

Deformationsmessungen an großdimensionalen Stahlstrukturen

In einer früheren Veröffentlichung [1] wurde bereits auf die vielfältigen Möglichkeiten der MAS MATCH-Technik hingewiesen. Diese Möglichkeiten sind nicht nur auf die Ermittlung von Deformationen bei unter statischer und dynamischer Belastung stehenden Tragkonstruktionen beschränkt. Derartige Messungen können zur Bewertung und Dokumentierung des Langzeitverhaltens komplexer Bauwerke unter Betriebsbelastung eine wertvolle Hilfe leisten und daher zur Lösung von Optimierungsaufgaben beitragen. Die lückenlose Überwachung des Tragverhaltens ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn es sich um Stahlbauten handelt, deren Ausfall oder Beschädigung weitreichende Folgen nach sich ziehen können. Solche Konstruktionen sind nicht nur Flugzeuge, Schiffe, Brücken, Hallendächer usw. sondern auch z.B. on-shore aber insbesondere off-shore Windkraftanlagen, deren Komponenten (Stahltürme, Fundamente, Umspannstationen u. ä.) von Wind und Seegang stochastisch belastet werden.

Weiterentwicklung der MAS MATCH- und MAS MICRO-Technik

Die Datenerfassungssysteme auf der Basis der MAS MATCH Serie (Geräte in zwei- bis achtkanaliger Ausführung) sind für Kurz- wie auch Langzeitmessungen bei Laboruntersuchungen als auch insbesondere für Datenerfassung und Speicherung unter Einsatzbedingungen konzipiert. Sie sind gewöhnlich zur Erfassung analoger Signale ausgelegt, enthalten die komplette DMS-Konditionierung und haben mehrere analoge und digitale Eingänge [2]. Sie eignen sich hervorragend für die lückenlose Überwachung und die statistische Analyse weiterer Messgrößen wie Kraft, Geschwindigkeit, Temperatur, Beschleunigung usw., die durch geeignete Messgeräte in elektrische Analogsignale umgewandelt sind. Wegen ihrer relativ kleinen Masse und den kleinen Abmessungen eignen sie sich hervorragend für mobile Anwendungen. Bewährte und praxiserprobte Entwicklungen wie z.B. MAS MICRO-II sowie MAS MICRO-II-MIL sind modular aufgebaut und haben bis zu 20 analoge Kanäle und bis zu 16 digitale Eingänge sowie Einbindung in BUS, z. B. CAN.

Das MAS-MICRO-II System kann die von den analogen Kanälen registrierten Messwerte softwareunterstützt nach verschiedenen Auswertungsmethoden verarbeiten und speicherplatzsparend ablegen. Zu den Auswertemethoden zählen: **RF** (Rainflow - Speicherung von Maxima- und Minima-Werten in der Ergebnismatrix), **LC** (Level Crossing - Zählung der Summenhäufigkeit der Klassengrenzen Durchgänge), **RP** (Range Pairs – Bereichspaar- Zählung bei Lastanstiegen- und -abfällen), **TaL** (Time at Level - Verweildauer eines Messsignals in einer Klasse), **TaLnD** (Time and Level multidimensional - simultane Registrierung der Messwerte von max. 3 Kanälen), **TM** (Transientenmodus mit Trigger - Speicherung von Messwerten in vorher festgelegten Zeitintervallen mit einer Frequenz bis zu 2 kHz pro Kanal), **SQTMS** (Sequentielle Extremas mit Zeit- und Master/Slave-Funktion mit einstellbarer Unterdrückung kleiner Lastspiele), **RF+TM+TaL** (gleichzeitige Ausführung der drei Methoden) und **RF+TM**.

Die Auswertemethode **DT** für digitale Kanäle erlaubt die Aufzeichnung der zeitlichen Abfolge von Digitalsignalen.

Schließlich bietet die Software **VAC** (Virtual Analog Channel) die Möglichkeit, die Messwerte aus analogen und digitalen Kanälen zu verrechnen und somit verdichtete Information zu gewinnen.

