# Praktische Anwendungen eines höherfrequenten Hämmerverfahrens (PIT) in der Industrie

Peter Gerster – Pitec GmbH (Deutschland) – p.gerster@pitec-gmbh.de Martin Leitner – Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau / Montanuniversität Leoben (Österreich) – martin.leitner@unileoben.ac.at

Michael Stoschka – Lehrstuhl für Allgemeinen Maschinenbau / Montanuniversität Leoben (Österreich) – michael.stoschka@unileoben.ac.at

#### Abstract

Durch die ständig wachsenden Forderungen nach einer Reduzierung des Gewichts und der Steigerung der Lebensdauer bei geschweißten Konstruktionen, ist eine Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen unerlässlich. Hierbei wird besonderes Augenmerk auf die Methode des höherfrequenten Hämmerns gelegt, im Speziellen der Pneumatic Impact Technology (PIT), welche eine Verbesserung der Nahtübergangstopographie und die Einbringung von lokalen Druckeigenspannungen im oberflächennahen Bereich ermöglicht.

Der vorliegende Beitrag widmet sich einer Charakterisierung der Ermüdungsfestigkeit von geschweißten hoch- und höchstfesten Stahlverbindungen in Bezug auf die lokalen Eigenschaften am Nahtübergang. Die Ergebnisse der experimentellen Schwingversuche zeigen, dass die Höhe der eingebrachten Druckeigenspannungen abhängig von der verwendeten Stahlgüte des Grundmaterials ist und einen signifikanten Einfluss auf die resultierende Lebensdauer hat.

Aufgrund dieser hervorragenden Ergebnisse wird nun diese Technologie immer mehr in den verschiedensten Bereichen der Industrie eingesetzt. In diesem Beitrag können nur auszugsweise praktische Anwendungsfälle dargestellt werden. Diese Beispiele zeigen jedoch die Vielfalt der Anwendungen im industriellen Einsatz, sowohl bei der Neukonstruktion von Produkten, als auch bei der Sanierung von Anlagen. Durch den Einsatz dieses höherfrequenten Hämmerverfahrens erreicht man, speziell bei den hochfesten und ultrahochfesten Feinkornstählen, ein Einsparpotenzial im Gewicht und bei den Herstellkosten.

Ein Blick in die Zukunft zeigt die Voraussetzungen für einem zunehmenden Einsatz der höherfrequenten Hämmerverfahren.

Keywords: High frequency peening, Pneumatic Impact Treatment (PIT), Fatigue strength improvement, High-strength steel.

## 1 Einleitung

Der Einsatz von hoch- und höchstfesten Stählen bei geschweißten Strukturen kann Vorteile hinsichtlich des Leichtbaupotentials bringen. Nach der IIW-Empfehlung [1] ist das Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Stahlverbindungen unabhängig von der Streckgrenze des verwendeten Grundmaterials. Für eine Ermittlung des Einflusses der Stahlgüte auf die Lebensdauer von geschweißten und PIT-nachbehandelten Stahlverbindungen sind Ermüdungsversuche an dünnwandigen (Blechdicke *t=5 mm*) Proben aus *S355, S690* und *S960* an unterschiedlichen Nahtgeometrien durchgeführt worden. Die Proben wurden durch einen teilautomatisierten (Stumpfnaht, T-Stoß) und einem vollautomatisierten Schweißprozess (Längsnaht) hergestellt. Voruntersuchungen zeigen, dass ein Breiten- zu Dickenverhältnis von *10:1* den Randeinfluss der Ecke bzw. Kante minimiert und dadurch ein über alle Proben gleichbleibender Anriss in der Mitte am Nahtübergang stattfindet. Um zwischen den Probeserien vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurden diese sandgestrahlt, mit einer Nahtdicke von *4 mm* geschweißt und bei einem konstanten Spannungsverhältnis von *R=0,1* geprüft [2, 3, 4]. Im Anschluss an die Probenfertigung wurde die Hälfte durch höherfrequentes Hämmern (HFP) mittels PIT am Nahtübergang nachbehandelt (Bild 1a). Die für den Prozess benötigte Druckenergie beläuft sich auf *6 bar*, die Vorschubgeschwindigkeit *v=20-30 cm/min* bei einer Frequenz von *f=90 Hz*. Der Radius des gehärteten Stahlbolzens beträgt *R=2 mm* und eignet sich bestens für die verwendete Nahtgröße bzw. Geometrie.

