

Elektromagnetische Härteprüfung für die Wärmeeinflusszone von Unterwasser-Schweißnähten

Niklas STEINBRECHER, Hans Jürgen MAIER, Sebastian BARTON
Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover, 30823 Garbsen

Kontakt E-Mail: steinbrecher@iw.uni-hannover.de

Kurzfassung. Offshore Strukturen verfügen über eine hohe Anzahl von Schweißverbindungen unterhalb der Wasserlinie. Werden an diesen Schweißverbindungen Fehler wie bspw. Risse detektiert, können diese durch das Unterwasser-Lichtbogenschweißen repariert werden. Bei der raschen Abkühlung beim Schweißen unterhalb der Wasserlinie kommt es innerhalb der Wärmeeinflusszone (WEZ) zur Ausbildung eines harten und rissanfälligen Martensitgefüges. Hierdurch kann es zum frühzeitigen Versagen der Schweißverbindungen im reparierten Bereich kommen. Aus diesem Grund qualifizieren nationale und internationale Regelwerke die Zulässigkeit von Schweißverbindungen anhand der Härte in der WEZ durch die Anwendung von Grenz- oder Richtwerten. Diese Härtewerte können jedoch unterhalb der Wasserlinie aktuell nicht bestimmt werden.

Im Rahmen dieses Beitrages wird ein Konzept zur zerstörungsfreien Bestimmung der maximalen Härte von Wärmeeinflusszonen unterhalb der Wasserlinie vorgestellt. Hierzu wird die Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen eingesetzt. Für die Prüfaufgabe wurden geeignete Sensoren entwickelt. Zur Kalibrierung der Prüftechnik wurden Proben gefertigt, welche unterschiedliche Härten in der WEZ aufweisen. Diese Proben wurden umfassend metallografisch und mittels Härteprüfungen charakterisiert. Durch die Korrelation des Zustandes der WEZ mit den aufgenommenen Prüfsignalen wurden Modelle zur Härtebestimmung aufgestellt. Im Anschluss erfolgte die Validierung der Modelle und der Prüftechnik in nasser Umgebung unter Einbeziehung realistischer Störeinflüsse. Die Validierung des Konzeptes zur zerstörungsfreien Bestimmung der maximalen Härte von Wärmeeinflusszonen unterhalb der Wasserlinie erfolgte praxisnah mit Unterstützung durch Industrietaucher.

Einführung

Offshore Strukturen verfügen über eine hohe Anzahl von Schweißverbindungen oberhalb und unterhalb der Wasserlinie. Durch ihre exponierte Lage sind sie permanent wechselnden Belastungen durch Wind und Wetter ausgesetzt. Ermüdungsrisse in den Schweißverbindungen stellen dabei eine häufige Schadensursache dar. Ebenso erfordern unvorhergesehene Ereignisse wie z. B. Schiffskollisionen eine Instandsetzung der Anlagen. [1–3] Werden Risse oder ähnliche Fehler an Schweißverbindungen detektiert, können diese durch das Unterwasser-Lichtbogenschweißen repariert werden. [4] Im Vergleich zum Schweißen an Atmosphäre kommt es aufgrund der höheren Wärmeleitfähigkeit des Wassers zu einer beschleunigten Abkühlung unterhalb der Wasserlinie. Durch die reduzierte $t_{8/5}$ Zeit,



bei der im Schweißprozess die Temperatur von 800 °C auf 500 °C sinkt und die wesentlichen Gefügeveränderung stattfinden, kommt es innerhalb der Wärmeeinflusszone (WEZ) zur Ausbildung eines härteren und deutlich rissanfälligeren martensitisch, bainitischen Gefüges. [5, 6] In Abbildung 1 ist dies exemplarisch an zwei Schweißnähten aus S355J2C+N dargestellt. Eine Schweißnaht wurde Unterwasser und die andere an Atmosphäre geschweißt. In a) sind die Positionen markiert, an denen Härteprüfungen vorgenommen wurden. Die Härte im Bereich des Grundwerkstoffes (GW) bleibt durch den Schweißprozess unbeeinflusst. Im Bereich des Schweißgutes (SG) und insbesondere der Wärmeeinflusszone der Schweißnaht, welche unterhalb der Wasserlinie geschweißt wurde, kann hingegen ein deutlicher Anstieg der Härte beobachtet werden. [7]