Die Firma Swift bietet eine ganze Reihe weiterer Geräte (Stromversorgung, Datenspeicherung, Datenauswertung, Datentransfer) und ist in der Lage nach Wunsch des Kunden problemorientierte Lösungen zu realisieren. Dazu gehören z.B. die **PowerBox** - ein **leistungsstarker Akku**, mit dem die Match-II- und Micro-II-Recorder über längere Zeit (bis zu einigen Monaten) autark betrieben werden können, das **Sensorknoten-Netzwerk**, mit dem bis zu 15 Recorder zu einem noch leistungsfähigeren, räumlich verteilten Mess-System zusammengeschlossen (Vervielfachung der Anzahl der erfassbaren Kanäle) und die Recorder von einem ausgewählten Netzwerkknoten (Gateway) direkt angesprochen, konfiguriert und gesteuert werden können. Nicht zuletzt ist auch die **REMOTE-LINK-IP-SWIFT Connect** Option zu erwähnen, die Fernsteuerung und das Fernauslesen der Daten über das Telefon oder das Mobilfunknetz erlaubt. Diese Geräte ermöglichen die Überbrückung größerer Zeiträume und Entfernungen von mehreren Hundert Metern. Auf der Basis der Messdaten erlauben Software--Auswerteverfahren (DAMAGE-Schädigungsrechnung) einfache Schadensvorhersagen und Lebensdauerberechnungen. Aufwändigere Messverfahren mittels Modalanalyse betrachten in der Langzeitüberwachung komplexe Strukturen und melden Schadensentwicklungen für die logistische Planung.

Knallharter Wettbewerb wirft seine Schatten bereits im Vorfeld voraus

Die Tendenz zur Durchsetzung des Formleichtbaus bei gleichzeitiger Verbesserung der Leistungsparameter stellt auch erhöhte Anforderungen an die Fertigung und Montage großdimensionaler Stahlstrukturen. Insbesondere das Fügen, in der Regel stoffschlüssig, also das Schweißen ist sehr arbeitszeitintensiv und hat einen großen Einfluss auf die Produktionskosten. Produktionskostensenkungen gehen Hand in Hand mit der Einführung energiereicher Schweißverfahren. Handelt es sich bei konventionellen Stahlkonstruktionen um normalfeste und höher feste Stahlwerkstoffe mit Blechdicken unter 20 mm, werden in letzterer Zeit zunehmend hochfeste Stähle bevorzugt, deren Schweißbarkeit kritisch ist. Gleichzeitig damit ist ihre Sprödbrechneigung im Vergleich zu normal- und höher festen Stählen ausgeprägter. Deshalb kommt der laufenden Überwachung und Dokumentierung der während des Schweißvorganges entstehenden Deformationen nicht nur für die Steuerung des Fügeprozesses, sondern auch für die Bewertung des Betriebsverhaltens eine immer größere Bedeutung zu.

Derartige Problemstellungen gehören nicht zu den klassischen Anwendungsgebieten dieser Geräte. Dabei geht es selten um Langzeit-, sondern meist um Kurzzeitmessungen. Ein weiterer Problemkreis ist die Vorausbestimmung und die Minimierung der Schweißdeformationen. Die Maß-, Form- und Lageabweichungen geschweißter Bauteile sind bei der nachfolgenden Montage der Baugruppen zu komplexen großdimensionalen Strukturen von großer Bedeutung. Auch die Gebrauchswerteigenschaften, die Funktionalität und die Zuverlässigkeit dieser Strukturen werden dadurch beeinflusst.

Durch den Einsatz der MAS MATCH- und der MAS MICRO-Technik können zahlreiche technologisch relevante Fragen beleuchtet und Ansatzpunkte für Reduzierung der Fertigungs- und Montagekosten durch Optimierung der Technologie aufgezeigt werden.

Kurzzeitmessungen (die Fertigungs- und Montageoperationen werden innerhalb von Stunden realisiert), wobei aber oft eine Fülle von Daten mit zum Teil recht großer Frequenz zu registrieren sind. Nachfolgend werden einige Beispiele aus der Fertigung und Montage vorgestellt.