Die pulsierende Bewegung des gehärteten Stahlbolzens rundet den Nahtübergang aus und führt somit zu einer Reduzierung der geometrischen Kerbwirkung in diesem Bereich. Ein Vergleich in Bild 1b zeigt die mittels eines Laserkonfokalmikroskops gemessenen lokalen Nahtübergangstopographien, wobei sich durch die Nahtnachbehandlung ein Übergang mit einer deutlich milderen Kerbwirkung ausbildet. Zusätzlich werden dabei Druckeigenspannungen eingebracht, die entgegen den aufgebrachten Zugspannungen wirken und dadurch die gesamte Beanspruchung in den höchstbelasteten Zonen gesenkt wird.



## 2 Experimentelle Untersuchungen

#### 2.1 Schwingversuche

Die Auswertung der Schwingversuchsergebnisse erfolgt für den Zeitfestigkeitsbereich nach der Auswerteroutine mittels einer log-normal Verteilung [6] für die Anzahl der Lastzyklen bei voneinander unabhängigen Spannungsniveaus. Für einen Vergleich mit den konservativ empfohlenen Werten nach [1] sind die für das betrachtete strukturelle Detail der Längsnaht die hierfür vorgeschlagenen Wöhlerlinien für den nur geschweißten Zustand (As welded) und für den PIT-behandelten Zustand (HFP treated), welcher einen zusätzlich empfohlenen Bonusfaktor von 1,5 beinhaltet, dargestellt [7]. Die Auswertung der Ergebnisse beruht auf der Nennspannungsschwingbreite  $\Delta \sigma_n$  bei zwei Millionen Lastzyklen und bei einer Überlebenswahrscheinlichkeit von  $P_{U}=97,7\%$ , welche auch als die charakteristische FAT-Klasse für das jeweilige strukturelle Detail definiert ist. Das Abbruchkriterium bei den durchgeführten Schwingversuchen wird mit Gewaltbruch definiert und das Durchläuferniveau beläuft sich auf eine Anzahl von fünfzig Millionen Lastspielen. Für die Bewertung des Schwingfestigkeitsverhaltens im Langzeitfestigkeitsbereich wird die in [1] empfohlene zweite Neigung der Wöhlerlinie von K'=22 angewendet. Das Ergebnis der Schwingversuche für die Längsnaht bei einer Grundmaterialfestigkeit von S355 und höchstfesten S960 mit einer Auswertung nach dem Nennspannungskonzept ist in Bild 2 dargestellt.



Die Ergebnisse für S355 in Bild 2a zeigen eine Steigerung der Schwingfestigkeit von den unbehandelten Proben (As welded) mit einer Nennspannungsschwingbreite bei zwei Millionen Lastzyklen von  $\Delta\sigma_{n,2e6}=95 MPa$  auf 220 MPa (HFP treated) der nachbehandelten Proben, welches einem Faktor von 2,3 entspricht. Die unbehandelten Proben aus höchstfesten S960 weisen eine Schwingfestigkeit von  $\Delta\sigma_{n,2e6}=120 MPa$ , gegenüber den PIT-Proben mit 290 MPa, auf (Bild 2b). Dies entspricht einer Steigerung um den Faktor 2,4, welcher geringfügig höher ist als bei den Proben aus dem niederfesteren Stahl. Eine Gegenüberstellung zwischen S355 und höchstfesten S960 im unbehandelten Zustand zeigt eine Erhöhung der Schwingfestigkeit von  $\Delta\sigma_{n,2e6}=95 MPa$  (S355) auf 120 MPa (S960), das einem Verhältnis von 1,25 entspricht. Durch die PIT-Schweißnahtnachbehandlung am Nahtübergang der Längsnahtprobe ergibt sich eine weitere Steigerung von  $\Delta\sigma_{n,2e6}=220 MPa$  (S355) auf 290 MPa (S960), welches einer Erhöhung um den Faktor 1,3 gleicht.

