

Prüfung hochbeanspruchter Sohlverankerungslaschen in Wehranlagen auf Rissanzeigen unter Wasser

Wilfried REIMCHE*, Oliver BRUCHWALD*, Stefan ZWOCH*, Fr.-Wilhelm BACH*

* Institut für Werkstoffkunde, Leibniz Universität Hannover

An der Universität 2, D-30823 Garbsen

Tel.: +49 (0)511 762 9861, E-Mail: reimche@iw.uni-hannover.de

Rudolf KOLBUSCH**

**KWE Ingenieurbüro

Hundsmühler Str. 28, 26131 Oldenburg

Tel.: +49 (0)441 34076 0

Kurzfassung. Mit zunehmender Errichtung und dem Langzeiteinsatz von Bauwerken im Hafen-, Offshore- und Wasserstraßenbereich ist entsprechend den Regelwerken die Integrität hochbeanspruchter Bauwerksstrukturen zu gewährleisten. In dieser Hinsicht waren die Sohlverankerungslaschen der Revisionsverschlüsse in den Weserwehren, die die Zugänglichkeit zu den Wehren im Revisionsfall gewähren, auf Rissanzeigen in Folge hoher Beanspruchung zu prüfen. Die Sohlverankerungslaschen sind verdeckt in einem Laschenkasten in der Bodenplatte eingelassen und damit nur schwer zugänglich unter Wasser zu prüfen.

Da hinsichtlich der Forderung nach einer 100%-Oberflächenprüfung der Sohlverankerungslaschen auf Rissanzeigen unter den genannten Randbedingungen der Unzugänglichkeit sowie einer beschichteten und korrodierten Oberfläche eine geeignete Prüftechnik für den Unterwassereinsatz derzeit nicht zur Verfügung stand, war diese zu entwickeln. Entsprechend der Prüfaufgabe, der Bauteilgeometrie, den Einbaubedingungen sowie weiteren relevanten Randbedingungen wurden, basierend auf der Wirbelstromtechnik mit Vormagnetisierung zur Prüfung von Stahlbauteilen, ein gekapselter, miniaturisierter 2-Kanal-Sensorkopf mit Rollenführung zur Flächenprüfung und ein Drehsensor zur Innenradienprüfung mit 30m Messkabel für den Unterwassereinsatz entwickelt. Das Messsystem besteht aus einem Messrechner mit digitaler Wirbelstromkarte, einem Multiplexer zum Mehrkanalbetrieb, den Prüfköpfen sowie einem bauteilähnlichen Prüfkörper mit relevanten Justierfehlern. Die entwickelten Prüfköpfe ermöglichen unter Wasser handgeführt durch einen Taucher eine Prüfung der Sohlverankerungslaschen im Oberflächenbereich auf Rissanzeigen. Entsprechend der aufgestellten Prüfanweisung wird die Bauteiloberfläche in Längs- und Querrichtung überdeckend gescannt und die Messsignale zur späteren Auswertung über dem Fahrweg aufgenommen. Parallel zur Wirbelstrom-Scanprüfung mit Vormagnetisierung wurde die Bauteiloberfläche zu Vergleichsbetrachtungen mit einem Kamerasystem aufgenommen.

Vorgestellt wird die Entwicklung und der Einsatz des Prüfsystems in den Weserwehren Petershagen und Drakenburg.



1. Einführung

Um an den Wehranlagen der Mittelweserwehre bei Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten Zugang zu den unter Wasser liegende Bauteile zu erhalten, können Revisionsverschlüsse gesetzt werden, die eine Trockenlegung der Wehranlage ermöglichen. Das Revisionsverschlusssystem besteht aus palisadenförmig aufgestellten und abgedichteten Rohrnadeln, die den anliegenden Wasserdruck auf mehrere schräg angestellte Stützbocke übertragen. Die Stützbocke sind jeweils über einen Zughaken mit den mehrere Meter von der Wehranlage entfernten und im Wehrboden einbetonierten U-förmigen Sohlverankerungslaschen verbunden, s. Abbildung 1. Im Auflagebereich der Stützbocke werden somit Druckkräfte und über die Sohlverankerungslaschen Zugkräfte in die Wehrsohle eingeleitet.



Abbildung 1: Aufbau Revisionsverschluss

Bei einigen der zwischen 1913 und 1961 gebauten Weserwehre wurden neue Revisionsverschlussteile eingesetzt, wobei sich die Hakengeometrie im Zuge einer Standardisierung der Revisionsverschlussteile leicht veränderte. Es bestand somit die Möglichkeit, einer zeitweiligen, lokalen Überbeanspruchung der Sohlverankerungslaschen mit daraus resultierender plastischer Verformung im Kontaktbereich zwischen Haken und Lasche sowie Rissinitiiierung. Da sich bei Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten Personen im Bereich zwischen der Wehranlage und den Revisionsverschlüssen aufhalten, wurde vom Wasser- und Schifffahrtsamt Verden eine 100%-Prüfung der Sohlverankerungslaschen unter Wasser auf Rissanzeigen in Auftrag gegeben.