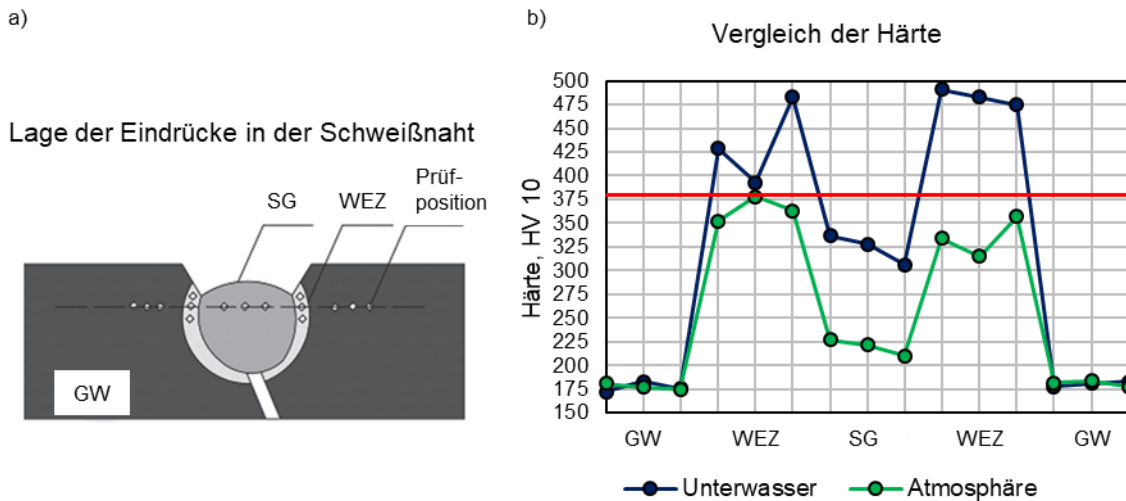


Abb. 1. Vergleich von Härtereihen von Schweißnähten aus S355J2C+N die an Atmosphäre und Unterwasser geschweißt wurden; a) Skizze der Positionen der Härteprüfungen, b) Vergleich der Härteverläufe [7]

Durch das härtere und sprödere Gefüge kann es zum frühzeitigen Versagen der Schweißverbindungen im reparierten Bereich kommen. Aus diesem Grund qualifizieren nationale und internationale Regelwerke die Zulässigkeit von Schweißverbindungen anhand der Härte in der Wärmeeinflusszone durch die Anwendung von Grenz- oder Richtwerten. Laut der DIN EN ISO 15614-1 beträgt der maximale Härtewert 380 HV10 ohne Wärmenachbehandlung und mit Wärmenachbehandlung 320 HV10. Die amerikanische Norm AWS D3.6M:2017 sieht eine maximale Härte von 325 HV10 vor. [8, 9] Die Ergebnisse in Abbildung 1 zeigen, dass bei Schweißungen von höherfesten Stählen Unterwasser ein Härtewert von 380 HV10 deutlich überschritten wird. Eine Härtebestimmung kann aktuell nicht zerstörungsfrei und zudem nicht unterhalb der Wasserlinie durchgeführt werden.

1. Zielsetzung

Um eine verbesserte Qualifizierung von Reparatur- und Wartungsmaßnahmen unterhalb der Wasserlinie zu ermöglichen, bedarf es einer Prüftechnik zur zerstörungsfreien Bewertung der maximalen Härte der Wärmeeinflusszone. Um sicherzustellen, dass die Sensorik auch in anspruchsvollen Anwendungsfällen von Industrietauchern eingesetzt werden kann, muss sie robust ausgelegt sein. Für eine zerstörungsfreie Materialcharakterisierung eignet sich unter anderem elektromagnetische Prüfverfahren. Durch die Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen konnten bereits Korrelationen zwischen den Messsignalen und Härtewerten nachgewiesen werden. [10, 11] Zur Bestimmung der maximalen Härte in der Wärmeeinflusszone wurde auf Basis dieser Erkenntnisse eine für den Unterwassereinsatz geeignete und robuste Sensorik zur Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen

entwickelt und erprobt. Zur Charakterisierung des Zustands der Wärmeeinflusszone wurde ein Modell auf Basis des k -nächste Nachbarn Algorithmus entwickelt.

2. Stand der Technik

2.1 Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen

Die Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen beruht auf der konventionellen Wirbelstromprüfung, siehe Abbildung 2 links. In der Abbildung ist der schematische Aufbau eines Wirbelstromsensors aus einer Erreger- und einer Messspule dargestellt. Bei der Wirbelstromprüfung wird eine Wechselspannung an die Erreger- und eine Messspule angelegt, wodurch sich ein magnetisches Wechselfeld ausbildet, das sogenannte Primärfeld. In einem leitfähigen Werkstoff induziert das Primärfeld Wirbelströme im Bauteil. Die Wirbelstromverteilung bzw. der Fluss der Wirbelströme ist abhängig von den Materialeigenschaften des Bauteils und führt wiederum zur Ausbildung eines magnetischen Wechselfeldes, des Sekundärfeldes, das dem Primärfeld aufgrund der Lenzschen Regel entgegengerichtet ist. In der Messspule kann die Signaländerung aufgrund der sich überlagernden magnetischen Felder erfasst werden. Um eine Charakterisierung hinsichtlich der Materialeigenschaften durchführen zu können, wird die Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen angewendet, deren Funktionsprinzip in Abbildung 2 rechts dargestellt ist. Die Grundlage beruht auf den magnetischen Eigenschaften der Werkstoffe. Durch das Aufbringen des primären Wechselfeldes kommt es bei ferromagnetischen Werkstoffen zu Ummagnetisierungsvorgängen, welche zu einer nichtlinearen Änderung des magnetischen Flusses in Form einer Hystereseschleife führen. Die Ausbildung bzw. Form der Hysteresekurve ist dabei unter anderem von dem vorliegenden Gefüge und dem Eigenspannungszustand abhängig. Die Ummagnetisierungsvorgänge führen zu einer Verzerrung des Empfängerzeitsignals. Diese Verzerrung kann auch als Überlagerung des Messsignals durch Oberwellen beschrieben werden. Durch eine Fast-Fourier-Transformation kann das Messsignal spektral analysiert werden. Die Betrachtung der höher Harmonischen ermöglicht somit Rückschlüsse auf die Materialeigenschaften. [12, 13]