Im Zeitfestigkeitsgebiet tragen sowohl eine Anwendung optimierter Schweißprozessparamter [2, 3], als auch die weitere Nahtnachbehandlung durch hochfrequentem Hämmern zu einer deutlichen Steigerung der Schwingfestigkeit und einer positiv wirkenden Erhöhung der Neigung *k* bei. Im Langzeitfestigkeitsbereich kann eine signifikante Steigerung der Lebensdauer durch eine Verschiebung des Abknickpunktes  $N_k$  in Richtung geringerer Lastwechselzahlen sowohl für *S355*, als auch für den höchstfesten Feinkornbaustahl *S960* erzielt werden, wobei das Maximum der Schwingfestigkeit einen Wert von  $\Delta \sigma_{n,2e6}$ =290 MPa (S960 mit PIT-Nachbehandlung) aufweist.

Für eine Evaluierung des Einflusses der Grundmaterialfestigkeit auf das Schwingfestigkeitsverhalten geschweißter Stahlverbindungen, sind für die betrachtete Längsnaht, mit den drei verwendeten Stahlgüten *S355, S690* und *S960*, die Ergebnisse der Schwingprüfungen für den unbehandelten Zustand in Bild 3a und für den PIT-behandelten Zustand in Bild 3b, dargestellt. Im Zustand "As welded" erreicht der hochfeste Stahl *S690* die höchsten Schwingfestigkeitswerte. Verglichen zu dem niederfesten Baustahl *S355* ergibt sich dabei eine Erhöhung um den Faktor 1,5 und gegenüber dem höchstfesten Stahl *S960* von 1,25.



Gemäß der Empfehlung [1] ist die Schwingfestigkeit geschweißter Verbindungen aus Stahl unabhängig von der verwendeten Grundmaterialfestigkeit. Basierend auf diesen Ergebnissen kann für die betrachtete dünnwandige Längsnahtprobe eine Steigerung der Lebensdauer durch eine Anwendung von hochfesten Stahlgüten verzeichnet werden. Grundvoraussetzung hierfür ist jedoch ein hochqualitativer Schweißprozess, welcher rissartige Imperfektionen, wie z.B. Bindefehler, ausschließt. Zusammenfassend zeigt eine Anwendung des hochfesten Stahles *S690* als Grundmaterial die höchste Schwingfestigkeit, welches durch eine einerseits höhere Festigkeit gegenüber *S355* und andererseits eine höhere Zähigkeit gegenüber dem höchstfesten Stahl *S960* begründet sein kann.

Die Ergebnisse für den PIT-behandelten Zustand in Bild 3b zeigen eine deutliche Steigerung der dynamischen Festigkeit bei der Anwendung des hoch- (*S690*) und höchstfesten Stahles (*S960*) als Grundmaterial. Die Erhöhung zu dem niederfesten Baustahl *S355* liegt hierbei bei einem Faktor von *1,35*. Ein Grund für diese Differenz ist der Eigenspannungszustand nach der Nachbehandlung. Durch die höhere Grundmaterialfestigkeit ist es möglich höhere Druckeigenspannungen einzubringen und daraus folgt eine geringere effektive Spannungsschwingbreite während der Schwingprüfung [8]. Es ist hervorzuheben, dass alle Stahlgüten die nach der konservativen Empfehlung [1] vorgeschlagene Steigerung von *1,5* deutlich übertreffen, begründet durch die hohe Schweißnaht- und Nachbehandlungsqualität bei der Fertigung.