2. Prüftechnik

2.1 Prüfaufgabe

Ziel der Prüfung war die zerstörungsfreie 100%-Prüfung von ferromagnetischen Sohlverankerungslaschen unterschiedlicher Abmessungen mit Hilfe der Wirbelstromtechnik auf Anrisse im oberflächennahen Bereich in den Weserwehren Petershagen und Drakenburg. Die Sohlverankerungslaschen befanden sich zum Prüfzeitpunkt in 3...8 Metern Wassertiefe in einem in den Wehrboden versenkt eingelassenen Laschenkasten, sodass die Zugänglichkeit stark eingeschränkt war, s. Abbildung 2. Aufgrund des Alters der zu prüfenden Bauteile und der Umgebungsbedingungen war mit Korrosionserscheinungen und Unregelmäßigkeiten in der Oberflächenbeschaffenheit der Sohlverankerungslaschen zu rechnen, sowie mit alten Beschichtungsrückständen, die im Zuge der Vorbereitungsmaßnahmen nicht restlos entfernt werden konnten. Das zu entwickelnde Prüfsystem sollte daher relativ unempfindlich gegenüber den oben genannten Störeinflüssen sein, wobei die Sensorik von

Hand geführt und möglichst klein aufgebaut sein musste. Die Bewertung der Messergebnisse sollte anhand von künstlich eingebrachten Referenzfehlern in einem Test-Justier-Prüfkörper erfolgen.

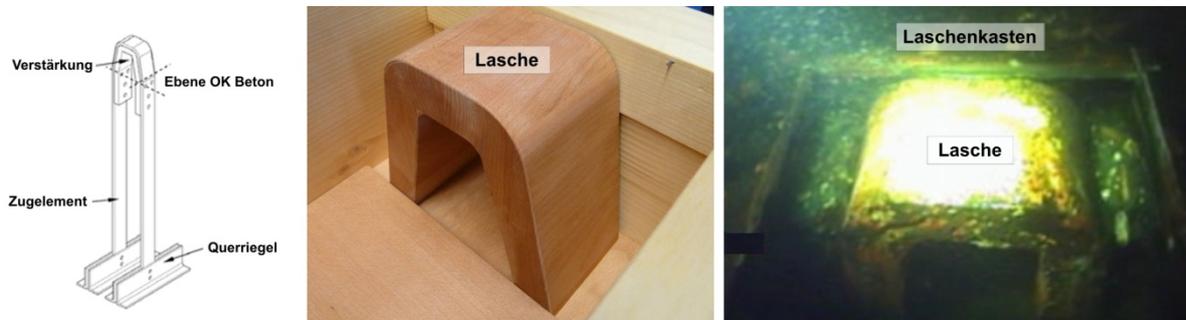


Abbildung 2: Sohlverankerungslasche - Modell und reales Bauteil unter Wasser im Laschenkasten

2.2 Prüftechnik

Die Wirbelstromtechnik ist ein anerkanntes und geeignetes Verfahren um elektrisch leitfähige Werkstoffe auf Inhomogenitäten, Fehler und Risse hin zu untersuchen [1], [2], [3]. Die Standardeindringtiefe δ der Wirbelströme lässt sich nach (1) bestimmen und hängt im Wesentlichen von der Prüffrequenz f , sowie der elektrischen Leitfähigkeit σ und der magn. Permeabilität μ (mit $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$) des Prüfkörpers ab. Um eine möglichst große Eindringtiefe bei der Wirbelstromprüfung ferritischer Materialien mit ferromagnetischen Werkstoffeigenschaften zu erzielen, ist die Wahl einer niedrigen Prüffrequenz in Kombination mit einer Vormagnetisierung des zu untersuchenden Bereichs zur Reduzierung der magnetischen Permeabilität notwendig.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot \sigma \cdot f \cdot \mu}} \quad (1)$$

Die Vormagnetisierung mit Permanentmagneten oder Gleichstrom bewirkt eine Verschiebung des Arbeitspunktes auf der magnetischen Hysteresekurve, die in ferromagnetischen Werkstoffen bei jedem Ummagnetisierungsvorgang durchlaufen wird. Im Idealfall, bei ausreichend großer Vormagnetisierung, wird der Arbeitspunkt bis in den Bereich der Sättigung verschoben. Die relative Permeabilität μ_r strebt dann dem Wert 1 entgegen, s. Abbildung 3, und die Hysteresekurve nimmt einen annähernd linearen Verlauf mit der Steigung μ_0 an, wodurch sich die Eindringtiefe der Wirbelströme entsprechend erhöht.