Schweißspaltveränderung während des Fügeprozesses

Leistungsfähige Schweißverfahren sind hochproduktiv, stellen aber erhöhte Anforderungen an die Positionierung der zu fügenden Teile. So ist z.B. das Stumpfschweißen ebener Bleche dann effektiv, wenn der Schweißspalt, d.h. die Entfernung zwischen den zu verbindenden Teilblechen während des gesamten Vorgangs konstant bleibt. Bei konventionellen Verfahren ist diese Forderung nicht so scharf formuliert wie beim Laserschweißen. Bekanntlich aber bewirkt der Wärmeeintrag eine Deformation der Bleche, so dass der mit einer geforderten Genauigkeit von unter 0,1 mm eingestellte Spalt sich laufend verändert. Dadurch wird die Steuerung des Lichtbogens erschwert und die Nahtqualität kann in unzulässiger Weise verschlechtert werden. Vor dem Schweißen werden deshalb die Bleche geheftet, aber die Anzahl der Heftstellen und deren Abstand zueinander sind weitere technologische Größen, die oft nach Erfahrungswerten bestimmt werden. Deswegen ist die Kenntnis des Deformationsverhaltens beim Laserschweißen von Stumpfnähten eine unabdingbare Bedingung für jegliche Optimierungsbestrebungen.

Im Bild 1 ist die Versuchsanordnung zur Registrierung des Schweißspaltes zweier ebener Bleche aus höher festem Baustahl während des Laser-Hybrid-Schweißens mit einem CO₂-Laser der Nennleistung von 12 kW gezeigt. Die beiden Bleche haben eine Länge von 1000 mm und eine Breite von 500 mm, der Schweißspalt wurde zu Beginn des Fügeprozesses auf <0,15 mm eingestellt. Vor dem Schweißen wurden die Bleche nicht geheftet, um eine ungehinderte Spaltveränderung registrieren zu können.

Als Messgerät wurde ein klassischer COD-Geber verwendet, das elektrische Messsignal wurde von dem am Geber applizierten DMS geliefert und im Transientenmodus einer MAS MICRO Box mit einer Samplerrate von 10 Hz registriert. Es wurden insgesamt vier Versuche mit drei Blechdicken (8, 10 und 12mm) gemacht, wobei mit der Blechdicke 12 mm zwei Versuche durchgeführt wurden, um einen Anhaltspunkt zur Einschätzung der Messunsicherheit zu gewinnen. Die Schweißgeschwindigkeit V wurde in Abhängigkeit von der jeweiligen Blechdicke zwischen 1,6 und 2,0 m/min festgelegt und wurde bei jedem Versuch konstant gehalten.

Die so gewonnenen Messwerte können anschließend graphisch als Funktion der Messzeit dargestellt werden. In einem virtuellen Kanal könnte z. B. die Schweißspaltveränderung für verschiedene Positionen des Schweißkopfes zwischen dem Anfangs- und Endpunkt dargestellt werden

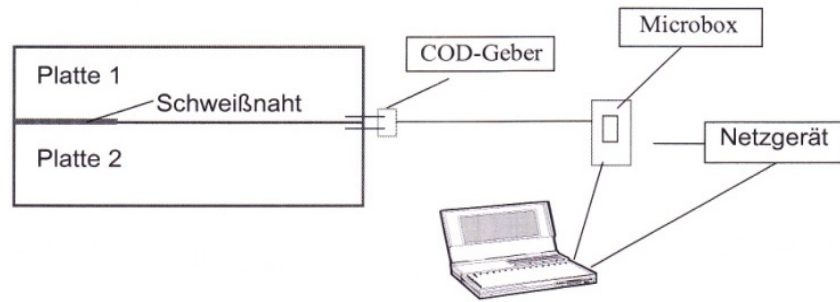


Bild 1 Versuchsanordnung zur Registrierung des Schweißspaltes

*) COD- : crack opening displacement (Risserweiterung, hier Spalterweiterung)

(Zeitpunkt 0 - Position 0, Spaltänderung 0; Zeitpunkt t - Position V.t - Spaltänderung gemäß kalibrierter Anzeige des COD-Gebers). Da die Nahtlänge ca. 1000 mm beträgt, wird die Stumpnaht in weniger als 1 Minute verschweißt.

