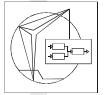




**Prof. Dr. Manfred Beyer,
Obering. Alfred Istel, Dipl.-Ing. Hermann Kunze**
Howaldtswerke-Deutsche Werft AG



Das HDW-System der Genaufertigung

Beherrschung der Schweißschrimpungen – ein wesentlicher Faktor für Wirtschaftlichkeit und Qualität

Vorbemerkungen

Schweißspannungen und -verformungen haben die Forschung in aller Welt stets nahezu magisch angezogen. Komplizierte Differenzialgleichungssysteme und einfache Faustformeln, aufwändige Experimente und ganz pragmatische Messungen im Alltag sind in Werkzeuge eingeflossen, die für ihre Beherrschung entwickelt wurden. An den Universitäten und Hochschulen haben die Lehrstühle für Schweißtechnik und verwandter Disziplinen häufig diese Forschung getragen. Die Schweißinstitute und die Industrie haben ebenso zum heutigen Erkenntnisstand beigetragen. Eine bedeutende Rolle spielten dabei aber auch nationale und internationale Fachgremien.

In der Kammer der Technik wirkte die Arbeitsgruppe Schweißverformungen und -spannungen sehr aktiv für die Koordinierung der Forschungen und für den regelmäßigen Erkenntnisaustausch im nationalen Rahmen. Sie stand von 1970 bis 1980 unter Leitung unseres hoch verehrten Kollegen Prof. Dr. RÖBENACK. Auf internationaler Ebene wurde diese Aufgabe u. a. mit dem Thema 9 der RGW-Forschung wahrgenommen. Dieses Fachgremium leitete bis zu seiner Emeritierung unser hoch geschätzter Kollege Prof. Dr. ALEXIS NEUMANN und nachfolgend Prof. Dr. BEYER.

Gegenseitige Mitgliedschaft sorgte auch zwischen diesen Fachkreisen für Koordination und Erfahrungsaustausch. Ein beredtes Beispiel für das Miteinander findet sich u. a. in gemeinsamer Autorenschaft und Herausgabe von Fachbüchern, so z. B. NEUMANN A.; RÖBENACK, K.-D. (Herausgeber) und Autorenkollektiv: Katalog über Schweißverformungen und -spannungen. Düsseldorf, Deutscher Verlag für Schweißtechnik (DVS), 1978.

Obwohl schon manches der physikalischen Probleme der Schweißtechnik als gelöst gelten kann, sind noch weit mehr Fragen nicht befriedigend zu beantworten. Allein im Schiffbau ziehen die Schweißverformungen noch gewaltige Kosten nach sich – teils zu ihrer Beseitigung bzw. Kompensation mit dem Richtbrenner oder ergänzend für das Spachteln z. B. der gesamten Außenhaut großer Luxusjachten von weit über 100 m Länge.

Ziel der Genaufertigung

Die Genaufertigung besitzt ein eindeutig definiertes Ziel, nämlich die Beseitigung vermeidbarer Arbeit. Vermeidbar ist z. B. das Abbrennen vieler hundert Meter Zugaben als Schweißnahtvorbereitung längs der Plattenkanten und von Zugaben an hunderten Profildenden von Hand oder mechanisiert im Dock. Diese Nähte sind schon einmal mit Präzisionsbrennschneidmaschinen in der Brennerei gebrannt worden – nur eben genau 30 oder 50 mm neben dem Sollwert. Die Mängel der handgebrannten Nähte sind wohl bekannt. Sie erhöhen die Schweißkosten erheblich. Im gleichen Sinne vermeidbar ist das zweimalige Positionieren von Sektionen, zuerst für das Abbrennen der Zugaben und ein zweites Mal zum Verschweißen der Nähte. Letztlich steht das Passendmachen ganzer Sektionen im Dock oder auch von Teilsektionen in der Vormontage dem Grundsatz entgegen „mach es gleich richtig!“. Die Menge vermeidbarer Arbeit ist ein gewichtiges Kriterium im Wettbewerb. Denn die Vergleiche innerhalb



der Spitzengruppe des internationalen Schiffbaus begründen aus rein fertigungstechnischer Sicht keine gravierenden Unterschiede in der Wettbewerbsfähigkeit.

Die Genaufertigung wird neben dem entscheidenden Vorteil der Beseitigung vermeidbarer Arbeit von weiteren wesentlichen Vorteilen begleitet. Der Wegfall der Anpassarbeit fördert in hohem Maße auch die Prozesskontinuität. Außerdem ist die Genauigkeit in bestimmten Grenzen Voraussetzung für die Automatisierung, für den Übergang zu einer industriellen Fertigung. Mit den Messungen und deren Auswertung werden des Weiteren Transparenz und Vergleichbarkeit des Schiffbauprozesses wesentlich verbessert. Schließlich nimmt im Produktionsbereich einer Werft auch der häufig gebrauchte Begriff der Informationsgesellschaft etwas greifbarere Gestalt an.

Im vorgenannten Sinn sind die wichtigsten Ziele des HDW-Systems (siehe auch HANSA 7/1995, S. 36; 9/1994, S. 208) der Genaufertigung:

- Beseitigung vermeidbarer Arbeit,
- Erhöhung der Prozesskontinuität,
- Förderung der Automatisierung,
- Information und Transparenz.

In den ersten drei Punkten herrscht weitgehende Übereinstimmung mit Auffassungen anderer Schiffbauer. Japanischen Autoren [1] sehen an Stelle des vierten Zieles die Reduzierung derjenigen Arbeiten, die ein besonderes Fachwissen erfordern. Dieser Ansicht steht eine durchaus andere Erfahrung bei der Genaufertigung gegenüber.

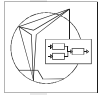
Fehler vermeiden statt Fehler beseitigen!