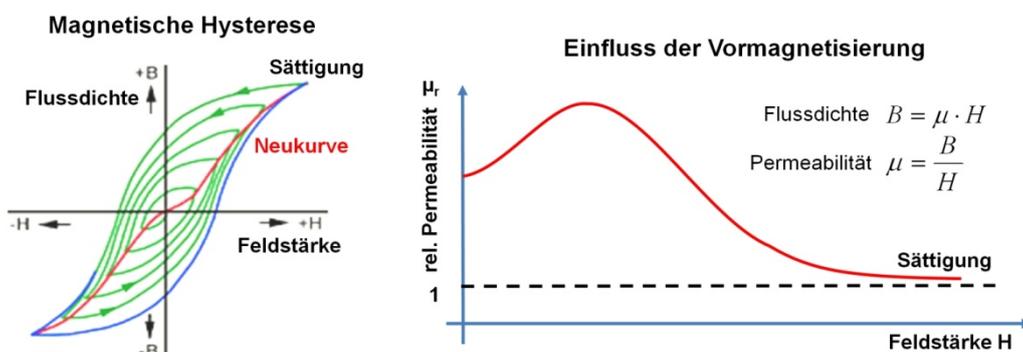


Abbildung 3: Wirbelstromtechnik - Vormagnetisierung

2.3 Messsystem

Zur Prüfung der ferromagnetischen RV-Sohlverankerungslaschen in den Weserwehren Petershagen und Drakenburg auf rissartige Fehlstellen unter Wasser wurden ein Wirbelstrom-Prüfsystem und zwei an die Prüfaufgabe angepasste, miniaturisierte und wasserdichte, mehrkanalige, handgeführte Differenz-Wirbelstromsensoren mit Vormagnetisierung zur Messung in Scan-Technik entwickelt. Um der Aufgabe einer 100%-Prüfung der von außen zugänglichen Oberflächen der Sohlverankerungslaschen zu entsprechen, wurde ein rollengeführter, kabelgebundener, 2-kanaliger Flächensensor eingesetzt, mit dem plane Flächen überlappend in Scan-Technik abgefahren werden können, während die Prüfung der Innenradien mit Hilfe eines kabelgebundenen Radiensensors erfolgte. Die Kalibrierung der Wirbelstromsensoren wurde an einem Justierprüfkörper in Form der Sohlverankerungslaschen im Maßstab 1:1 mit definiert eingebrachten Testfehlern durchgeführt. Um trotz der zu erwartenden rauen Oberflächentopografie einen gleichmäßigen Abstand zwischen Sensor und Bauteil einzustellen und die kontinuierliche und gleichmäßige Sensorführung zu erleichtern wurden die Sensoren mit einer folienartigen Kunststoff-Zwischenlage auf das Bauteil aufgesetzt.

Im Einzelnen besteht das Prüfsystem aus den folgenden Komponenten:

- Portabler Industrie-Computer mit Multifrequenz-Wirbelstromkarte
- 8-Kanal Wirbelstrom-Multiplexer
- Unterwasser Wirbelstrom-Flächensensor mit Rollenführung und Vormagnetisierung
- Unterwasser Wirbelstrom-Radiensensor mit Vormagnetisierung
- Zwischenlage (Kunststofffolie)
- Test-Justier-Prüfkörper

2.3.1 Wirbelstrom-Flächensensor

Die Prüfung ebener Flächen erfolgte mit dem in Abbildung 4 dargestellten, rollengeführten Wirbelstrom-Flächensensor. Die 2-kanalige Ausführung ermöglicht die Durchführung einer schnellen, überlappenden Messung in Scantechnik und Erhöhung der lokalen Auflösung.

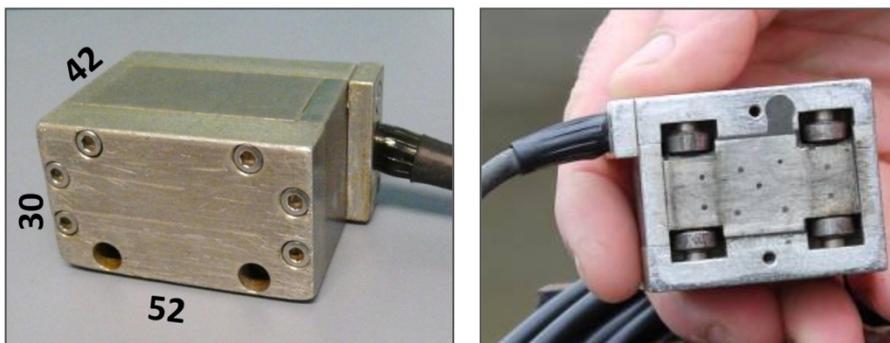


Abbildung 4: Wirbelstrom-Flächensensor

Technische Daten

- Hermetisch geschlossenes Sensorgehäuse
- $L \times B \times H = 52 \times 42 \times 30$ mm
- 4-fach Rollenführung
- Vormagnetisierung mittels Permanentmagnet
- 2 Messspuren à 10 mm Breite = 20 mm
- Prüffrequenz: 30 ... 200 kHz
- Unterwasser Kabellänge: 35 m

2.3.2 Wirbelstrom-Radiensensor

Die Prüfung der Innenradien der Sohlverankerungslaschen auf Längsrisse erfolgte mit dem in Abbildung 5 dargestellten Wirbelstrom-Radiensensor über eine Sensor-Drehbewegung.