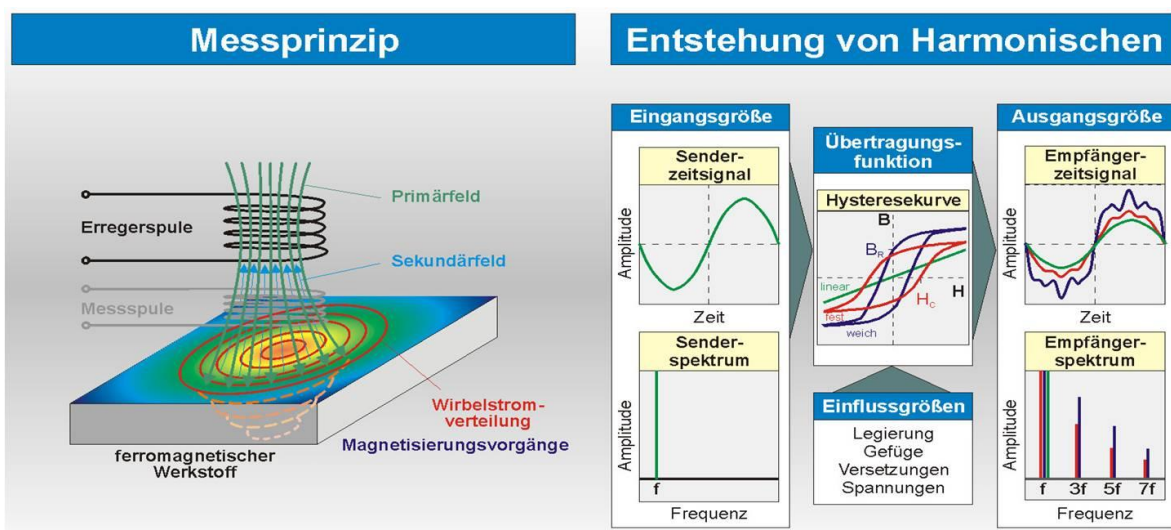


Abb. 2. Funktionsprinzip der Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen [13]

2.2 *k*-nächste Nachbarn Algorithmus (KNN / *k*-nearest neighbours)

Der *k*-nächste Nachbarn Algorithmus ist eine einfache Methode, um bei einer Klassifizierungsaufgabe die Zuordnung eines Datenpunktes zu einer Klasse vorherzusagen. Zur Prognose der Klasse werden für einen neuen, ungelabelten Datenpunkt alle Entfernungen zu allen bekannten, gelabelten Punkten berechnet. Die Abstände können dabei durch verschiedene Distanzmaße berechnet werden. Ein häufig verwendetes Maß für den Abstand ist die euklidische Distanz. Bei der Entscheidung bzw. Prognose wird eine Mehrheitsentscheidung auf Basis einer wählbaren Anzahl von *k* Nachbarn mit den kürzesten Abständen zu dem unbekanntem Datenpunkt getroffen. [14, 15]

3. Material und Methoden

3.1 Proben

Um die Prüftechnik zur Bewertung der maximalen Härte der Wärmeeinflusszone von Unterwasserschweißnähten zu validieren, wurden Proben hergestellt, die ein breites Spektrum an maximalen Härten in der Wärmeeinflusszone aufwiesen. Hierfür wurden 12 Auftragsschweißnähte auf dem typischen Spundwandstahl S430GP mit einer Blechstärke von 10 mm gefertigt. Zur Erzeugung der Auftragsschweißnähte mit einer möglichst konstanten Geometrie wurde ein Schweißautomat zum Unterwasser-Lichtbogenschweißen eingesetzt. Als Schweißzusatz wurde die für den Unterwassereinsatz geeignete Aquaweld Elektrode von Kjellberg® Finsterwalde verwendet. Bei der Herstellung der Proben wurden die Schweißprozessparameter nicht variiert. Variiert wurde jedoch die Probenumgebung während oder nach dem Schweißen. Zur Erzeugung von Proben mit minimaler Härte wurden Proben an Atmosphäre gefertigt. Zur Erzeugung von Proben mit maximaler Härte wurden Proben Unterwasser erzeugt. Um die maximale Härte in der Wärmeeinflusszone der Proben zwischen den beiden Extremen gradiert einzustellen, wurde die $t_{8/5}$ Zeit beeinflusst, indem die Proben während des Schweißprozesses teilweise (0%, 50% und 100%) in Wasser getaucht wurden, siehe Abbildung 3 a). Zusätzlich wurden einzelne Proben nach dem Schweißen an Atmosphäre mit Druckluft abgekühlt oder nachträglich in Wasser abgeschreckt.