Zunächst besteht kein Zweifel, dass der Einbau ungenauer und verzogener Sektionen in komplizierten Bereichen großes Fachwissen und viel Erfahrung erfordert. Ebenso ist unstrittig, dass immer weniger Fachkräfte auf diesem Gebiet zur Verfügung stehen und dass bei genau gefertigten Sektionen natürlich auch gar nicht erst ein Bedarf entsteht und folglich Routine verloren geht. Bis hierher liegt Übereinstimmung vor. Die Herstellung genauer Sektionen jedoch fordert ebenfalls ein hohes und sehr spezielles Fachwissen. Es ist sicher ähnlich schwierig, Maßabweichungen und Verzüge zu vermeiden wie mit vorhandenen umzugehen. In dieser Hinsicht scheint es zweckmäßiger zu sein, mehr von einem Wandel des Fachwissens zu sprechen, nämlich von der Fehlerbeseitigung zur Fehlervermeidung. Die Anforderungen an die Organisation sind bei letzterem ungleich größer als bei der Fehlerbeseitigung. Während die Fehlerbeseitigung der Herrschaftsbereich relativ weniger Spezialisten ist und bleibt, muss die Aufgabe der Fehlervermeidung von allen beteiligten Mitarbeitern getragen werden, soll sie durchgreifenden Erfolg haben. Die Tradition des Schiffbaus mit der Zugabenfertigung kann einer solchen Entwicklung kaum krasser entgegenstehen. Die Zugabe hat Generationen von Schiffbauern zur Großzügigkeit im Umgang mit Maßen und Baufolgen erzogen. Und zu Recht, die Zugabe erlaubte jene Großzügigkeit. Die Genaufertigung aber kann nur erfolgreich sein, wenn sich die gesamte Organisation diesem Ziel verpflichtet fühlt. Einen geeinten Willen zur Genaufertigung und Fehlervermeidung zu formen und Können zu bilden, eingedenk auch der oft schwierigen Bedingungen eines reduzierten Stammpersonals, ist die Herausforderung für das Management und auch für jeden einzelnen. Die Genaufertigung ist mit den Mitteln der Technik allein nicht zu bewältigen. Darin liegt die Besonderheit der Aufgabe und die Erklärung dafür, dass dieses enorme Wettbewerbspotenzial in unserem Sichtbereich doch recht schleppend genutzt werden kann.

Werkzeuge

Der Wille versetzt Berge, sagt man – ja, aber nicht ohne Werkzeuge! Genaufertigung heißt auch, geeignete Werkzeuge zu schaffen und einzusetzen. Die Forderungen an diese Werkzeuge lauten im Schiffbau nicht anders wie überall im Leben: einfach, schnell und zuverlässig. Eine zusätzliche wesentliche

Forderung ist die Durchgängigkeit des Systems von Werkzeugen. Die Vorteile der Genaufertigung sind nur dann zu realisieren, wenn die Lösung sowohl die Teilefertigung, die Vormontage als auch die Endmontage zu einem Gesamtsystem verbindet.



Dreiecke (GSD) und Linien

- **Grundidee**

Die CAD-Systeme beschreiben die Konturen aller Einzelteile wie auch aller Verbindungen untereinander, z. B. durch Kehl- oder Stumpfnähte. Moderne CNC-Brennschneidmaschinen brennen die Konturen der Bauteile aus. Gleichmaßen können sie mit Markierwerkzeugen als CNC-Zeichenmaschinen beliebige Linien und andere Markierungen auf die Bauteile dauerhaft aufbringen. Unter diesen Umständen ist es nicht einzusehen, alle Maße zunächst in Zeichnungen darzustellen und diese dann dem Schiffbauer zum Zeichnungslesen zu übergeben. Die herausgelesenen Maße werden dann manuell auf die einzelnen Bauteile übertragen. Ein kostspieliger, durchaus fehlerträchtiger und in jedem Fall vermeidbarer Aufwand. Der viel kürzere und genauere Weg besteht darin, alle für die Montage erforderlichen Markierungen durch die Brenn- und Zeichenmaschinen auf die Bauteile übertragen zu lassen. Die Informationen nehmen dabei ohne Umleitung den direkten Weg von den CAD-Rechnern zu den Rechnern der Brennschneidmaschinen.

Die Grundidee lautet:

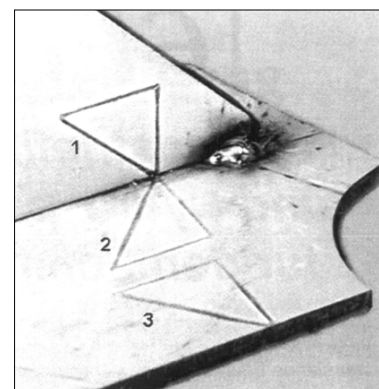
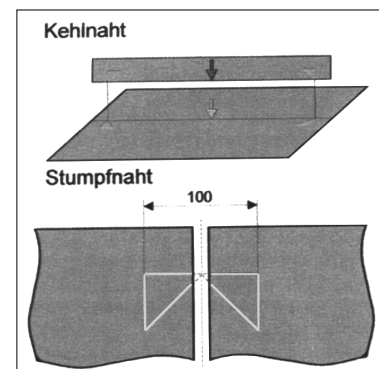
Bauteil = Zeichnung

Jedes Bauteil erhält in eindeutiger Weise alle für die Montage notwendigen Markierungen. Die Markierungen müssen ohne zu messen folgende Funktionen erfüllen:

1. Ausrichten in Querrichtung
2. Ausrichten in Längsrichtung
3. Ausrichten der Höhe nach
4. Prüfbarkeit nach dem Schweißen
5. Prüfung von Bauteilmaßen
6. Beständigkeit
7. Maschinenlesbarkeit

Bild 1 Montage mit Hilfe von Dreiecken

Bild 2 Montagebeispiel



Von allen untersuchten geometrischen Formen hat sich die Kombination aus Linie und Dreieck als diejenige erwiesen, die allen 7 Forderungen am besten genügt. Bild 1 zeigt das Prinzip für eine Kehlnaht- und eine Stumpfnahmtverbindung und Bild 2 die Ausführung im Falle einer Kehlnaht. Die Montageaufgabe besteht ausschließlich darin, Dreiecksspitze auf Dreiecksspitze zu positionieren. Die Dreiecke 1 und 2 befinden sich auf dem ersten und zweiten Bauteil stets auf der Mallkante. Mit dieser Festlegung ist ein Verdrehen der Bauteile ausgeschlossen. In Abhängigkeit von der Fügelänge der zu paarenden Bauteile wird an jedem Ende oder nur an einem Ende ein Dreieckspaar vorgesehen. Die Linie unterstützt die Positionierung auf einer Geraden von Dreieck zu Dreieck. Diese Funktion hat früher der Schnurschlag übernommen. Auch nach dem Schweißen ist eine zuverlässige Rückverfolgbarkeit bzw. Fehleranalyse gesichert, selbst wenn die Montage längere Zeit zurückliegt, weil die Länge der Katheten



einheitlich 50 mm beträgt. Das Dreieck 3 (Bild 2) dient der Montage der gesamten Baugruppe (Platte mit Versteifung) mit einer anderen Gruppe.