Abbildung 5: Wirbelstrom-Radiensensor

Technische Daten

- Hermetisch geschlossenes Sensorgehäuse
- $D \times L = \varnothing 30 \times 150 \text{ mm}$
- Sensorführung im Radienbereich
- Vormagnetisierung - Permanentmagnet
- 1 Messspur mit 10 mm Breite
- Prüffrequenz: 30 ... 200 kHz
- Unterwasser Kabellänge: 35 m

2.3.3 Justier-Prüfkörper

Der Justier-Prüfkörper, der in Geometrie, Aufbau und Werkstoff (Maßstab 1:1, S235 - St37) den Verankerungslaschen im Weserwehr Petershagen entspricht, wurde im Schenkelflächenbereich mit vier Vergleichsfehlern und im Innenradienbereich mit drei weiteren Vergleichsfehlern versehen, s. Abbildung 6. Die Vergleichsfehler wurden schräg, zur Mitte hin auslaufend, mit Fehlertiefen zwischen 0,5 mm und 3 mm Tiefe am Rand bei einer Sägeschnittbreite von 0,4 mm eingebracht.

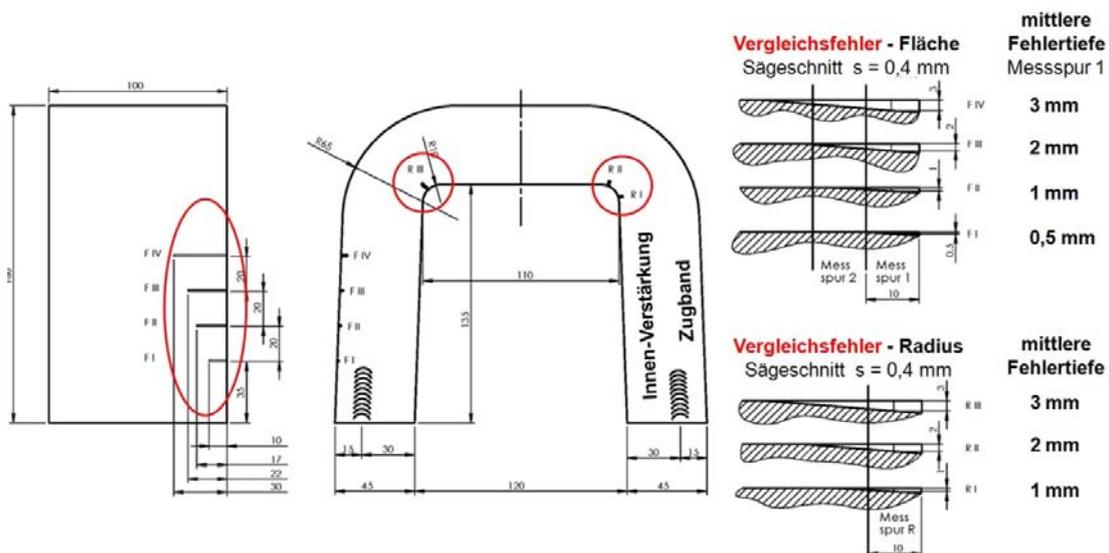


Abbildung 6: Justier-Prüfkörper mit Vergleichsfehlern

3. Kalibrierung und Prüfdurchführung

3.1 Prüfstrategie

Mit Hilfe des Sohlaschen-Modells aus Holz, Abbildung 2 links, wurde eine Prüfstrategie festgelegt, um alle zugänglichen Flächen und Radien der RV-Sohlverankerungslaschen mit dem Flächen- und Radiensensor vollständig in handgeführter Scan-Technik zu erfassen. Die Anzahl der Messspuren wurde dabei so ausgewählt, dass eine Überlappung der Spuren von jeweils 10% entsteht, um eine vollständige Prüfung der Oberfläche zu gewährleisten, während die Ausrichtung der Messspuren, (längs, quer und vertikal zur Strömungsrichtung) die Detektion rissartiger Fehlstellen in jeglicher Orientierung erlaubt, s. Abbildung 7.