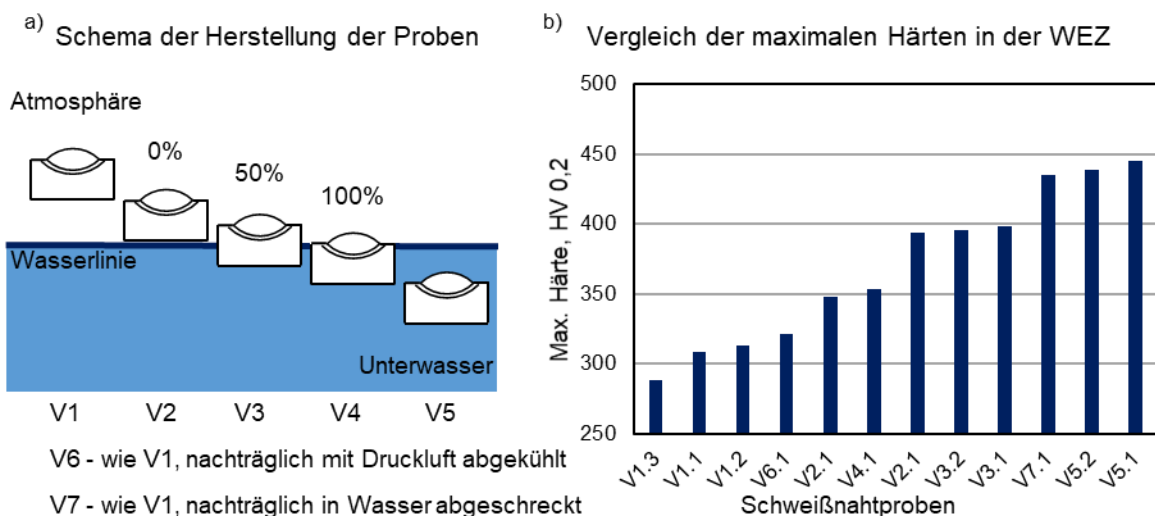


Abb. 3.a) Schema der Herstellung der Proben und b) Darstellung der eingestellten maximalen Härten in der Wärmeeinflusszone der untersuchten Proben

In Abbildung 4 a) ist ein Schliffbild einer Unterwasserschweißnaht dargestellt, in dem zu erkennen ist, dass die Wärmeeinflusszone mit zunehmender Nähe zur Bauteiloberfläche schmaler wird. Aus diesem Grund wurden die Härteprüfungen lediglich in Anlehnung an die DIN EN ISO 9015-1 durchgeführt. [16] Aufgrund der oberflächennahen Prüfung durch die Wirbelstromprüfung wurden die Härtespuren statt in 2 mm Abstand zur Bauteiloberfläche in 1 mm zur Bauteiloberfläche aufgenommen. Um den Härteverlauf in der Wärmeeinflusszone besser auflösen zu können, wurden die Härteprüfungen als Mikrohärteprüfung (HV_{0,2}) ausgeführt. In Abbildung 3 b) sind die maximalen Härten angegeben, die in den Wärmeeinflusszonen der einzelnen Proben bestimmt wurden. Es zeigt sich, dass mit den Proben ein Härtespektrum von 288 HV_{0,2} bis 455 HV_{0,2} abgedeckt werden konnte.

3.2 Prüftechnik und Sensorik

Zur Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen wurde ein Versuchsaufbau bestehend aus einem Messrechner mit Messkarte und Leistungsverstärker verwendet. Der Leistungsverstärker verstärkt das für die Ummagnetisierung benötigte Erregersignal. Mit der verwendeten Messkarte kann mit bis zu vier Erregerfrequenzen quasi-simultan geprüft werden. Für die Prüfaufgabe wurde der in Abbildung 4 b) dargestellte, an die Schweißnahtgeometrie angepasste Sensor entwickelt und gefertigt, welcher auch für den Unterwassereinsatz geeignet ist. Um den schmalen Bereich der Wärmeeinflusszone erfassen zu können, muss der Sensor für eine Prüfung nah an die Schweißnaht geführt werden. Zusätzlich ist die Spulengeometrie rechteckig ausgelegt, um den Anteil des zu erfassenden, schmalen Bereichs der Wärmeeinflusszonen zu erhöhen und den erfassten Bereich des Grundwerkstoffs zu reduzieren.

