nach DIN EN ISO 14732 erfolgen. Die Qualifizierung erfolgt auf der Grundlage einer Fertigungsprüfung für Stumpf- und Kehlnähte. Es gelten die Bewertungskriterien für Stumpf- und Kehlnähte. Die Qualifikation ist auf den Systemhersteller bezogen und nicht auf andere übertragbar.
- Für die qualifizierten Verfahren muss eine visuelle Prüfung (VT) der Behandlungsspur zu 100% durch den Bediener und die Schweißaufsichtsperson erfolgen. ES ist sicherzustellen, dass die ermüdungskritischen Nahtübergänge vollständig behandelt und die ursprüngliche Nahtübergangskerbe vollständig erfasst werden.
- Die Anwendung dieser DASt-Richtlinie für andere als die in 3.2 genannten HFH-Verfahren muss auf Grundlage einer Bauartgenehmigung erfolgen.
- Die mit dem HFH-Verfahren behandelten Schweißnahtübergänge sind in den Ausführungsunterlagen zu kennzeichnen.

Die auf dem Weltmarkt führende Herstellerfirma PITEC Deutschland GmbH hat diesbezüglich noch weiterführende Qualitätsmerkmale erstellt.

Um zu wissen, wo und in welcher Art behandelt werden soll, ist es erforderlich eine exakte Behandlungsanweisung, die von einem Anwendungsberater und/oder der Konstruktion bzw. der Schweißaufsicht erstellt werden sollte. In dieser müssen die Behandlungsparameter und die zu behandelnde Schweißnahtübergänge (Hotspots) eindeutig festgelegt werden, damit der Bediener auch weiß, welche Stellen behandelt werden müssen. Als Basis hierfür ist eine statische Berechnung (FEM-Analyse) sehr hilfreich. Diese Stellen müssen

dann auch in der Behandlungsanweisung am besten bildlich dargestellt werden. Auf Bedarf kann dann auch ein entsprechender Behandlungsbericht mit bildlicher Dokumentation nach durchgeführter Behandlung erstellt werden.

Ein einfacher zerstörungsfreier Nachweis über die tatsächlich eingebrachten Druckeigenstressungen gibt es zurzeit noch nicht. Folglich muss jederzeit überprüft werden können, ob das verwendete Gerät auch noch über die notwendige Schlagintensität verfügt. Die PITEC entwickelte zuerst einen modifizierten Almentest zur Überprüfung der Geräteintensität, setzt jetzt aber den Original Almentest ein.

## 5 Anwendungen der HFMI Technologie in der Praxis

Die jahrelangen Erfahrungen sowie die Effizienz der PIT Systeme macht Pitec heute zum international führenden Anbieter für „HFMI“. Aus diesem Grund werde ich einige Erfahrungen aus der Anwendung in der Praxis mit dieser Technologie berichten.

### 5.1 Einsatz im Schienenfahrzeugbau

Die Firma Bombardier hat bereits relativ früh an einem Kreuzstoß (mit Kehlnähten) zyklisch schwingende Biegebelastungen durchgeführt. Dieser Schweißstoß wird gemäß dem Eurocode 3 1.9 in eine FAT-Klasse 80 eingestuft. Die Ergebnisse der nachbehandelten Proben lagen deutlich über der Linie der FAT-Klasse 160, die eigentlich dem Grundwerkstoff entspricht. Aufgrund der durchgeführten Versuche kann man hier mit einem Erhöhungsfaktor von 2 auf die in den Festigkeitsnachweisen angewendeten Spannungen rechnen. Aus diesem Grund hat Bombardier bereits die Werke Netphen, Bautzen und Görlitz mit PIT Geräten ausgerüstet. Auch beim Bau des neuen ICE 4 der Deutschen Bahn (siehe Bild 14) wird die PIT Technologie im Fahrwerksbereich eingesetzt. Um die Lebensdauer der Konstruktion deutlich zu erhöhen, werden die Nahtübergänge der Hotspots PIT behandelt (Bild 15).