#### 2.2 Bruchflächenanalyse

Zur Abschätzung des Schwing- und Gewaltbruchflächenanteils für die verschiedenen betrachteten Proben und Nachbehandlungszustände während der Schwingprüfung, ist eine umfassende Bruchflächenanalyse für jede geprüfte Probe durchgeführt worden. Ein detaillierter Vergleich zwischen einer un- und PIT-behandelten Längsnahtprobe ist in Bild 4 dargestellt, wobei die zwei typischen Zonen mit der Schwingbruchfläche (A) und der Gewaltbruchfläche (B) erkennbar sind. Im unbehandelten Zustand (Bild 4a) erfolgt die Rissinitiierung am Ende der umschweißten Längssteife durch die an dieser Stelle hohe lokale Kerbwirkung und dem örtlich vorherrschenden großen Steifigkeitssprung.



Im Gegensatz dazu startet der Riss bei einigen PIT-behandelten Proben an der Unterseite des Grundbleches, innerhalb der wärmebeeinflussten Zone (WEZ), siehe Bild 4b. Durch die Nachbehandlung erfolgt ein Verschieben der kritischen Zone von der geometrischen Kerbe am Nahtübergang weg zur metallurgischen Kerbwirkung in der WEZ. Weitere Untersuchungen hinsichtlich der Schadensanalyse von nachbehandelten Schweißverbindungen sind in [10] ersichtlich.

#### 2.3 DMS-Messung

Für eine Ermittlung des technischen Anrisses wurden Dehnungsmessstreifen (DMS) an den umschweißten Enden der Längsnaht appliziert. Bei den begleitenden Messungen zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen den un- und PIT-behandelten Proben. Als Auswertekriterium wurde ein Abfall auf *95 %* der zu Beginn der Schwingprüfung gemessenen Spannungsschwingbreite gewählt. Für den höchstfesten Stahl *S960* sind die Ergebnisse der DMS-Messung in Bild 5 dargestellt.



Für den unbehandelten Zustand zeigt sich eine technische Rissinitiierung bereits bei 40 % der Lebensdauer bis zum Gewaltbruch. Die PIT-behandelten Proben hingegen weisen einen deutlich verzögerten technischen Anriss auf, bei einem Wert von 90 % der Gewaltbruchzyklen. Der Grund hierfür können Rissschließeffekte sein, welche durch die bei der Nachbehandlung eingebrachten Druckeigenspannungen hervorgerufen werden und entgegen der Rissöffnung wirken.

## 3 Praktische Anwendungen in der Industrie

### 3.1 PIT Einsatz bei Forstmaschinen

Aufgrund der signifikanten Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit und somit in weiterer Folge der Lebensdauer höchstfester Feinkornstähle, hat sich die Firma Konrad Forsttechnik GmbH dazu entschlossen die PIT Technologie ebenfalls einzusetzen.



Bei der Neuentwicklung des *Highlander II* kam somit ein völlig neues Werkstoffkonzept wie in Bild 6a dargestellt zum Einsatz. Dadurch erreichte man folgende Leistungssteigerung:

- Erhöhung der Kranreichweite um ca. 10% von 9,5 auf 10,5 m
- Erhöhung des Kranhubmoments um ca. 35% von 18 auf 24 mt

Mit diesen Werkstoffen erreichte man in Kombination mit einer Schweißprozessoptimierung bereits eine deutliche Verbesserung der Schwingfestigkeit gegenüber den zurzeit gültigen Normen. Die anschließende Schweißnahtnachbehandlung der kritischen hochbelasteten Nahtübergängen brachte zusätzlich eine Steigerung um mindestens das 2,5 fache der ohnehin schon hohen Lebensdauer.

### 3.2 Einsatz der Technologie bei Rohrtragwerken

Nachdem bereits beim Neubau von Straßenbrücken diese Technologie erfolgreich eingesetzt wurde, hat sich nun auch die Firma DCC Doppelmayr Cable Car GmbH & Co KG dazu entschlossen, die PIT Technologie zur Lebensdauererhöhung der Fahrbahnkonstruktion einzusetzen.