Beim Montieren von Stumpfnähten ist das System so aufgebaut, dass die zur Naht parallelen Katheten ausnahmslos auf einen Abstand von 100 mm zueinander gelegt werden. Das bedeutet, dass sich die Dreiecksspitzen auf Nahtmitte berühren und in Abhängigkeit von der Breite des Schweißspaltes ein Teil des Dreiecks abgeschnitten ist. Dass stets auf 100 mm ausgelegt werden kann, setzt allerdings die Lösung eines weiteren Problems voraus. Die Schrumpfung der Stumpfnahnt muss dort als Aufmaß angebracht werden, wo die Verkürzung der Länge tatsächlich vonstatten geht, also an der Plattenkante. Das allerdings erfordert, dass die Dreiecke um diesen Betrag durch das CAD-System verschoben werden. Dann berühren sich wieder die Dreiecksspitzen auf Mitte Naht und dann gelten wieder 100 mm als Auslegemaß zwischen beiden Katheten. Für das rein visuelle Ausrichten der Bauteile längs zur Naht stehen die anderen beiden Katheten zur Verfügung. Sie müssen sich in einer Flucht befinden. Auf diesem Wege ist z. B. beim Zusammenschweißen zweier Paneele von jeweils 16 000 mm x 16 000 mm Länge das Messen der Gesamtlänge von 32 000 mm auf das Ausrichten der zwei Dreieckspaare mit einem Abstand von 100 mm reduziert.

Eine weitere Funktion der visuellen Kontrolle übernehmen die Dreiecke für die Maßgenauigkeit der Einzelteile. Hierbei berührt die Dreiecksspitze 3 den Rand des Bauteils, wobei die Kathete bei Konturen senkrecht auf diese gerichtet ist. In den ca. 4 Jahren der Anwendung hat sich das Dreieck als sehr feinfühliges Werkzeug erwiesen.

Es versteht sich von selbst, dass alle Markierungen automatisch durch das CAD-System in die Bauteilbeschreibung eingebracht werden. Nach einer Spezifikation von HDW erfolgte die Entwicklung des Werkzeuges durch KCS. Seit mehr als vier Jahren wird das System mit großem wirtschaftlichem Erfolg angewendet.

Genauigkeit ist mit dem bloßen Auge sichtbar geworden, am Einzelteil und in der Montagegruppe. Auch nach dem Schweißen sind die Dreiecke bleibende Dokumente der Qualität. Sie lassen keine Missdeutungen zu und bergen damit auch keinen Konfliktstoff.

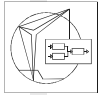
- **Zuverlässigkeit**

Die Zuverlässigkeit der GSD hängt von der Realitätsnähe der Schrumpfungsregeln des CAD-Systems ab. Zwei zu paarende Bauteile, Baugruppen oder Sektionen haben durchaus nicht immer die gleiche Schrumpfungsgeschichte. Je höher die Montagestufe, um so größer werden die Unsicherheiten. Es steht außer Zweifel, dass die Realitätsnähe in den oberen Stufen derzeit nicht ausreicht. Auf diesem Feld herrschen die mobilen 3-D-Messsysteme und die Referenzlinien, wie Basis, Mitte Schiff und Mitte Raum. Bauteile der ersten Montagestufe sind praktisch frei von Unsicherheiten aus der Schrumpfung. Nahezu ohne Einschränkung gilt diese Aussage auch für die zweite und dritte Montagestufe. Da sich mehr als die Hälfte der Fügelängen in diesen Stufen befinden, ist für den Hauptteil der Fügelängen eine hohe Zuverlässigkeit zu verzeichnen. Vorausgesetzt werden muss allerdings auch hier, dass die Schrumpfungsregeln des CAD-Systems erlauben, alle Bauteile mit korrespondierenden Anfangswerten auszustatten. **HDW** und **KCS** arbeiten auf der Basis einer gemeinsamen Spezifikation seit mehreren Jahren an der Vervollkommnung der Schrumpfungsregeln.

Neben der Güte der Schrumpfungsregeln hängt die Zuverlässigkeit der GSD von einer guten Sichtbarkeit ab. Die GSD und Linien werden mit Plasmamarkern aufgebracht. Die Stromstärke ist in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit (0...20 m/min) von 6...20 Ampere regelbar. Auch beim Start und an den Ecken ist die Regelbarkeit erforderlich, um Einbrände zu vermeiden. Grundsätzlich werden die Markierungen vor dem Brennen auf die thermisch noch völlig unbeeinflusste Platte gezeichnet. Der metallisch blanke Strich ist etwa 0,7 mm dick und für die Montageaufgabe sehr gut sichtbar. Nach dem Abschluss der Markierarbeiten folgt das Ausbrennen der einzelnen Bauteile. Damit treten thermisch bedingte Abweichungen ausschließlich in der Berandung in Erscheinung. Bei konsequenter Montage nach den Markierungen zeigen sich diese Abweichungen als Veränderungen des Schweißspaltes. Die

funktionsbestimmenden Maße von Markierung zu Markierung, z. B. bei einem Containerschiff von Mitte Raum bis Mitte Raum über eine Naht hinweg, bleiben weitgehend unbeeinflusst.

Der dominierende Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Markierungen allerdings geht von der Genauigkeit der Brennschneidmaschinen und der Arbeitswerkzeuge aus. Sie entscheiden die Genauigkeit der Einzelteile und ihrer Markierungen.