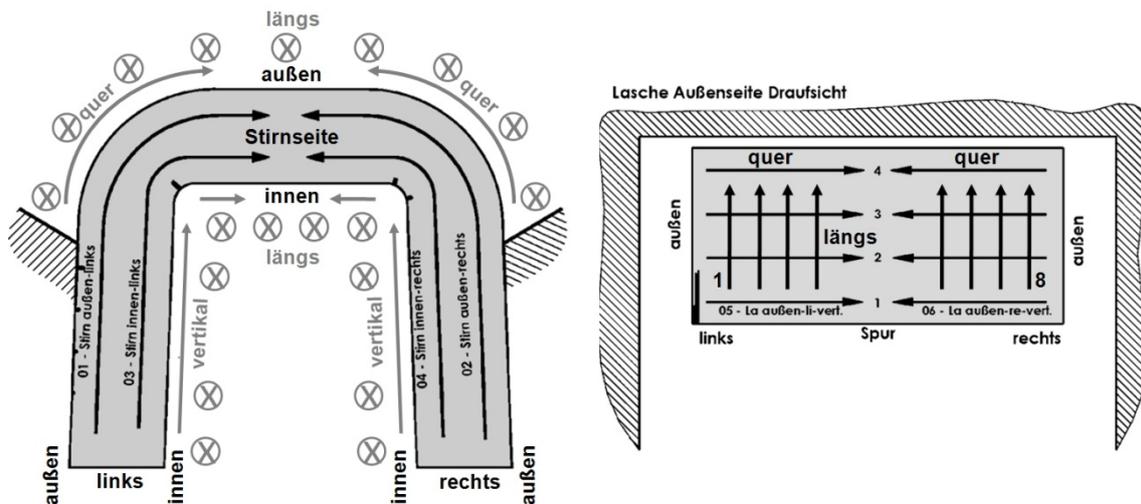


Abbildung 7: Justier-Prüfkörper - Messspuren

3.2 Kalibrierung

Die Kalibrierung der Geräte des Prüfsystems und der Sensorik wurde mit dem gleichen Prüfaufbau, wie er für die Prüfung an den Bauteil-Verankerungslaschen verwendet wird, im Labor durchgeführt. Eine Justierkontrolle wurde vor und nach jeder Messserie vor Ort, sowie bei jeder In- und Außerbetriebnahme des Messsystems zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Prüfsystems durchgeführt. Abbildung 8 zeigt den Justier-Prüfkörper mit einbrachten Testfehlern und aufgesetztem Wirbelstrom-Flächen- und Radiensensor.



Abbildung 8: Justier-Prüfkörper mit Testfehlern und Sensorik

Die eingesetzten Wirbelstrom-Differenzsensoren wurden mit einer Prüffrequenz von 100 kHz betrieben, um eine deutliche Phasentrennung zwischen dem Abstands- und Kippeffekt zur Fehleranzeige zu erhalten. Die Signalphase der Wirbelstromkanäle wurde bei aufgesetztem Wirbelstromsensor mit Zwischenlage auf dem Justierprüfkörper so eingestellt, dass Abstands- und Kippeffekte des Sensors weitestgehend zu Signaländerungen in der X-Komponente des Wirbelstrom Signals führen, s. Abbildung 9.

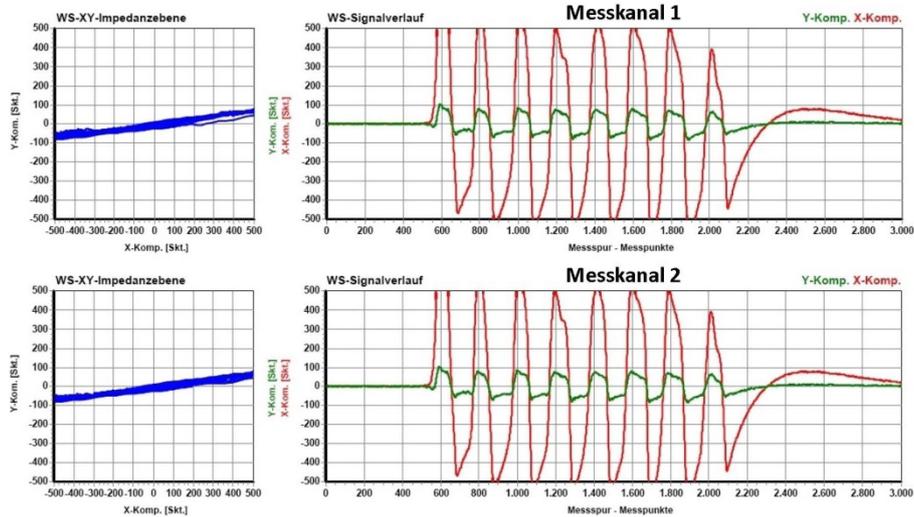


Abbildung 9: Messsignal - Kipp- und Abstandseffekt

In Abhängigkeit der Prüffrequenz ist damit eine deutliche Trennung in der Phasenlage zwischen Nutz- und Störsignalanteil im Wirbelstromsignal mit einer starken Ausbildung des Fehler-Signalanteils in der Y-Komponente zu erreichen. Zur Signalbandbegrenzung und Bedämpfung hoch- und niederfrequenter Störsignalanteile kommt ein Bandpassfilter zum Einsatz.