Die begleitenden Schwingfestigkeits-Untersuchungen der Original Rohrknoten der Fahrbahn wurden am Institut Konstruktion und Entwicklung an der Universität in Stuttgart durchgeführt. Da die erste Fahrbahn mit PIT-Behandlung im Flughafen Oakland (Kalifornien) gebaut wird, wurden auch parallel verschiedene Tests an der Universität in Seattle durchgeführt, um die Zulassung der PIT Technologie in den USA zu erhalten.

Die praktische Schulung des Anwendungs- und Prüfpersonals wurde durch die Fa. Pitec direkt beim Hersteller der Fahrbahnträger in Vancouver (WA) durchgeführt.

Um generell die guten Ergebnisse bei der Nachbehandlung von Rohrknoten von zyklisch schwingenden Rohrkonstruktionen weiter zu festigen, läuft in Deutschland ein von der AIF gefördertes Forschungsprojekt der FOSTA P 815 mit dem Titel "*Ermüdungsgerechte Fachwerke aus Rundrohrprofilen mit dickwandigen Gurten*" unter der Federführung der Uni Stuttgart.

#### 3.3 Einsatz von PIT beim Bau des Kernfusionsreaktors in Greifswald

Um zukünftig genügend Energieressourcen verfügbar zu haben, wird in einigen Ländern an der Energiegewinnung durch Kernfusion geforscht. Eine kontrollierte Kernfusion ist die große Hoffnung der Menschheit – alle Energieprobleme wären damit gelöst. Im Reaktor "Wendelstein 7-X" in Greifswald soll das Kunststück gelingen. Mit einem raffinierten Magnetfeld wollen die Forscher unfassbare *100* Millionen Grad Hitze bändigen. In Deutschland arbeitet an dieser Technologie das Max Plank Institut für Plasmaphysik (IPP). Bei dieser unvorstellbaren großen Hitze verschmelzen Wasserstoffatome zu Helium und setze dabei riesige Mengen Energie frei. Den benötigten Käfig für das Plasma kann nur ein starkes Magnetfeld bilden.



Bild 8 – Kernfusionsreaktor Wendelstein 7-X beim IPP in Greifswald

Der Reaktor wiegt fertig ca. 700 Tonnen, das Plasmagefäß besteht aus einem Innenmantel und Außenmantel. Der Grundwerkstoff ist ein austenitischer Stahl 1.4429 und als Schweißzusatz wird ein 1.4455 verwendet. Die einzelnen Komponenten wurden bei der MAN DWE GmbH in Deggendorf gefertigt und probemontiert. Mit dem Bau wurde 2009 begonnen und die Anlage soll 2014 fertig werden. Befürchtungen, dass das höherfrequente Hämmern die Elektronikkomponenten zerstören könnte, wurden durch einen Dauerversuch über mehrere Tage mit Frequenzmessungen, beseitigt. Bild 8a zeigt das Plasmagefäß im Bau, im Bild 8b sieht man die PIT-Behandlung jeder einzelnen Schweißraupe, um die beim Schweißen entstehenden Zugeigenspannungen möglichst gering zu halten. Die PIT-Behandlung wird vorwiegend beim Einschweißen der vielen Stutzen vom Innengefäß zur Außenwand eingesetzt.

Die Stutzen sollten möglichst ohne Luftspalt eingesetzt werden, was in der Praxis jedoch nicht möglich ist. Aus diesem Grund wird zuerst eine Pufferlage geschweißt, dann der Stutzen durchgesteckt und danach wird mit dem PIT-Gerät die Pufferlage so verformt (siehe Bild 9b), bis der noch vorhandene Luftspalt geschlossen ist. Somit sind die Voraussetzungen geschaffen, die es ermöglichen von der Gegenseite ordentlich zu formieren.