Optoelektronischer Brennschneidmaschinentest

Die in Normen angegebene Prüfung der Genauigkeit ist nicht zeitgemäß. Von einem modernen Test müssen geringster Arbeitsaufwand, ausreichende Genauigkeit, einfache Bewertung, zuverlässige Dokumentation und elektronische Verteilbarkeit der Qualitätsdokumente gefordert werden. Die Firma AICON, Braunschweig, hat in Zusammenarbeit mit HDW ein solches System entwickelt. Es wurden stationäre Referenzmarken in L-Form um das Brennbecken im Betonfundament starr verankert. Die Koordinaten der Marken werden in x- und y-Richtung ermittelt. Aus diesen Koordinaten wird ein Programm für die Brennschneidmaschine hergestellt. Nach dem Laden des Programms über Netz fährt die Maschine alle Referenzmarken in einer bestimmten Folge an. Eine optoelektronische Kamera misst die Genauigkeit, mit der der angesteuerte Punkt erreicht worden ist. Für eine rasche Bewertung der Testergebnisse werden die Messwerte, wie in Bild 3 dargestellt, visualisiert. Je ein Messpunkt in Quer- und Längsrichtung wird aus unterschiedlichen Richtungen angefahren. Dieser Test gibt durch das Umkehrspiel Auskunft über den Verschleißzustand der Maschine. Die übrigen Punkte zeigen die Güte der Justierung. Die visualisierten Messergebnisse stehen über Netz den Zugriffsberechtigten zur Verfügung. Die Daten werden der Lieferfirma der Maschinen für jeden Test per e-mail zur Verfügung gestellt. Sie dienen zur Vorbereitung der vereinbarten Wartung. Der Test erfolgt wöchentlich und zusätzlich nach Eingriffen. Er nimmt ca. 14 min in Anspruch.

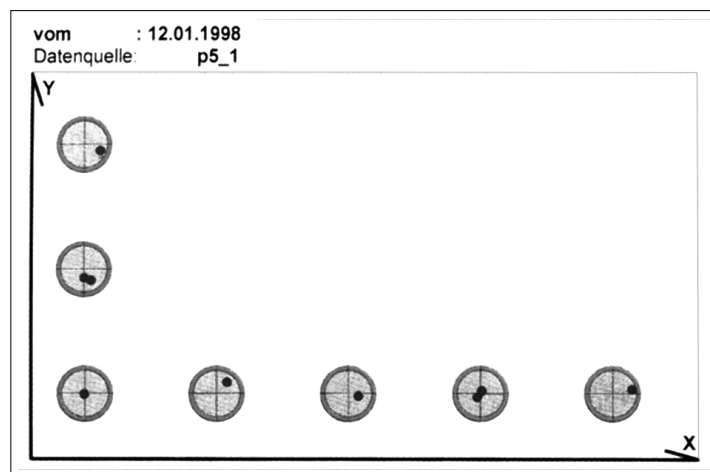


Bild 3 Brennschneidmaschinentest

Optoelektronischer Offset-Test

Die Arbeitswerkzeuge Brenner und Marker haben sich als Hauptquelle von Ungenauigkeiten erwiesen. Zum Beispiel können Düsenwechsel erhebliche Veränderungen der Position nach sich ziehen. Wenn aber der in der Maschine hinterlegte Offset (z. B. Abstand Achse Brenner zu Achse Marker) nicht mit dem tatsächlichen Abstand übereinstimmt, treten fatale Fehler zwischen der gebrannten Berandung des Bauteils und den aufgetragenen Markierungen in Erscheinung. In Bild 4 ist die Figur dargestellt, die Brenner

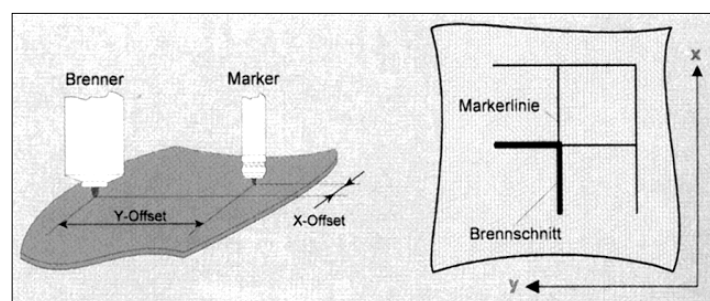


Bild 4 Offset-Test, Testfigur



und Marker ausführen. Im fehlerfreien Zustand bilden die Mittellinien des Brennschnitts wie auch des Markers eine deckungsgleiche Linie sowohl in x- wie auch in y-Richtung. Ähnlich dem Bild 4 erfolgt eine Visualisierung des Offset-Tests, so dass der Zustand der Arbeitswerkzeuge auf einen Blick beurteilt werden kann. Als Zusatzleistung wird noch die Fugenbreite in x- und y-Richtung von der Kamera gemessen. Überdies wird die Position der Kameraachse zur Brennerachse angezeigt.

Die Werkzeuge 2 und 3 garantieren Einzelteile, d. h. Brennkanten und Montagemarken in den vorgegebenen Grenzen der Genauigkeit. Die augenblickliche Genauigkeit und ihre zeitliche Entwicklung sind dokumentiert. Statistische Auswertungen geben Aufschluss über Veränderungen und unterstützen das Finden der Ursachen.

Regelmäßige Kontrollen dieser Art werden von den unmittelbar nachfolgenden Montageschritten erzwungen. Im gesamten Bereich des Gruppenbaus erfolgt keine Messung mehr. Es wird ausschließlich nach Dreiecken und Linien montiert. Beulsteifen auf Bodenwrangen machen die Empfindlichkeit besonders deutlich. Sie setzen stumpf auf die Längsspante am Innenboden und an der Außenhaut auf. Ihre exakte Länge ist zwar notwendig, aber für ein genaues Passen nicht ausreichend. Sie müssen schon im Gruppenbau besonders in der Längsrichtung genau positioniert werden. Andernfalls ist auf einer Seite zuviel Luft zuzuschweißen und auf der anderen trotz genauer Länge abzubrennen.

Panelmeßgerät

Bei HDW erfolgt wie bei vielen anderen Schiffbauern auch zunächst eine Rohbesäumung von Platten, die nachfolgend zu einem Panel zusammengeschweißt werden. Erst dieses Panel von ca. 16 x 16 Metern wird mit einem Autogenportal auf genaues Maß geschnitten. Bei dieser Fertigungsorganisation ist das Panel die entscheidende Basis der Genaufertigung. Es ist unerlässlich, die wichtigsten Maße des Panels zu prüfen. Zu diesen zählen die Hauptabmessungen und besonders auch die Lage des Koordinatensystems auf dem Panel. Das Koordinatensystem, gebildet z. B. von Mitte-Schiff und Mitte-Raum, wird hier erzeugt und im weiteren Montageprozess benutzt.