**Bild 14:** der neue ICE 4 der Deutschen Bahn



**Bild 15:** PIT Behandlung der Hotspots

Auch die Firma Siemens in Graz hat sich nach umfangreichen Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsvorhabens an der Montanuniversität Leoben entschlossen diese Technologie besonders bei kritischen Drehgestellen einzusetzen und deshalb eine PIT-Ausrüstung gekauft.

### 5.2 Einsatz bei der Sanierung

Bei den hochbelasteten Waggons für den Transport von kompletten Lastkraftwagen („Rola“) sind im Laufe des Fahrbetriebes bei einem europäischen Betreiber u. a. an mehreren Fahrwerksrahmen Ermüdungsrisse entstanden. Bei der Überlegung, ob und wie diese Rahmen saniert werden können, hat ein Gutachter des Eisenbahnamtes, der die PIT-Technologie kannte, empfohlen bei der Reparatur diese Technologie einzusetzen.

Darauf wurden vom Waggonhersteller, der die Sanierung durchführen sollte, erst einmal Vorversuche an der Universität in Stuttgart durchgeführt. Aufgrund der guten Ergebnisse wurden dann weitere Versuche an Original-Fahrwerksrahmen durchgeführt. Die Risse wurden sachgemäß ausgefugt und nach Schweißanweisung geschweißt (Bild 16). Um die Zugeigenspannungen relativ niedrig zu halten, wurde jede Lage PIT behandelt.



**Bild 16: Reparaturschweißung gem. Schweißanweisung Bild 17: PIT Behandlung der Hotspots**

Bei den Reparaturenähten wurde nach deren Fertigstellung zur weiteren Reduzierung der Zugeigenspannungen auch noch die Nahtoberfläche komplett PIT behandelt. Der so reparierte Fahrwerksrahmen wurde anschließend zusammengebaut und auf einem Schwingungsprüfstand bei der Firma Skoda in Pilsen unter praxisnaher Belastung getestet (Bild 18). Bei 3,2 Mio. Lastwechseln trat an einer nicht reparierten Schweißnaht einer Versteifungsrippe ein Riss auf, der dann auf dem Prüfstand ohne PIT Behandlung repariert wurde. Bereits nach weiteren 100.000 LW ist diese Stelle wieder gerissen. Diesmal wurde bei der Reparaturschweißung wieder jede Lage PIT behandelt, danach trat an dieser Stelle kein Riss mehr auf. Bei 8,4 Mio. LW ist dann auf der gegenüberliegenden Seite ebenfalls ein Riss an einer Versteifungsrippe aufgetreten. Jetzt wurde bei der Reparatur gleich PIT behandelt und weitergetestet. Nach 12 Mio. Lastwechseln wurde der Versuch beendet. Es zeigte sich bei dem Versuch, dass keine der reparierten und PIT behandelte Schweißnähte während der ganzen Laufzeit gerissen sind.



**Bild 18: Schwingungsprüfstand bei Skoda in Pilsen**



**Bild 19: PIT Behandlung der Hotspots Fa. Trumpf**

### 5.3 Einsatz im Maschinenbau

Bereits sehr früh hat die Fa. Trumpf erkannt, dass durch die Behandlung von den kritischen Stellen, den sogenannten „Hotspots“, die ohnehin gute Lebensdauer der Stanz- und Nibbelmaschinen signifikant erhöhen konnte und setzte somit die PIT Technologie in der Neufertigung ein (siehe Bild 19).

## 5.4 Einsatz im Brückenbau



**Bild 20: Typischer Brückenübergang in der Fahrbahn Bild 21: PIT Behandlung der Hotspots Fa. Maurer**

Die Firma Maurer SE, München setzt diese PIT Technologie bereits seit 2008 in Serie bei den Brückenübergängen erfolgreich ein. Hier wurde an 2 unabhängigen Instituten durch umfangreiche Schwingversuche nachgewiesen, dass die Lebensdauer der Elemente durch die Nachbehandlung mindestens um den Faktor 10 gesteigert wird. Bild 20 zeigt einen in die Fahrbahn eingebauten Brückenübergang und Bild 21 die PIT-Behandlung eines Hotspots.