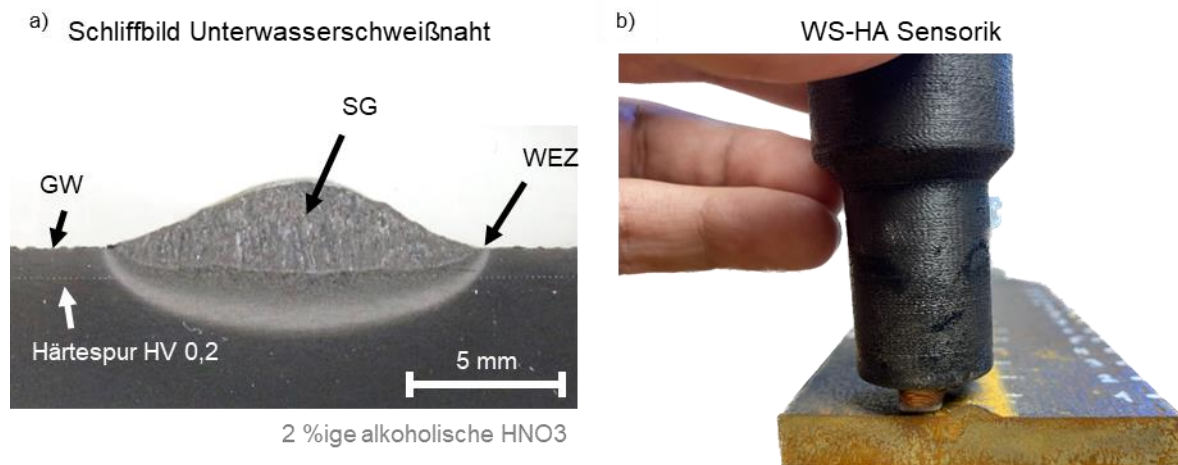


Abb. 4. a) Schliffbild einer Unterwasserschweißnaht und b) Sensorik zur Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen

Zur Prüfung wurden in 10 mm Abständen punktuell Messwerte entlang der rechten und linken Seite der Auftragsschweißnaht im Bereich der Wärmeeinflusszone aufgenommen. Darüber hinaus wurden für jede Probe auch Messungen auf dem Grundwerkstoff und dem Schweißgut aufgenommen. Um mögliche Fehlstellungen des Sensors zu simulieren, wurden zudem Prüfungen durchgeführt, bei denen der Sensor verkippt an die Schweißnaht gesetzt wurde oder sich in Luft befunden hat.

4. Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen

In Abbildung 5 werden die Messwerte der Harmonischen Analyse von vier der zwölf Proben verglichen. Dafür werden jeweils zwei Proben betrachtet, die an Atmosphäre und Unterwasser geschweißt wurden und damit die extremen Zustände „weich“ (308 HV0,2 und 313 HV0,2) und „hart“ (445 HV0,2 und 439 HV0,2) abbilden.