Zwei CCD-Kameras mit 2000 x 2000 Pixeln im Deckenbereich der Halle und ein Rechner für die Bildverarbeitung und Auswertung der Messung führen diese Aufgabe aus. Jedes Panel wird von einem entsprechenden Messprotokoll gemäß Bild 5 bzw. einer entsprechenden Tabelle begleitet.

Bei der Teilsektionsfertigung, z. B. beim Zusammenfügen zweier oder mehrerer Paneele, wird zunächst wie überall nach Dreiecken montiert. Ergänzend dazu wird eine Kontrolle der Lage der Koordinatensysteme zueinander vorgenommen. Akkumulierte Ungenauigkeiten, z. B. durch Brennen und verändertes Schrumpfverhalten, müssen in bestimmten Grenzen über den Schweißspalt ausgeglichen werden. Natürlich gilt in der zugabenfreien Fertigung der Grundsatz, dass die Funktionsmaße den Vorrang vor den Schweißspaltbreiten besitzen. Das bedeutet, dass das Maß Mitte Laderaum zu Mitte Laderaum über einen Stoß hinweg auf jeden Fall gehalten werden muss und Ungenauigkeiten im Schweißspalt ausgeglichen werden.

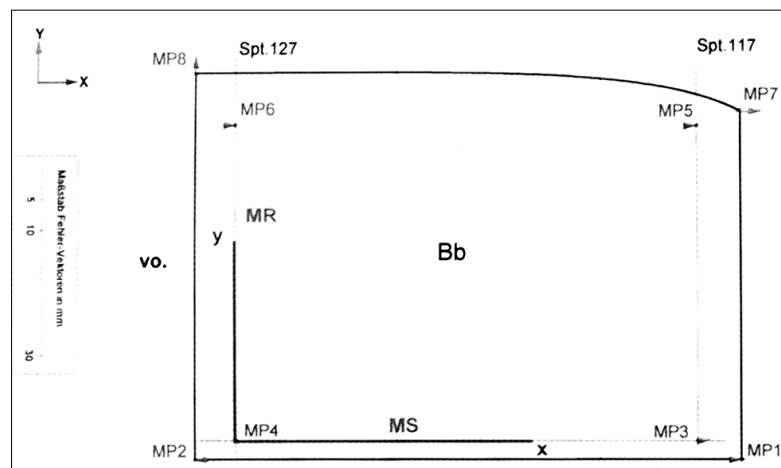
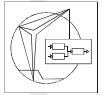


Bild 5 Visualisiertes Ergebnis Paneelemessung

Laserlängenmessgerät im Profilschnitt



Seit langem gilt die Auffassung, dass überlappte Profilverbindungen besonders beim Einsatz von Schweißrobotern keine Zukunftsaussichten besitzen. Wendet man aber bei Aussteifungen die bereits erwähnten Beulsteifen auf Bodenwrangen und auf Rahmenspante als Stumpfstöße an, werden sehr hohe Forderungen an die Genauigkeit der Profile gestellt. Das gilt gleichermaßen für die Längen der Beulsteifen und auch die Höhen der Längsspanen. Messreihen der Profilhöhen zeigen, dass die nach DIN EN 10 067 zulässigen Höhenunterschiede bis 300 mm voll in Anspruch genommen werden. Bei Profilen mit 320 mm Steghöhe nutzen die Stahlhersteller die Toleranz von ± 4 mm bis etwa 70 % aus. Konventionell zugeschnittene Profile haben des Weiteren bei zwei Schnitten in den Längen ebenfalls Abweichungen von 2...3 mm. Unter diesen Umständen ist ein Fertigen ohne Zugaben in diesem Bereich ausgeschlossen, zumal durch die Nichtlinearität des Schweißvolumens einer Kehlnahtverbindung bei zu großen Luftspalten besonders hohe Schweißkosten entstehen. Eine von Hand gebrannte Kehlnahtverbindung weist oft einen Luftspalt von 3 bis 4 mm auf. Fertigen ohne Zugaben ist hier nur sinnvoll, wenn die Spantfüße gefräst werden und dabei gleichzeitig eine konstante Steghöhe erzeugt wird. Für diese Aufgabe ist eine Profilfräse im Einsatz, die die Spantfüße fräst und die genaue Steghöhe sichert. Darüber hinaus leistet sie einen Beitrag zum Senkrechtstehen der Profile auf dem Paneel. Die Längenmessung am Profilschneidroboter erfolgt mit einem Laser, der eine Gerätegenauigkeit von $\pm 0,2$ mm erreicht. Auf dieser Grundlage werden ausschließlich die sehr wirtschaftlichen Stumpfstößverbindungen ausgeführt und unvorteilhafte Überlappungen vollständig vermieden. Auch auf die materialintensivere Lösung mit nicht angeschlossenen Beulsteifen kann verzichtet werden.

MONMOS, mobiles 3-D-Messsystem

Die Montagemarken auf den Bauteilen sichern die Montage ohne anzudeuten und ohne die daraus resultierenden Ungenauigkeiten. Sie werden ohne zusätzliches Messen im Gruppenbau und Sektionsbau angewendet. Beim Zusammenbau von Teilsektionen zu Blöcken und Großsektionen und vor allem bei der Bordmontage sind allerdings übergeordnete Messungen dominierend. Hier erfolgt das Ausrichten der Koordinatensysteme der Teilsektionen zueinander bzw. zum Schiffskoordinatensystem. In der Höhe bildet, wie allgemein üblich, die Basis die Bezugslinie und entsprechende Stichmaße von dieser. Die Breitenmaße beziehen sich grundsätzlich auf Mitte Schiff und bei Passagierschiffen zusätzlich auf Mitte Gang als weiteres Stichmaß. Die Längsmaße werden z. B. bei Containerschiffen von Mitte Raum oder bei anderen Schiffstypen von Mitte Sektion abgesetzt. Herausragende Bedeutung besitzt die Anwendung dieser und keiner anderen Bezugsmaße einheitlich sowohl für den Stahlbau, den Maschinenbau als auch die Einrichtung bei einrichtungsintensiven Schiffen. Traditionelle Messgeräte des Schiffbaus bieten keine Chance, eine zugabenfreie Fertigung, wie vorstehend skizziert, aufzubauen.