Damit die Wärmeeinbringung so gering wie möglich ist, wird zusätzlich nach dem Schweißen mit Trockeneis gestrahlt (gekühlt). Anschließend wird jede Schweißraupe sofort PIT behandelt, um die Zugeigenspannungen so gering wie möglich zu halten. Durch diese Maßnahmen ist praktisch ein verzugsfreies Schweißen möglich. Mittlerweile sind vier PIT-Anlagen auf dieser Baustelle im Einsatz.



### 3.4 Einsatz von PIT beim Neubau eines Pfannendrehturms für ein Stahlwerk

Der Pfannendrehturm für eine Stranggießanlage ist auch eine zyklisch hoch beanspruchte Schweißkonstruktion. Der Hersteller SMS Siemag baut nun den ersten Pfannendrehturm für ein deutsches Stahlwerk in Niedersachsen, bei dem die höchstbelasteten Schweißnähte PIT behandelt werden.



SMS SIEMAG hat sich dazu entschlossen, die ohnehin hohe Lebensdauer der Anlage noch nachhaltiger zu gestalten. Aufgrund der FEM-Berechnung kennt man sehr genau die sogenannten "Hot Spots" der Anlage, um diese dann gezielt nachzubehandeln. Aber auch bei Reparaturen möchte die SMS Group künftig vermehrt auf die PIT Technologie setzen.

#### 3.5 Einsatz von PIT im Schienenfahrzeugbau

Ein Schienenfahrzeughersteller 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 *1,8* auf die in den Festigkeitsnachweisen angewendeten Spannungen rechnen.

Bei einem anderen Schienenfahrzeughersteller laufen zurzeit Untersuchungen im Rahmen eines Forschungsvorhabens mit einer Universität, die für dieses Vorhaben auch bereits eine PIT-Anlage gekauft hat.

Bei den hochbelasteten Waggons für den Transport von kompletten Lastkraftwagen ("Rola") sind im Laufe des Fahrbetriebes bei einem europäischen Betreiber 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. Hierzu wurden spezielle Probenkörper einer Reparaturschweißung unterzogen und in einem Pulsator mit einer Zugschwellbelastung bis zum Anriss geschwungen.



Bild 11a zeigt ein Probeblech mit einer Reparaturschweißnaht ohne PIT-Nachbehandlung Bruch bei *153.000* LW und Bild 11b nach PIT-Behandlung Bruch bei *417.000* LW an der Einspannung. Aufgrund dieser Versuche hat man sich entschlossen nun Versuche mit einem Originalrahmen der verschiedene Ermüdungsrisse hatte entsprechend zu reparieren.



Die Risse wurden sachgemäß ausgefugt und nach Schweißanweisung geschweißt. Um die Zugeigenspannungen relativ niedrig zu halten, wurde jede Lage PIT behandelt. Bild 12b zeigt die einzelne Lage nach der PIT-Behandlung. Bei den Reparaturnähten 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 unter praxisnaher Belastung getestet.



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 Reparatur 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. Diesmal 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. Des Weiteren wurden weitere Schwachstellen an Versteifungsrippen erkannt, die bisher im Fahrbetrieb noch nicht aufgetreten sind.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden und werden alle Fahrwerksrahmen zusätzlich zur Sanierung der Risse die kritischen Stellen wie Versteifungsrippen und Anbauteile präventiv PIT behandelt.

#### 3.6 Sanierung von Großanlagen (Pressenbau, Turbinenbau, usw.)

PITEC hat sich aus vorgenannten Gründen für die Sanierung von Großanlagen spezialisiert. So wurde das Oberteil einer Schmiedepresse mit *200 MN* Presskraft, sowie verschiedene Turbinengehäuse und weitere hydraulische Pressen erfolgreich repariert, in dem jede einzelne Lage gehämmert und zum Schluss noch eine finale PIT-Behandlung durchgeführt wird.