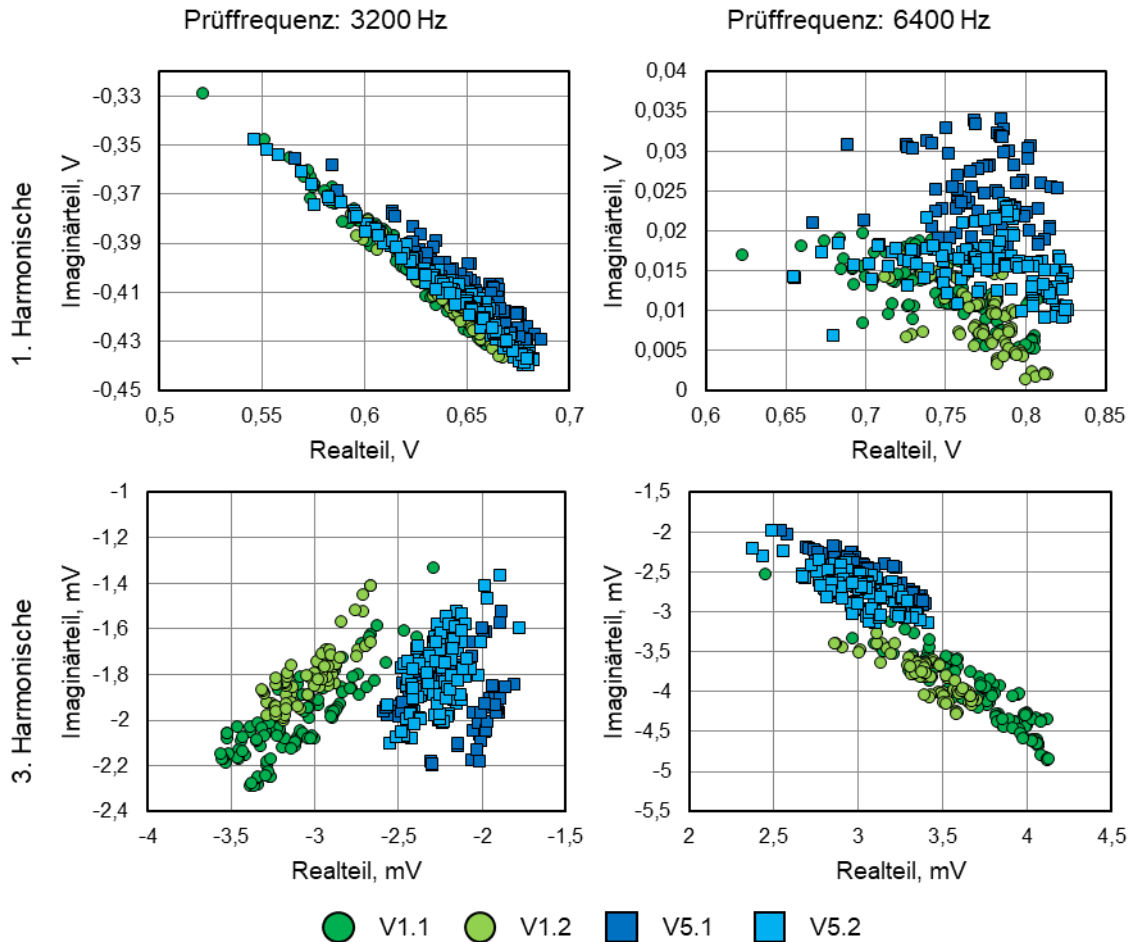


Abb. 5. Vergleich von Wirbelstromsignalen der 1. und 3. Harmonischen für die Prüffrequenzen 3200 Hz und 6400 Hz an Schweißnähten, die an Atmosphäre (V1.1, V1.2) und unterhalb der Wasserlinie (V5.1, V5.2) erzeugt wurden

In der Abbildung sind die Messwerte der 1. und 3. Harmonischen in der Impedanzebene bei den Prüffrequenzen von 3200 Hz und 6400 Hz gegenübergestellt. Die Messwerte sind dabei in der sog. Impedanzebene dargestellt. In den Diagrammen ist zu sehen, dass die Messwerte der einzelnen Proben Punktwolken bilden, die gewissen Schwankungen und Streuungen unterliegen. Es kann beobachtet werden, dass sich die Punktwolken der beiden an Atmosphäre geschweißten Proben überschneiden. Analog kann dies auch bei den unterwassergeschweißten Proben beobachtet werden. Ähnliche Gefüge bzw. Härten führen zu sich überschneidenden Punktwolken. Im Gegensatz zu dem geringen Einfluss der Erregerfrequenz auf eine Trennung der beiden extremen Zustände zeigt sich insbesondere bei dem Vergleich der Impedanzebenen der 1. und 3. Harmonische eine deutlichere Trennung der Punktwolken durch die 3. Harmonische. Eine manuelle Unterscheidung dieser beiden extremen Zustände ist somit über die Höherharmonischen möglich. Für Zustände, die zwischen den beiden Extremen liegen, ist eine Zuordnung häufig schwieriger. Hier bietet es

sich an, über einen Berechnungsalgorithmus auch weitere Kenngrößen wie die der 1. Harmonischen und weitere Prüffrequenzen hinzuzuziehen.

4.2 Bildung eines Berechnungsmodells

Durch die Korrelation der maximalen Härten in den Wärmeeinflusszonen mit den aufgenommenen Prüfsignalen wurde ein Modell auf Basis eines k -nächste Nachbarn Algorithmus zur Bewertung des Härtezustandes aufgestellt. In Kapitel 1 wurde bereits beschrieben, dass Schweißnähte anhand ihrer maximalen Härte in der Wärmeeinflusszone qualifiziert werden. Dementsprechend wurden im Folgenden die Proben mit einer maximalen Härte in der Wärmeeinflusszone von unter 380 HV_{0,2} als „in Ordnung“ (i.O.) und Proben mit einer höheren Härte als 380 HV_{0,2} als „nicht in Ordnung“ (n.i.O.) klassifiziert. Um die Güte des Modells bewerten zu können, wurden die Proben bzw. an ihnen aufgenommenen Messdaten in Proben zur Modellerstellung und Proben zur Validierung des Modells aufgeteilt. Die Testdaten wurden ausschließlich zur Modellvalidierung und nicht zur Modellbildung verwendet. Zum Modellaufbau wurden die 8 Kenngrößen: Real- und Imaginärteil der 1. und 3. Harmonischen der Prüffrequenzen 3200 Hz und 6400 Hz verwendet. Bevor die Messdaten zur Modellerstellung und zur Validierung des Modells eingesetzt wurden, wurden Ausreißer detektiert und entfernt. Abbildung 6 zeigt die Konfusionsmatrix der Modellvalidierung des k -nächste Nachbarn Modells, welches auf der euklidischen Distanz und einer k -Anzahl von 13 Nachbarn basiert.