Die 3-D-Messung wurde Anfang 1993 eingeführt [2]. Von Beginn an galt als Unternehmensphilosophie für die Vormontage, keine gesonderte Messgruppe zu bilden, sondern dem Schiffbauer die Messsysteme mit sehr anspruchsvollen Feldrechnern als Werkzeuge der Genaufertigung in die Hand zu geben. Diese Lösung gibt bis zum heutigen Tage keinen Anlass zu Änderungen.

Bei der Einführung von MONMOS, SOKKIA, konnte das Gerät das Koordinatensystem ausschließlich in dem ersten Messpunkt mit dort senkrecht stehender z-Achse errichten. Dieses Vorgehen zieht einen gravierenden Nachteil nach sich. Wäre der erste Punkt besonders fehlerhaft, dann würde sich dieser Fehler durch die gesamte Messung ziehen. Erst eine am PC nachgeschaltete Ausgleichsrechnung könnte darüber Aufschluss geben. Für viele praktische Fälle des Stellens von Sektionen im Dock ist eine solche Arbeitsweise unzumutbar. Inzwischen bietet der Hersteller die Möglichkeit, vor Ort mit einem mathematisch ausgeglichenen Koordinatensystem zu arbeiten. Hierbei wird aus max. 6 Messpunkten im Feldrechner während des Messvorgangs die günstigste Lage ermittelt. Der einzelne Punkt spielt nun nur noch eine anteilige Rolle, aber keine dominierende mehr. Gegenwärtig erfolgt die schrittweise Umstellung des gesamten Messwesens. Es handelt sich dabei um einen tiefen Eingriff in



die Arbeitsweise des Schiffbauers. Erstmals kann der Koordinatenursprung dem menschlichen Auge nicht mehr zugänglich sein. Der ausgeglichene Ursprung und die übrigen Punkte könnten sich durchaus einige Millimeter in der Plattendicke oder über der Oberfläche befinden. Ähnliches gilt für die übrigen Richtungen. Letztlich gibt es jedoch keine Alternative zur Arbeit mit der vorteilhaftesten Lage des Koordinatensystems. Oberstes Ziel ist die Fehlervermeidung. Wie sollte man unter dieser Prämisse wissentlich ein unvorteilhafteres Koordinatensystem verwenden. Eine große Herausforderung! Für eine intensive Fortbildung am Arbeitsplatz ist diese tief greifende Änderung Anlass genug. Der Vollständigkeit halber muss noch die dritte Möglichkeit des Aufbaus des Koordinatensystems hinzugefügt werden. Drei Punkte definieren hierbei eine Ebene, die z. B. die x- und y-Achse enthält und auf welcher die z-Achse senkrecht steht. Dieser Modus ist besonders vorteilhaft bei geneigter Helling oder bei einer geneigten Lage der Sektion. Die Sektion muss für die letzten beiden Modi nicht ausgerichtet werden.

3-D- Mess- und Auswertesoftware 3-DIM für Windows

Die mit dem Messsystem ursprünglich angebotene Software zur Vorbereitung, Auswertung und Verwaltung der Messungen entsprach in keiner Weise den Erwartungen an Wirtschaftlichkeit und Komfort. Im Auftrage von SOKKIA Deutschland erfolgte von GLM Bochum im Zusammenwirken mit HDW die Entwicklung der vorgenannten Software. Sie erlaubt die Anfertigung der Prüfskizzen, der Prüftabellen, den Export der Sollwerte vom PC in den Feldrechner und nach der Messung den Import der Messwerte vom Feldrechner zurück in den PC für die Auswertung und Verwaltung der Messungen. Die Auswertung umfasst die Visualisierung der erreichten Genauigkeit durch die Darstellung der Fehlervektoren, Bild 6. Die Verwendung grüner und roter Pfeile erlaubt, mit einem Blick die erzielte Genauigkeit der jeweiligen Sektion einzuschätzen. Die roten Pfeile machen dabei die kritischen Zonen der Toleranzüberschreitung kenntlich. 3-DIM bietet zusätzlich ein Werkzeug zum mathematischen Ausgleich der Messwerte. Dieses Instrument hat unverzichtbare Dienste bei der Bewertung einer Sektion geleistet. Scheinbare Fehler, die z. B. auf einer Schräglage der Sektion beruhen, werden eliminiert. Mit der Einführung der Ausgleichsrechnung bereits im Feldrechner von MONMOS wird diese Funktion direkt in die Fertigung verlegt. Des Weiteren kann mit 3-DIM eine statistische Auswertung ausgewählter Messpunkte vorgenommen werden. Die Auswahl erfolgt mit Hilfe der Prüfpunktbezeichner. Sie sind so strukturiert, dass z. B. die Seitenlängsträger in einem bestimmten Doppelboden oder einer Serie oder aller bisher gebauten Böden oder beliebige andere Konstruktionen oder Elemente ausgewählt werden können. Das wiederum ermöglicht Rückschlüsse z. B. auf die Realitätsnähe der eingebrachten Schrumpfung oder die Bewertung der Häufigkeit bestimmter Mängel. Diese Aussagen eröffnen Wege für die kontinuierliche Verbesserungen der Prozesse. HDW hat die Software als Werklizenz in Netzwerkversion in Anwendung. In den Büros der Meister sind die erforderlichen Darstellungen der Genauigkeit der angelieferten Teilsektionen und Blöcke wie auch die Maße der bereits im Dock eingebauten Sektionen über den SQL-Server verfügbar. Bei letzterem sind vor allen Dingen die Maße des Anschlussquerschnitts zur ankommenden Sektion von Interesse.