## 6 Zusammenfassung und Zukunftsaussichten

Zusammenfassend kann folgendes Resümee gezogen werden:

- Höherfrequente Hämmerverfahren sind sehr effektive Verfahren zur Lebensdauererlängerung von Schweißnähten
- Die DAST-Richtlinie 026 erlaubt die Berücksichtigung der Effekte bei der Bemessung ermüdungsbeanspruchter Details.
- Es werden Kerbfälle „Unbelastete Quersteife“, „Querbelastete Stumpfnah“ und „Unbelastete Längssteife“ geregelt.
- Weiterführende Untersuchungen belegen die Wirksamkeit auch für Bauteile in korrosiver Umgebung
- Weiterführende Untersuchungen zu Betriebslasteinflüssen weisen auf die Wirksamkeit der HFH-Verfahren auch unter Betriebslasten hin.
- Weiterführende Untersuchungen werden noch ausstehende Fragestellungen beantworten und zur Erweiterung der Richtlinie beitragen können.
- Aufnahme in den Eurocode 3 DIN EN 1993-1-9 wird derzeit bearbeitet
- Aufnahme in die DIN EN 13445 wird derzeit bearbeitet.

Im gesetzlich unregulierten Bereich konnte diese Technologie, die in Europa seit 2004 anfangs nur als UIT Technologie erhältlich war, problemlos eingesetzt werden. Im gesetzlich regulierten Bereich wurde die UIT Technologie beim Bau der Autobahnbrücke über die A 73 bei Lichtenfels erstmals durch Zustimmung im Einzelfall eingesetzt. Bereits 2008 wurden dann die pneumatischen Verfahren HiFIT und PIT entwickelt, die doch um einiges kostengünstiger vertrieben wurden. International brachten die in 2016 erschienenen „IIW Recommendations for the HFMI Treatment“ entsprechende Akzeptanz weltweit. Um in Deutschland diese Technologie im gesetzlich regulierten Bereich einsetzen zu können, wurde die DAST-Richtlinie 026 entwickelt.

Im Zuge der Überarbeitung des Eurocodes wird derzeit an **pr DIN EN 1993-1-9 Annex D** gearbeitet, der die Bemessung HFMI nachbehandelter Schweißnähte regeln wird. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der Datenbasis der DAST-Richtlinie. Auch in der Überarbeitung der DIN EN 13445 „Unbefeuerte Druckbehälter“ wird

das höherfrequente Hämmern HFMI bereits im Entwurf übernommen. Durch die Einführung dieser innovativen Technologie in die neuen europäischen Regelwerke ist es Konstrukteuren dann auch möglich im gesetzlich geregelten Bereich die Vorteile voll auszunutzen.

## 7 Quellen und Literatur

- [1] DAST Richtlinie 026: Ermüdungsbemessung bei Anwendung höherfrequenter Hämmerverfahren, 2019
- [2] Gerster P.: Erhöhung der Lebensdauer bzw. der Ermüdungsfestigkeit durch Schweißnahtnachbehandlung, der praktiker, Vol. 9, pp. 302-310, 2009
- [3] Gerster P., Schäfers F.: Verfahren zur Erhöhung der Lebens- bzw. Ermüdungslebensdauer von Bauteilen, Stahlbau 83, Heft 8, 2014.
- [4] Gerster P., Leitner M., Stoschka M.: Praktische Anwendungen eines höherfrequenten Hämmerverfahrens (PIT) in der Industrie, Proceedings of the Join-Ex Congress, Vienna/Austria, pp. 101-112, 2012.
- [5] Stranghöner N., Berg J., Butz C.: Erhöhung der Lebensdauer von Fahrbahnübergängen mit Hilfe des höherfrequenten Hämmerns, 17. DAST-Kolloquium, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, Weimar/Germany, pp. 109-113, 2010.
- [6] Gary B. Marquis, Zuheir Barsoum: IIW Recommendations for the HFMI Treatment
- [7] Kuhlmann U., Breunig S., Ummenhofer T., Weidner P.: Entwicklung einer DAST-Richtlinie für höherfrequente Hämmerverfahren, Stahlbau 87 (2018), Heft 10
- [8] Tagungsband Münchner Stahlbautage 2019 Hochschule München