Abbildung 10 zeigt den Verlauf des Messsignals beim Überfahren der eingebrachten Flächen-Testfehler unterschiedlicher Tiefe, wobei die verringerte Anzahl an detektierten Fehlern im zweiten Messkanal auf der schrägen Einbringung der Sägeschnitte mit vom Rand aus kontinuierlicher Verringerung der Fehlertiefe basiert, vgl. Abbildung 6 und 8.

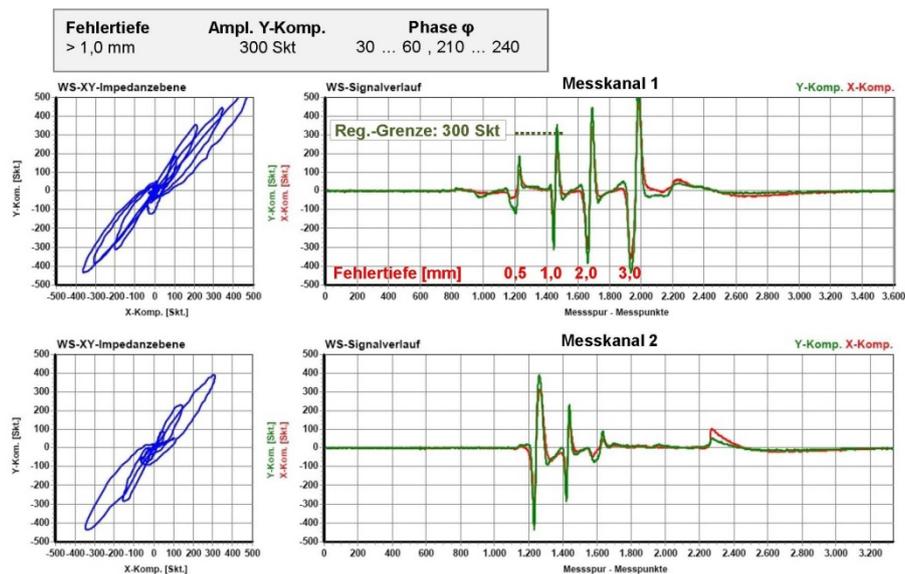


Abbildung 10: Messsignal Testfehler

3.2.1 Registrier- und Nachweisgrenze

Zur eindeutigen Bewertung einer rissartigen Anzeige hinsichtlich des kleinsten nachzuweisenden Fehlers sollte ein Nutz-/Störsignalverhältnis von 1:4 eingehalten werden. Durch die Unregelmäßigkeiten in der Bauteiloberfläche aufgrund von Korrosion und Beschichtungsrückständen ergibt sich bei einem Störsignalanteil von ≤ 75 Skt in der WS-Y-Komponente eine Registriergrenze von ≥ 300 Skt der WS-Y-Komponente. Alle Wirbelstrom-Anzeigen in Form einer schmalen, doppelseitigen und symmetrischen Wirbelstromschleife in der WS-XY-Impedanzebene im 1. und 3. Quadranten mit einem Phasenwinkelbereich von $25^\circ \dots 60^\circ$ bzw. $205^\circ \dots 240^\circ$ und einer WS-Y-Komponente ≥ 300 Skt, den Justierfehlern entsprechend, sind als rissartige Anzeigen zu bewerten und registrierpflichtig.

Nach dieser Festlegung werden entsprechend dem Referenzkörper und den eingebrachten Nutzen-Justierfehlern alle rissartigen Fehlstellen mit Fehlertiefen von ≥ 1 mm angezeigt.

3.3 Prüfdurchführung

Im Vorfeld der Prüfung unter Wasser wurden die Sohlverankerungslaschen und der Laschenkasten freigespült und leicht anhaftende Ablagerungen, Schutzanstriche und Korrosionsprodukte durch einen Taucher entfernt, um die Bauteiloberfläche zugänglich und prüffähig zu gestalten. Das Prüfteam vor Ort bestand aus einem Prüffingenieur als Operator für das Prüfsystem, der auch den Prüfablauf vorgibt und einem Prüffingenieur, der als Taucher auf Anweisung die Sensorpositionierung und Sensor-Scanfahrt handgeführt unter Wasser am Bauteil ausführt. Die Kommunikation zwischen dem Prüffingenieur im Prüfcontainer auf einer Barke und dem Taucher wurde über Sprechfunk realisiert. Abbildung 11 vermittelt einen Eindruck von den vorherrschenden Prüfbedingungen über Wasser.



Abbildung 11: Prüfbedingungen über Wasser

Die jeweilige Messposition, Messspur, sowie der Start- und Endzeitpunkt einer Messung wurde von dem Prüffingenieur festgelegt und über Sprechfunk an den Taucher weitergegeben. Zur Verifizierung der Reproduzierbarkeit einer Messfahrt in Handführung und Erkennung von Störeinflüssen wurden mindestens zwei Messfahrten je Messspur durchgeführt. Bei Auffälligkeit wurde die Prüfung um zusätzliche Messfahrten und, soweit dies möglich war, optische und taktile Prüfungen des entsprechenden Bereiches ergänzt. Abbildung 12 zeigt die beengten Prüfbedingungen unter Wasser.