#### 3.7 Neuentwicklung eines PIT Gerätes für den Unterwassereinsatz

Aufgrund der immer größer werdenden Akzeptanz dieser Technologie und der vermehrte Einsatz von Schweißkonstruktionen im Stahlwasserbau, Offshore- Bereich, Windenergieanlagen offshore, usw. hat die Firma PITEC sich dazu entschlossen, ein Handgerät für den Unterwassereinsatz zu entwickeln. Hierbei mussten die gleichen Maßstäbe angelegt werden, wie bei dem konventionellen Handgerät, d.h. gleiche Schlagkraft und Entkoppelung des Hämmerns durch ein Schwingungssystem, um die Handarmvibrationen auf ein Minimum zu begrenzen.

Bild 14a zeigt das neuentwickelte Gerät, das in etwa die gleichen Abmessungen und Gewicht hat wie das Standardgerät. Auch der Einschaltvorgang wird wie beim Standard durch Andrücken des Gerätes (über einen Weggeber) gestartet.

Bei dem Unterwassergerät werden nur Meerwasser beständige CrNi-Stähle verwendet sowie spezielle Dichtungen eingesetzt. Das komplette Gehäuse wird im Rapid Prototyping – Verfahren mit allen Kanälen und Bohrungen aus Kunststoff hergestellt. Beim Schlagbolzen wird mit einer Gummimanschette das Wasser gehindert in das Gehäuse einzudringen.

An der Frontseite sind drei LED's zur Beleuchtung eingebaut. Die Druckluft wird von oberhalb der Wasserlinie mit einem Schlauch dem Gerät zugeführt (Druckluftflasche oder Kompressor). Aufgrund der starken Blaswirkung (Sichtbeeinträchtigung) darf die Abluft nicht wie in der Standardversion aus dem Gerät entweichen, sondern wird ebenfalls im Schlauch nach oben über Wasser abgeführt. Auch das Stromkabel wird innerhalb dieses Schlauchs dem Gerät zugeführt.



Um das Gerät unter realen Bedingungen zu testen, wurden die praktischen Versuche am Unterwassertechnikum des Instituts für Werkstoffkunde der Leibnitz Universität Hannover durchgeführt. Hier war es möglich, mit einem Taucher auch Schweißproben unter Wasser PIT zu behandeln, um so auch den Effekt der Nachbehandlung zu testen. Bild 14b einen Taucher mit dem Gerät im Einsatz unter Wasser. Einen großen Vorteil sehen wir vor allem bei der Reparaturschweißung und Sanierung von Ermüdungsrissen von Offshore Konstruktionen und im Stahlwasserbau (Schleusenanlagen, usw.). Auch Reparaturen von Schiffspropellern zum Beispiel Ausbesserungen von Kavitationsschäden – können nun unter Wasser geschweißt und PIT behandelt werden, ohne dass das Schiff sehr aufwändig ins Trockendock gebracht werden muss.

### 3.8 Zukunftsaussichten

Um nun diese hervorragende Technologie uneingeschränkt einsetzen zu können, müssen noch einige Voraussetzungen geschaffen werden, die die richtige Anwendung der Geräte sicherstellen. Die Konstrukteure brauchen entsprechende Bemessungsregeln, um das Leichtbaupotenzial auch nutzen zu können. Hierzu wurde ein Workshop unter Federführung der Universitäten Stuttgart (KE) und Karlsruhe (KIT) mit industriellen Anwendern des HFH gegründet, mit dem Ziel entsprechende Voraussetzungen zu schaffen (siehe nachstehende Grafik).



## 4 Zusammenfassung

Experimentelle Schwingfestigkeitsuntersuchungen an Längsnahtproben zeigen, dass eine Schweißnahtnachbehandlung mittels höherfrequentem Hämmern sowohl die Kurzzeitfestigkeit, als auch die ertragbare Ermüdung im Langzeitfestigkeitsbereich, verbessert. Speziell bei kerbscharfen Nahtgeometrien, wie bei umschweißten Längsnähten oder Schweißnahtenden, und gleichzeitig hohem Steifigkeitssprung im örtlich höchstbeanspruchten Bereich, kann durch eine solche Nachbehandlung an den Nahtübergängen eine erhebliche Verbesserung der Lebensdauer erzielt werden.