Validierung des KNN-Modells an den Testdaten

Wahre Klasse	GW	94,10%	1,30%			2,90%	1,70%	94,10%	6%	GW	Prüfung auf Grundwerkstoff
	Verkippt		83,10%		5,10%	11,00%	0,80%	83,10%	16,90%	Verkippt	Verkippte Sensorpositionierung
	Luft			100%				100%		Luft	Prüfung an Luft
	SG		3%		97%			97,00%	3,00%	SG	Prüfung an Schweißgut
	i.O.		14,90%			68,10%	17,00%	68,10%	31,90%	i.O.	Prüfung an WEZ (in Ordnung)
	n.i.O.	5,4%			18,90%	15,10%	60,50%	60,50%	39,50%	n.i.O.	Prüfung an WEZ (nicht in Ordnung)
		GW	Verkippt	Luft	SG	i.O.	n.i.O.	TPR	FNR	TPR	True-Positiv-Rate
		Vorhergesagte Klasse								FNR	False-Negativ-Rate

Abb. 6. Konfusionsmatrix der Validierung des Modells anhand der Testdaten

Durch zeilenweises Addieren ergibt sich das Ergebnis der True-Positiv-Rate und False-Negativ-Rate und damit der prozentuale Anteil der Testdaten, die den wahren Klassen richtig bzw. falsch zugeordnet wurden. In der Matrix ist zu erkennen, dass durch das Modell sehr große Anteile der Test-Daten, die Störeinflüsse simuliert haben, richtig zugeordnet wurden. Die Bewertung des Zustandes der Härte der Wärmeeinflusszone kann mit 60,5% bzw. 68,1% den Klassen i.O. und n.i.O. richtig zugeordnet werden. In 17% der Fälle wird eine i.O. Bewertung fälschlicherweise als n.i.O. und in 15,1% der Fälle eine n.i.O. Bewertung fälschlicherweise als i.O. bewertet. Bei einer vorhergesagten Klasse, die eine Sensorfehlstellung impliziert, wie „GW“, „Verkippt“ und „SG“ würde bei einer Prüfung erneut geprüft werden. Dies könnte zu einer Verringerung der False-Negative-Rate beitragen und somit zu einer Steigerung der True-Positiv-Rate führen. Für die Modellbildung wurde

an jeder Schweißnaht nur eine Härtereihe betrachtet. Schwankungen der maximalen Härte der Wärmeeinflusszone über der Länge der Schweißnaht sind jedoch nicht auszuschließen. Demgegenüber stehen die vielen Messpunkte, die entlang einer Schweißnaht aufgenommen wurden. Einzelne Messdaten, die an Positionen mit höherer bzw. kleinerer maximaler Härte aufgenommen worden sind, könnten unter anderem die Streuungen der Messwerte in den dargestellten Impedanzebenen erklären. Zudem ist der Einfluss des Werkstoffs auf die Messungen vergleichsweise groß, was eine Herausforderung bei der Übertragung der Ergebnisse auf andere Werkstoffe darstellt. Für die Übertragung auf andere Werkstoffe muss daher eine erneute Kalibrierung des Modells durchgeführt werden, wofür entsprechende Proben benötigt werden. Dies gilt ebenfalls bei der Verwendung alternativer Schweißelektroden und einer veränderten Schweißnahtgeometrie. Um die Qualität der Schweißverbindung in die Klassen i.O. und n.i.O. zu bewerten, werden mindestens zwei Proben benötigt. Eine höhere Anzahl an Proben und höhere Varianz der eingestellten Härten sorgt für eine bessere statistische Absicherung und führt zu einer sicheren Prognose des Härtezustands. Auf Basis der vorliegenden Messwerte konnte bereits eine robuste Vorhersagemöglichkeit geschaffen werden, welche auch erfolgreich in nasser Umgebung unter Einbeziehung realistischer Störeinflüsse durch Industrietaucher validiert werden konnte (Abbildung 7).



Abb. 7. Validierung der Prüftechnik durch Industrietaucher im Tauchbecken des Unterwassertechnikum Hannovers

5. Zusammenfassung

Die Qualifizierung von Schweißverbindungen wird bisher u.a. anhand der maximalen Härte in der Wärmeeinflusszone vorgenommen. Aufgrund der fehlenden Möglichkeit zur zerstörungsfreien Bestimmung der Härte der Wärmeeinflusszone unterhalb der Wasserlinie wurde ein Konzept zur Bewertung der Schweißnähte auf Basis der Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen entwickelt.

- Es wurde eine an die Schweißnahtgeometrie angepasste Sensorik entwickelt und deren Eignung auch für den Einsatz unter Wasser validiert. Zur Kalibrierung der Prüftechnik wurden Proben mit unterschiedlichen Härten in der Wärmeeinflusszone hergestellt und die maximale Härte bestimmt.
- Eine manuelle Unterscheidung von Proben unterschiedlicher maximaler Härte in der Wärmeeinflusszone durch die Auswertung von Messsignalen konnte gezeigt werden.
- Die Messwerte unterliegen Schwankungen und Streuungen, sodass für die Bewertung ein Berechnungsmodell auf Basis des k -nächste Nachbarn Algorithmus aufgestellt

wurde. Hierfür wurden 8 Kenngrößen der Harmonischen Analyse von Wirbelstromsignalen verwendet.

- Für die Bildung des Berechnungsmodells wurden Sensorfehlstellungen simuliert, sodass eine fehlerhafte Positionierung des Sensors in den meisten Fällen erkennbar ist und eine Wiederholung der Prüfung bei Bedarf erfolgen kann.
- Das Modell ist auf andere Werkstoffe und Schweißnahtgeometrien grundsätzlich übertragbar. Hierfür muss jedoch eine erneute Kalibrierung des Modells durchgeführt werden, wofür entsprechende Proben benötigt werden.
- Die Validierung der Modelle und der robusten Prüftechnik erfolgte praxisnah mittels Industrietauchern in nasser Umgebung unter Einbeziehung realistischer Störeinflüsse. Die Versuche zeigten, dass die Prüftechnik von Industrietauchern unterhalb der Wasserlinie eingesetzt werden kann.