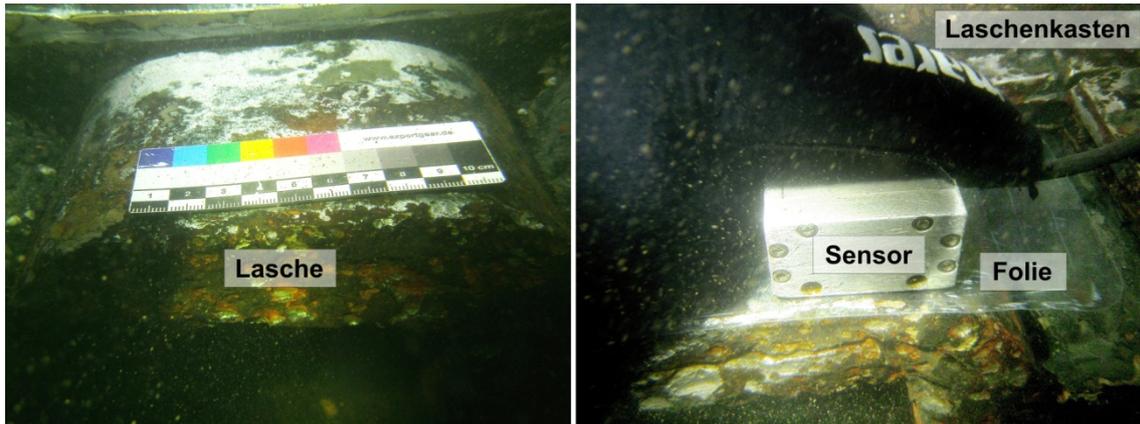


Abbildung 12: Prüfbedingungen unter Wasser

4. Ergebnisse

Insgesamt waren am Weserwehr Petershagen 62 Sohlverankerungslaschen im Ober- und Unterwasser der Wehranlage mit jeweils mehr als 60 Messspuren zu prüfen, am kleineren Weserwehr Drakenburg belief sich die Anzahl der zu untersuchenden Laschen auf 52 Laschen. Die Prüfdauer vor Ort betrug 24 bzw. 14 Arbeitstage, in denen inkl. Wiederholungs- und Referenzmessungen mehr als 15.000 Messsignalverläufe aufgezeichnet und im Folgenden ausgewertet wurden.

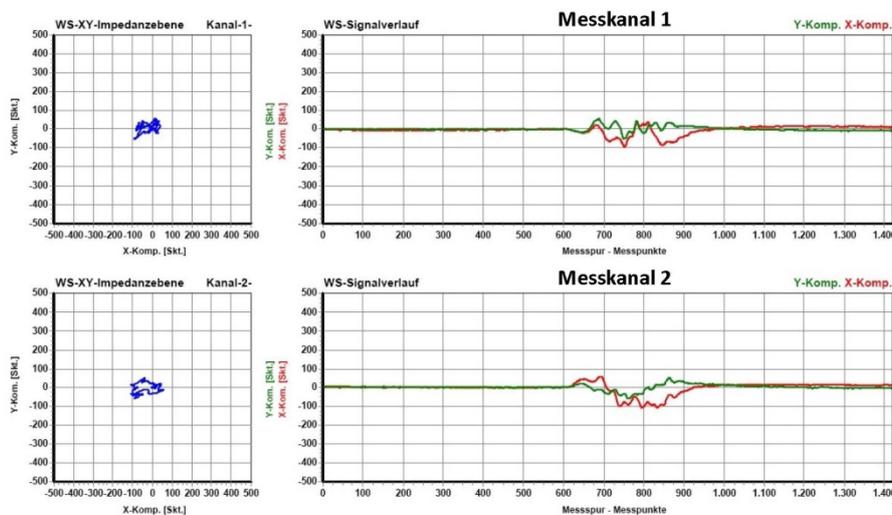


Abbildung 13: Signalverlauf - Fehlerfreier Bereich

In Abbildung 13 ist exemplarisch der Messsignalverlauf für einen homogenen und fehlerfreien Bereich der Sohlverankerungslaschen dargestellt. Solch geringe Signalamplituden, sowohl in der Stör-, als auch der Nutzkomponente des Messsignals, wurden überwiegend an der Oberseite und den inneren Schenkeln der Sohlverankerungslaschen aufgenommen. Im Hakeneingriffsbereich, oben auf der Innenseite der Lasche, und auf der Stirnseite waren bereits optisch teilweise Deformationen und Korrosionserscheinungen (vgl. Abbildung 12) feststellbar, die auch anhand der Messsignale nachgewiesen werden konnten. Abbildung 14 zeigt den Messsignalverlauf für zwei benachbarte Messspuren auf der oberen Innenseite einer Sohlverankerungslasche im Bereich des Hakeneingriffs. Der Signalverlauf weist eine deutlich ausgeprägte Doppelschleife in der X-Komponente in beiden Kanälen auf, die jedoch in der Störkomponente auftritt und aufgrund ihrer Phasenlage nicht als Fehler einzustufen ist.