Die Schweißspaltänderung als Funktion der Zeit ist im Bild 2 graphisch dargestellt. Erwartungsgemäß ist die Deformation (in diesem Fall die Spalterweiterung) eine deutlich ausgeprägte Funktion der Schweißzeit und hängt somit von der Blechdicke und der Lage des Schweißkopfes ab. Nach ca. 30 Sekunden wird keine signifikante Veränderung des Schweißspaltes mehr registriert, wobei mit der größeren Blechdicke die Deformation kleiner wird - ein allgemein bekanntes Phänomen beim Schweißen von Stahlkonstruktionen. Die zwei Messkurven für die Blechdicke 12 mm haben nur geringfügige Unterschiede und dies belegt die Genauigkeit der Deformationsmessung.

Anhand solcher Ergebnisse können auch weitergehende Fragen diskutiert werden, wie etwa die Dimensionierung der Heftstellen. Letztere sollen die Spaltveränderung verhindern, um die Prozessführung zu erleichtern. Heftstellen sind unterbrochene kurze Nähte, die nach dem Positionieren der zu fügenden Bauteile geschweißt werden. Sie sind Hilfsoperationen und beeinflussen negativ die Produktivität - also es gilt das Prinzip nur so viel Heftstellen wie nötig anzubringen. Diese Fragen können experimentell beantwortet werden, wenn z.B. im Zuge der Fertigungsvorbereitung die Grundsätze der Versuchsplanung sinnvoll angewendet werden. Eine Versuchsanordnung wie im Bild 1 würde die Lösung einer derartigen Aufgabe wesentlich erleichtern und den Versuchsaufwand auf ein notwendiges Minimum reduzieren.