6. Danksagung

Das IGF-Vorhaben (Nr. 21.504 N) der Forschungsvereinigung Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. (DVS), Aachener Straße 172, 40010 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Referenzen

- [1] ZIEGLER, L.; MUSKULUS, M.: *Lifetime extension of offshore wind monopiles: Assessment process and relevance of fatigue crack inspection*. 12th EAWE PhD Seminar on Wind Energy in Europe, Lyngby, 2016.
- [2] STUTZMANN, J.; ZIEGLER, L.; MUSKULUS, M.: *Fatigue Crack Detection for Lifetime Extension of Monopile-based Offshore Wind Turbines*: Energy Procedia 137 (2017), 143–151. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.341.
- [3] MEHMANPARAST, A.; BRENNAN, F.; TAVARES, I.: *Fatigue crack growth rates for offshore wind monopile weldments in air and seawater: SLIC inter-laboratory test results*: Materials & Design 114 (2017), 494–504. DOI: 10.1016/j.matdes.2016.10.070.
- [4] HILKES, J.; TUCHFELD, J.: *Unterwasser Schweißen und Schneiden mit umhüllten NAUTICA Stabelektroden*: Schweisstechnik/Soudure 109 (2020) 1/2020.
- [5] OMAJENE, J. E.; MARTIKAINEN, J.; KAH, P.; PIRINEN, M.: *Fundamental Difficulties Associated With Underwater Wet Welding*: International Journal of Engineering Research and (2014) Vol. 4, Issue 6, 26-31.
- [6] GAO, W.; WANG, D.; CHENG, F.; DI, X.; DENG, C.; XU, W.: *Microstructural and mechanical performance of underwater wet welded S355 steel*: Journal of Materials Processing Technology 238 (2016), 333–340. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2016.07.039.
- [7] TOMKÓW, J.; JANECZEK, A.: *The influence of the welding environment on the properties of Tekken joints made from S355J2C+N steel*: Weld. Tech. Rev. 91 (2019) 1. DOI: 10.26628/wtr.v91i1.997.
- [8] DIN EN ISO 15614-1:2020-05: *Anforderung und Qualifizierung von Schweißverfahren für metallische Werkstoffe - Schweißverfahrensprüfung - Teil 1: Lichtbogen- und Gasschweißen von Stählen und Lichtbogenschweißen von Nickel und Nickellegierungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.31030/3104743.
- [9] AWS D3.6M:2017: *Underwater Welding Code*, 6. Aufl., American Welding Society, Doral, FL, 2017.

- [10] BÖHM, V.; KÄSTNER, M.; GILLHAUS, R.; HASKAMP, K.; REIMCHE, W.; BACH, F.-W.; REITHMEIER, E. (Eds.): *Präzisionsschmieden*, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014. DOI: 10.1007/978-3-642-34664-4_6.
- [11] CHOJECKI, H.; NEHRING, J.; Engels H.; MÜLLER-BOLLENHAGEN, C.: *Ermittlung mechanisch-technologischer Eigenschaften warmumgeformter Automobilstrukturen durch die magnetinduktive Oberwellenanalyse*. DGZFP-Jahrestagung 2007: Zerstörungsfreie Materialprüfung, 14.-16.05.07, Fürth, 2007.
- [12] STROPPE, H.; SCHIEBOLD, K.: *Wirbelstrom-Materialprüfung: Ein Lehr- und Arbeitsbuch für Ausbildung und Prüfpraxis*, 1. Aufl., Castell-Verlag GmbH, Wuppertal, 2011.
- [13] REIMCHE, W.; ZWOCH, S.; BRUCHWALD, O.; BACH, F.-W.: *Hochtemperatur-Prüftechnik ermöglicht Einblick in die Werkstoffumwandlung und Phasenausbildung bei Hochleistungsbauteilen*. DGZfP-Jahrestagung 2011: Zerstörungsfreie Materialprüfung, 30.05.-01.06.11, Bremen, 2011.
- [14] HUDE, M. von der: *Predictive analytics und data mining: Eine Einführung mit R*, Springer Vieweg, Wiesbaden, Heidelberg, 2020. DOI: 10.1007/978-3-658-30153-8.
- [15] CUNNINGHAM, P.; DELANY, S. J.: *k-Nearest Neighbour Classifiers - A Tutorial*: ACM Comput. Surv. 54 (2022) 6, 1–25. DOI: 10.1145/3459665.
- [16] DIN EN ISO 9015-1:2011-05: *Zerstörende Prüfung von Schweißverbindungen an metallischen Werkstoffen - Härteprüfung - Teil 1: Härteprüfung für Lichtbogenschweißverbindungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin. DOI: 10.31030/1751808.