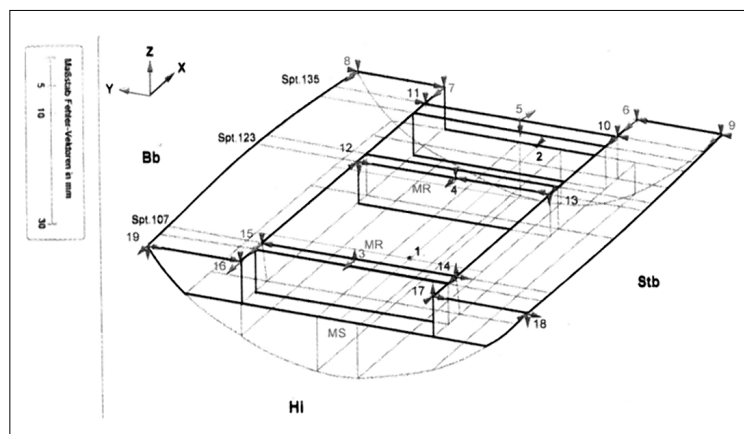
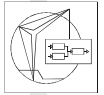


Bild 6 Visualisiertes Ergebnis Sektionsmessung

Prüfplaner in TRIBON



Die Prüfplanung in diesem Rahmen umfasst die Anfertigung der Prüfskizze und der Prüftabelle. Die Prüfskizze hat zur Aufgabe, den Prüfauftrag für den Prüfenden in wenigen Sekunden erfassbar zu gestalten. Die Prüfskizze ist für das menschliche Auge gedacht. Ihr Wert wird allein dadurch bestimmt, wie sie das rasche und sichere Verständnis des Prüfauftrages fördert. Das bedeutet, dass jede überflüssige Linie und jedes nicht unbedingt nötige Zeichen zu verschwinden haben. Die Prüftabelle enthält die Sollwerte, die Toleranzen in x-, y- und z-Richtung und den Prüfpunktbezeichner und natürlich freie Spalten für die Ist-Werte und die Soll-Ist-Vergleiche. Sie erfüllt überwiegend datentechnische Funktionen und ist Messdokument. Den Wert für den Prüfenden erhält die Prüftabelle erst durch die Visualisierung der Messwerte, durch die Umwandlung der Maßabweichungen in Fehlervektoren und die Zuordnung der Fehlervektoren zu den entsprechenden Punkten der Prüfskizze. Diese Darstellung erlaubt dann wieder in wenigen Sekunden, die Genauigkeit der Sektion und die eigene Leistung zu bewerten. Alle für die Prüfskizze und -tabelle erforderlichen wesentlichen Informationen liegen in TRIBON vor. HDW hat in Gemeinschaft mit KCS und MTW Wismar ein TRIBON-Werkzeug spezifiziert, mit dem die Prüfskizzen in TRIBON angefertigt werden. Die Programmierung ist nahezu abgeschlossen. Die Auslieferung durch KCS wird in Kürze erwartet. Prüfskizze und -tabelle werden nach ihrer Fertigstellung von TRIBON nach 3-DIM exportiert.

Nach einem angemessenen Zeitraum befindet sich eine erhebliche Menge von Sektionen in der 3-DIM-Datenbank. Es liegt nahe, bei der Anfertigung neuer Prüfaufträge und bei ausreichender Ähnlichkeit zunächst auf die Datenbank zurückzugreifen. Für kleinere Änderungen der Prüfskizze oder für Kopien mit kleineren Veränderungen steht dann nach wie vor 3-DIM zur Verfügung. In einem solchen Fall muss nicht in TRIBON zurückgegangen werden. Mit der Einführung des TRIBON-Werkzeuges ist die Erwartung einer wesentlichen Reduzierung der erforderlichen Arbeitsstunden im Bereich der Prüfplanung verbunden.

Den Datenfluss von TRIBON bis zur Anzeige der Messdaten der eingebauten Sektion auf dem Bildschirm im Meisterbüro zeigt Bild 7.

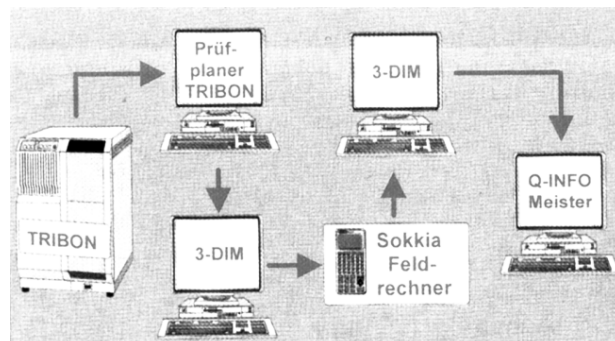


Bild 7 Informationsfluss bei der 3-D-Messung

Schrumpungsregeln

Hält man sich vor Augen, dass eine Sektion mit einer Länge von 32 Metern über alle Fertigungsstufen hinweg insgesamt etwa 30 mm an Länge durch Schrumpfung verliert, so ist die Notwendigkeit einer Berücksichtigung der Schrumpfung mehr als augenfällig. Von diesen 30 mm erhalten manche Bauteile, die bereits in der ersten Stufe eingebaut werden, den vollen Betrag und andere, die später eingebaut werden, nur einen mehr oder weniger großen Anteil. Längsschrumpfungen durch Kehlnähte an Längsspannten bei üblichen Spantabständen sind weitgehend gleichmäßig über die Fläche verteilt. Ein Stumpfstoß hingegen hat einen ausgesprochen lokalen Charakter. Der Betrag dieser Schrumpfung unterscheidet sich allerdings um etwa das Doppelte, wenn es sich einmal nur um den Stumpfstoß zweier einzelner Platten handelt und ein anderes Mal um denselben Stoß – nun allerdings im Verbund zweier Doppelbodensektionen. Selbstverständlich ist auch die Reihenfolge der Schweißung innerhalb eines Sektionsstoßes durch unterschiedliche Offsets zu berücksichtigen. Die Beispiele lassen die



Kompliziertheit und Komplexität der Schrumpfvorgänge erkennen. Sie machen auch deutlich, dass der Erfolg nur in geschickten Vernachlässigungen zu finden sein kann.