Deformation eines Schwimmdocks unter Sonneneinstrahlung

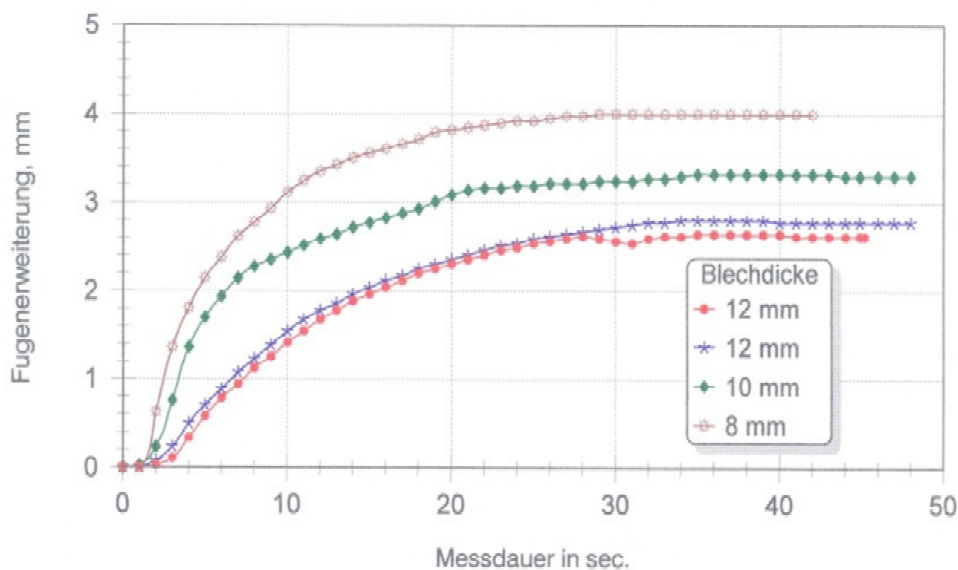


Bild 2 Schweißspaltänderung beim Laserschweißen einer I-Naht

Gewöhnlich werden Schwimmdocks als doppelwandige Stahlkonstruktionen gebaut, in denen Schiffe repariert aber auch montiert werden. Dabei muss es sich nicht immer um Schiffe handeln, sondern es können auch andere meeresstechnische Konstruktionen (Fundamente für off-shore-Windkraftanlagen, Umspannstationen für off-shore-Windkraftarme, Brückenkonstruktionen usw.) in einem Schwimmdock montiert oder repariert werden. Eine wichtige Aufgabe dabei ist die Einhaltung entsprechender Toleranzen beim Positionieren der einzelnen Komponenten bevor sie miteinander durch Schweißen gefügt werden können. Als Messbezugsbasis wird dabei die Pontonsole des Docks benutzt. Es wird vorausgesetzt, dass der Dockkörper eine ausreichende Steifigkeit besitzt und die Docksole eben bleibt. Durch die ungleichmäßige Massenverteilung beim Absetzen der zu montierenden Volumensektionen wird das Dock sowohl in Längs- als auch in Querrichtung unsymmetrisch belastet, da die Auftriebskraft als eine gleichmäßig verteilte Flächenlast auf dem Dockaußenboden wirkt. Der Dockkörper verformt sich und deshalb ist die angenommene Bezugsbasis (die Pontonsole) keine Ebene mehr, sondern wird zu einer Biegefläche deformiert.

Das Fehlen einer exakten Messbezugsbasis, die noch dazu einer zeitlichen Veränderung unterworfen ist, ist eine stochastische Quelle unerwünschter, hinderlicher und zeitraubender Korrekturen, die nicht nur den Fügevorgang sondern auch den Aufwand für Richtarbeiten wesentlich erhöht. Das betrifft in erster Linie die innovativen Konstruktionen, die nach den Prinzipien des Formleichtbaus konzipiert und gebaut worden sind.

Dieser negative Effekt wird zusätzlich durch die Deformation durch einseitige Sonneneinstrahlung insbesondere in den Sommermonaten verstärkt. Die positionierten Sektionen verändern dadurch Ihre

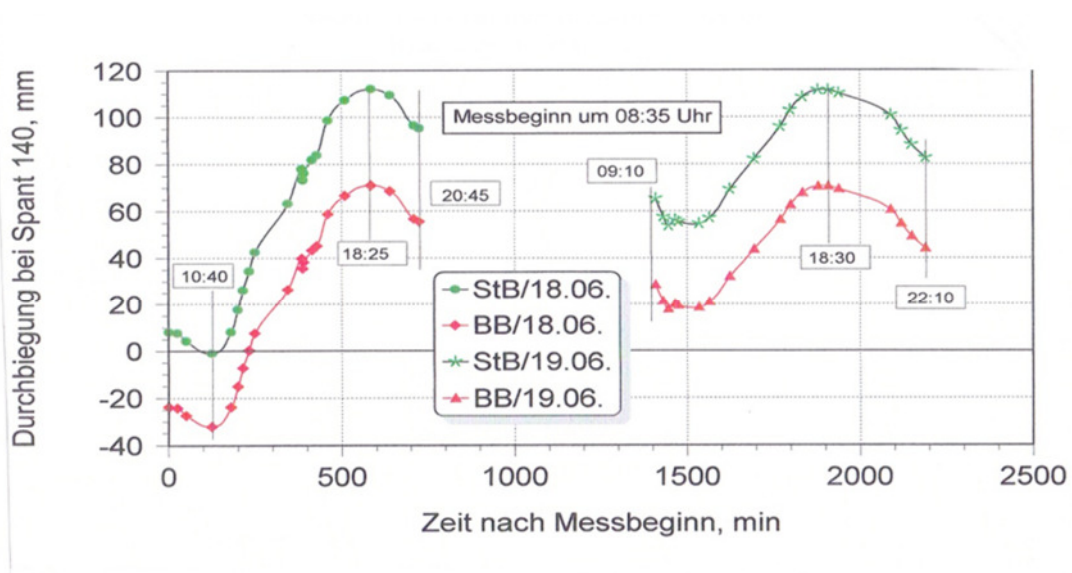


Bild 3 Durchbiegung eines Schwimmdocks infolge Sonneneinstrahlung

Lage und der Fügevorgang wird problematischer. Man kann sich das am besten dadurch verdeutlichen, wenn man bedenkt, dass die zu schweißenden Querstöße zweier Sektionen mit einer Höhe von mehreren Metern mit einer Toleranz von wenigen Millimetern (in der Regel ca. 2 mm) positioniert worden sind. Diese Toleranz kann bei Dockdeformationen nicht mehr beibehalten werden.