Die dargestellten Ergebnisse an Proben zeigen einen Einfluss der Grundmaterialmaterialfestigkeit auf die erzielbare Schwingfestigkeit der geschweißten Verbindung. Im Speziellen für den PIT-behandelten Zustand ist eine signifikante Erhöhung durch die Anwendung hoch- und höchstfester Stähle zu verzeichnen, womit ein großes Leichtbaupotential für diese Werkstoffe auch bei geschweißten und nachbehandelten Strukturen gegeben ist.

Eine Auswahl aus den verschiedensten Industriebereichen zeigen die praktischen Anwendungen und Referenzen. Hieraus ist ersichtlich wie vielfältig die PIT Technologie einsetzbar ist. Gerade bei zyklisch schwingender Beanspruchung der Konstruktionen ist durch die gezielte Anwendung des höherfrequenten Hämmerns an den höchstbeanspruchten Stellen eine signifikante Steigerung der Lebensdauer möglich.

## Danksagung

Der österreichischen Bundesregierung (insbesondere dem Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit) sowie dem Land Steiermark, vertreten durch die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH und die Steirische Wirtschaftsförderungsgesellschaft mbH und allen beteiligten Firmenpartnern wird für die finanzielle Unterstützung der Forschungsfür "Materials, Processing und Product Engineering" im Rahmen des Österreichischen COMET Kompetenzzentren Programms sehr herzlich gedankt.

### Referenzen

[1] Hobbacher A.: IIW Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, *WRC Bulletin 520*, The Welding Research Council, New York, 2009.

[2] Stoschka M., Fössl T., Leitner M. und Posch G.: Effect of high-strength filler metals on fatigue, *Weld-ing in the World*, vol. 56, no. 03/04, pp. 20-29, 2012.

[3] Stoschka M., Leitner M., Posch G. und Eichlseder W.: Effect of high-strength filler metals on the fatigue behaviour of butt joints, *Welding in the World*, vol. 57, no. 01/02, 2013 (in print).

[4] Leitner M., Stoschka M., Schörghuber M. und Eichlseder W.: Fatigue behaviour of high-strength steels using an optimized welding process and high frequency peening technology, *Proceedings of the International Conference of the International Institute of Welding*, pp. 729-736, 2011.

[5] Leitner M. und Stoschka M.: Influence of steel grade on the fatigue strength enhancement by high frequency peening technology on longitudinal fillet weld gusset, *Journal of Engineering and Technology*, vol. 1, issue 3, pp. 80-90, 2012.

[6] ASTM International E739: Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) or Strain-Life ( $\epsilon$ -N) Fatigue Data (ASTM E739-91), reapproved 1998.

[7] Haagensen P.J. und Maddox S.J.: IIW Recommendations on Post Weld Improvement of Steel and Aluminum Structures, IIW-Doc. XIII-2200r3-07, revised 2009.

[8] Wang T., Wang D., Huo und Zhang: Discussion on fatigue design of welded joints enhanced by ultrasonic peening treatment (UPT), *International Journal of Fatigue*, vol. 31, pp. 644–650, 2009.

[9] Leitner M., Stoschka M., Schanner R. und Eichlseder W.: Influence of high frequency peening on fatigue of high-strength steels, *FME Transactions*, vol. 40, no. 3, 2012 (in print).

[10] Marquis G.: Failure modes and fatigue strength of improved HSS welds, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, pp. 2051-2062, 2010.

[11] Leitner M., Stoschka M. und Eichlseder W.: Contribution to the fatigue enhancement of thin-walled, high-strength steel joints by high frequency mechanical impact treatment, IIW-Doc. XIII-2416-12, 2012.

[12] Fössl T.: Vortrag auf dem "1.alformwelding day" bei der VoestAlpine AG Linz, 2012

[13] Gerster P.: Erhöhung der Lebensdauer bzw. der Ermüdungsfestigkeit durch Schweißnahtnachbe-Handlung, *der praktiker 61*, Heft 9, S. 302-310, 2009