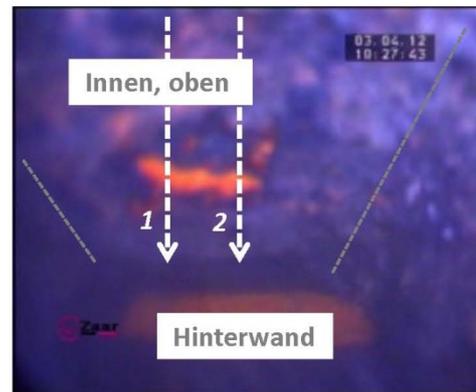
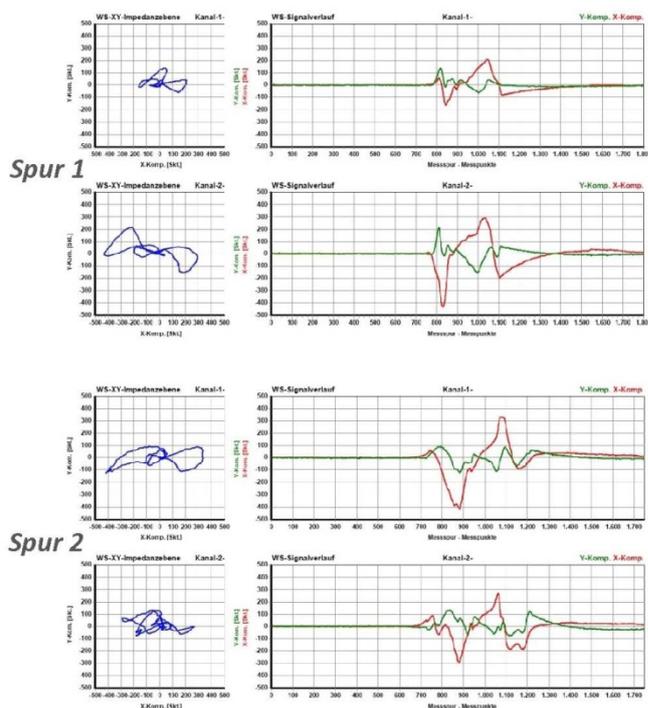


Abbildung 14: Signalverlauf im Bereich des Hakeneingriffs

5. Zusammenfassung

Im Zuge der vom Wasser- und Schifffahrtsamt Verden in Auftrag gegebenen Prüfung von Sohlverankerungslaschen unter Wasser auf Rissanzeigen in den Weserwehren Petershagen und Drakenburg wurde ein an die Prüfbedingungen angepasstes Wirbelstrom-Prüfsystem entwickelt und erfolgreich eingesetzt. Zum Einsatz kamen dabei zwei hermetisch geschlossene, miniaturisierte Wirbelstromdifferenzsensoren mit Vormagnetisierung für die Flächen- und Radienprüfung in orthogonalen Spuren um die geforderte 100%-Prüfung aller von außen zugänglichen Oberflächen der Sohlverankerungslaschen zu gewährleisten. Die Prüfung unter Wasser erfolgte handgeführt in Scantechnik, ausgeführt durch einen Prüfenieur als Taucher, während die Koordination, Messwertaufnahme und erste Bewertung durch einen weiteren Prüfenieur an Bord einer Barke über Wasser erfolgte. Trotz umfangreicher Messungen konnten an keiner der 114 untersuchten Sohlverankerungslaschen rissartige Anzeigen mit einer Fehlertiefe > 1 mm festgestellt werden.

6. Referenzen

- [1] Reimche, W.; Zwoch, S.; Bernard, M.; Bach, Fr.-W.: *Entwicklung und Qualifizierung einer Fernfeld-Wirbelstromtechnik zur Fehlerprüfung von Schweißnähten und dickwandigen Bauteilen* DGZfP-Jahrestagung, 2007, Fürth
- [2] Reimche, W.; Feiste, K.; Bach, Fr.-W.; Hülmann, G.; König, W.: *Qualifiziertes Prüfkonzept zum zerstörungsfreien Fehlernachweis in dickwandigen gummierten Papierwalzen*. DGZfP-Jahrestagung, 2004, Salzburg
- [3] Bernard, M.; Reimche, W.; Bach, Fr.-W.; Pohl, M. (Hrsg.): *Prozessfähige Randhärte- und Einhärtungstiefenbestimmung an dick- und dünnwandigen Bauteilen* Konstruktion, Qualitätssicherung und Schadensanalyse. Verlag Stahleisen, 2007, Düsseldorf