Im Bild 3 ist die Biegedeformation in der Mitte (Spant 140, DMS-Rosetten unterhalb des Topdecks appliziert) eines ca. 210 m langen und ca. 47 m breiten Schwimmdocks graphisch dargestellt. Die DMS-Anzeigen wurden kalibriert, um eine unmittelbare Registrierung der Durchbiegung zu ermöglichen. Die Messungen wurden an zwei aufeinanderfolgenden Tagen während der Sommerzeit durchgeführt, wobei die Mittagstemperaturen bei +24° C lagen und am frühen Morgen etwas +12°C betragen. Die rechte Dockseite (Steuerbord) wird stärker deformiert als die linke (Backbord), folglich erfährt der Dockkörper nicht nur eine Biegedeformation, sondern auch eine Verwindung. Eine derartige Deformation kann durch Fluten der Ballasttanks dynamisch ausgeglichen werden. Dazu wäre es notwendig, zusätzlich Geber anzubringen, weil derzeit die Docks lediglich auf der Grundlage von vier an den Eckpunkten des Pontondecks angebrachten Schwimmern getrimmt werden. Eine dynamische Steuerung des Ballastwassersystems ist auf der Basis der vorgestellten MAS MICRO-Technik durchaus denkbar.

Deformationen eines Schiffskörpers beim Eindocken

Moderne Werften gehen zunehmend zur Montage der Schiffskörper in überdachten Trockendocks über um ungünstige Witterungseinflüsse zu minimieren. Während der mehrere Wochen oder gar Monate dauernden Bauzeit und der Anwendung der Semitanden-Bauweise ist das Fluten des Docks und das Aus- bzw. das Eindocken des Schiffes erforderlich. Das Wiedereindocken bedeutet das Aufsetzen des Schiffes auf die Stützen (Pallungen) im Dock, nachdem das Wasser sukzessive abgepumpt wird. Das auf Glattwasser im Dock schwimmende Schiff kommt mit der abnehmenden Wassertiefe mit den Pallungen in Kontakt und schließlich liegt es vollständig darauf.

Die während es Aufschwimmens ermittelten Spannungen erlauben die Verifizierung der rechnerisch ermittelten Spannungen an Hot Spots der Konstruktion.

Im konkreten Fall wurden DMS auf der dünnen (7 mm) Deckbeplattung im oberen Deckbereich eines Passagierschiffes noch vor dem Aufschwimmen appliziert. Die DMS zeigen also vor dem Aufschwimmen Werte an, aus denen die Glattwasserspannungen ermittelt werden können. Der Aufsetzvorgang führt zu Minimierung der Glattwasserspannungen, die nach dem vollständigen

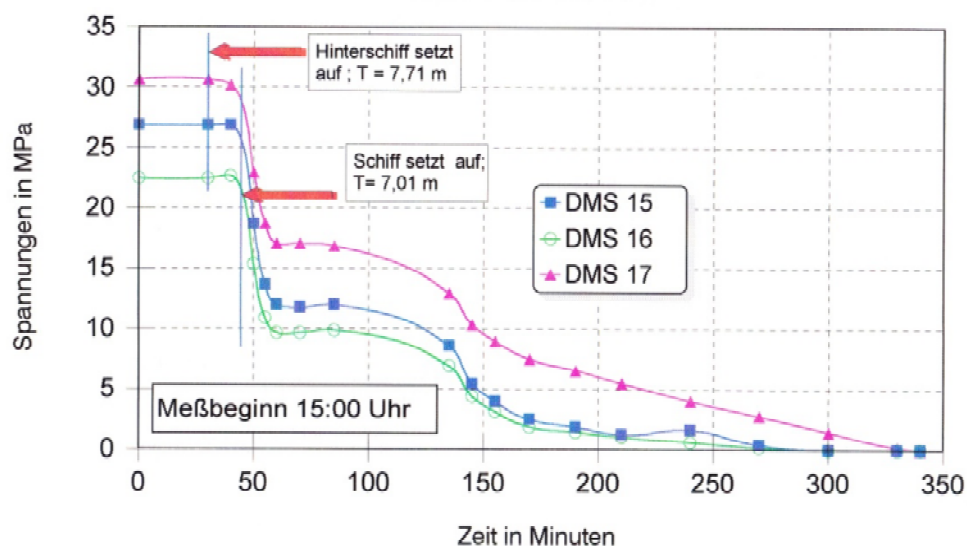


Bild 4 Veränderung der Spannungen während des Aufsetzvorgangs

Aufsetzen des Schiffes auf den Dockpallungen verschwinden sollten Bild 4 zeigt den Spannungsverlauf in drei ausgewählten Punkten des oberen Decks des Schiffes.

Die DMS wurden im Plattenfeld zwischen den Decksteifen appliziert, wobei der DMS 17 genau in der *Mitte des Steifenabstands (320 mm von der Steifenachse)*, der DMS 16 um 70 mm weiter in Richtung der Steife und DMS 15 in einem Abstand von 150 mm zur Steifenachse angebracht ist. Da der Aufsetzvorgang mehrere Stunden dauert, verändert sich die Wassertiefe im Dock recht langsam, so dass eine Mess-Signalregistrierung im Sekundentakt völlig ausreichend ist.

Die eingesetzten 8-kanaligen MAS MATCH - Boxen registrierten die DMS-Signale im Transientenmodus.

Die Glattwasserspannungen (zu Beginn des Aufsetzvorganges im Deck herrschenden Spannungen) stehen in einem plausiblen Verhältnis zu den durch FEM-Berechnungen nachgewiesenen Werten. Nach ca. 6 Stunden sitzt das Schiff auf den Pallungen und die Spannungen sind auf Null abgefallen. Damit wäre es denkbar, den Aufsetzvorgang ohne visuelle Kontrolle durch Taucher zu kontrollieren. Es genügt die DMS-Anzeigen im Auge zu behalten, um zu entscheiden, ob das Schiff wie geplant auf den Pallungen liegt und ob es nicht ggf. zu Überlastungen infolge Höhenunterschiede der Auflagenflächen gekommen ist.

Werden die DMS in unmittelbarer Nähe von Hot Spots (etwa Luken, Türausschnitte, Steifigkeitssprünge der Struktur etc.) appliziert, können bereits beim Aufschwimmen des Schiffes und vor seinem Ausdocken kritische Spannungsverteilungen erkannt und dann Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Eine derartige Messung während des Aufsetzvorgangs gibt die Garantie, dass die Pallungen richtig verteilt sind und es zu keiner unzulässigen Belastung der Schiffsstruktur gekommen ist.

Schließlich sei darauf verwiesen, dass Messaufgaben im Zusammenhang mit der Fertigung und Montage sowie zur Verifizierung von Rechenergebnissen (wie z.B. beim Aufschwimmen eines Schiffes im Baudock) keinen überdurchschnittlich kostspieligen Geräteaufwand erfordern, da meist mehrkanalige Boxen mit analogen Eingängen, mittlerer Speicherkapazität und mit Auswertesoftware für den Transientenmodus völlig ausreichend sind.

Die von der Firma Swift GmbH entwickelten Geräte finden in vielen anderen Bereichen des Fahrzeug- und des Stahlbaus Anwendung. Die Firma bietet auch fachliche Beratung zur Konzipierung des Messprogramms, bei der Applikation der Geber, beim Aufbau und Erprobung der Messkette (Funktionsnachweis) sowie bei der Auswertung der Messergebnisse bis hin zur Erstellung des kompletten Prüfberichts. Sie bietet auch die Realisierung der gewünschten Messungen - angefangen von der Konzipierung bis zum Schlussbericht - in enger Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber an.

- [1] B.G. Metschkow; Uhse; Dickler-Schütz:
Spannungsanalyse bei Fertigung und Betrieb von Schiffs- und
Stahlbaustrukturen.
MessTec & Automation 5/2005, S.36 - 37
- [2] --
Firmenmaterial der Gesellschaft für Messwerterfassungs-Systeme mbH Swift,
Reinheim, April 2015