Der wirtschaftliche Ertrag der zugabefreien Fertigung hängt in einem wesentlichem Maße von der Qualität der angewendeten Schrumpfsregeln ab. Die Schrumpfsregeln der heute gängigen CAD-Systeme im Schiffbau sind teilweise in einer Zeit konzipiert worden, als die Genaufertigung vielerorts noch in den Kinderschuhen steckte. Heute müssen sich CAD-Systeme u. a. an der Realitätsnähe der Schrumpfsregeln messen lassen. Zu den wichtigsten Merkmalen einer wirklichkeitsnahen Abbildung der Schrumpfung zählt die Unterscheidung

- einer lokalen und einer gleichmäßig verteilten Schrumpfung,
- einer teileorientierten und einer blockorientierten Schrumpfung,
- verschiedener Schweiß- bzw. Richtfolgen,
- von mehr Parametern als nur der Plattendicke,
- von Schweißen und Richten,
- der Abstände zwischen den Schrumpfbzonen einschließlich schräg laufender Nähte.

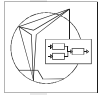
Mit dem Beginn der zugabefreien Fertigung bei HDW wurden gemeinsam mit KCS erweiterte Schrumpfsregeln spezifiziert, die die tatsächlich ablaufenden physikalischen Prozesse wesentlich realistischer widerspiegeln. Als erstes Werkzeug wurde die lokale Schrumpfung bei Stumpfnähten in Betrieb genommen. Damit konnte ein empfindliches Defizit beseitigt werden. Nachhaltig negativ beeinflussen die Fertigungsgenauigkeit das Fehlen von Werkzeugen zur Berücksichtigung der blockorientierten lokalen Schrumpfung und der Schweißfolgen. Ihr Fehlen zwingt zum Anwenden anderer, weniger geeigneter Werkzeuge. Mit diesem Herangehen sind höhere Fehlerquoten verbunden.

Betrachtet man die Schrumpfsregeln als Werkzeug, dann wären in einem bildhaften Vergleich die Schrumpfwerte das mit dem Werkzeug zu bearbeitende Material. Ein realitätsnahes und gleichermaßen aufwendiges System von Schrumpfsregeln ist nur sinnvoll, wenn auch in gleichwertigem Maße realistische Schrumpfwerte zur Verfügung stehen. Während für die teileorientierte Schrumpfung in der Fachliteratur ergiebige Quellen fließen [4], ist die blockorientierte Schrumpfung in Publikationen nahezu unerschlossen. Als Ursache dafür gilt sicher die starke Abhängigkeit von der Spezifik der Konstruktion und der Werft wie auch der große Aufwand, der zur Erlangung der Werte getrieben werden muss. Das Werkzeug 3-DIM unterstützt in der jüngeren Zeit das Ermitteln der Schrumpfwerte aus den Messreihen im besonderen Maße und wird die Entwicklung beschleunigen.

Montageplan

Das Hauptziel der Genaufertigung ist die Beseitigung von Anpassarbeiten als größten Anteil der vermeidbaren Arbeit. Als Maß für das Erreichen des Zieles gilt häufig der Anteil von zugabefreien Berandungen. Die Überbetonung der zugabefreien Ränder birgt eine erhebliche Gefährdung für die Grundorientierung der Genaufertigung. Die genaue Berandung ist nur ein Teil der Aufgabe. Sie wird sehr stark von der eingegebenen und der tatsächlichen Schrumpfung beeinflusst. Der weitaus schwierigere Teil der Aufgabe besteht in dem Erreichen einer genauen Form. Was nutzt eine Außenhautsektion, deren Längen und Breiten korrekt sind, die aber mit einer deutlichen Verdrehung belastet ist. Ähnliches gilt für einen Doppelboden, der die gefürchtete Rundung aufweist. Für derartige Deformationen ist ebenfalls die vorgenannte Schrumpfung verantwortlich. Die schädliche Wirkung auf die gesamte Sektion kann jedoch nur eintreten, wenn über so genannte Deformationsbrücken die Schrumpfung des Einzelteils in die Gesamtkonstruktion geleitet wird. Es gilt deshalb als Grundsatz der Genaufertigung die Regel vom freien Schrumpfen. In diesem Sinne sollte jedes Bauteil seine so genannte Eigenschrumpfung abgeschlossen haben, bevor es mit anderen Bauteilen verbunden wird. Die Regel des freien Schrumpfens gilt für das Schweißen gleichermaßen wie für das Richten. Das bedeutet, dass auch das Richten nicht erst im größeren Verbund erfolgen sollte. Beulen, die im Verbund nicht existieren, können auch nicht von Wand zu Deck und von Deck zu Wand transferiert werden. Als Werkzeug für die

Fixierung der Regeln des freien Schrumpfens für jede Sektion dient der Montageplan. Er ist Bestandteil des GS-Briefes (GS Genauigkeitssteuerung), der die Prüfskizze, die Prüftabelle, die Auswertungen und eben den Montageplan vereint.



Schlussbetrachtung

Der Wettbewerb zwingt die Werften, das Potenzial der Genaufertigung zu nutzen. Eine Industrie mit langer Tradition wandelt das grundlegende Prinzip der Fertigung von der Fehlerbeseitigung zur Fehlervermeidung. Die Einsparung, bezogen auf Fertigungsstunden für das Stellen von Sektionen eines Containerschiffes in der Bordmontage, die das größte Einsparungspotenzial aufweist, beträgt zwischen 30 und 40 %.

Die Werften schaffen sich im Verbund mit anderen innovativen Branchen neue zuverlässige Werkzeuge. Ihr Gebrauch bringt wiederum neue Erkenntnisse und Einsichten in den Fertigungsprozess. Er erschließt damit Felder, die sich bislang der fertigungstechnischen Innovation weitgehend entzogen. Zu letzterem zählt z. B. auch die Computersimulation von Montagevorgängen. Die entschlossene Nutzung der gewonnenen Erkenntnisse bietet die reelle Chance, weitere Wettbewerbsvorteile zu erringen. Geht man von der Größe der Zugaben aus, dann hat die Genaufertigung den Spielraum der Maße in der Fertigung um etwa eine Zehnerpotenz verkleinert. Eine derartige geometrische Genauigkeit bringt nun ihrerseits die Zeitbestimmung in das Blickfeld und übt Zwang aus zu verstärkter Innovation auch in diesem Bereich. Die technische Grundlage dafür bietet die genannte Steigerung der geometrischen Genauigkeit. Sie beseitigt weitgehend die Unsicherheit, die unter den Bedingungen der Anpassmontage mit der Bestimmung der erforderlichen Arbeitsstunden verbunden ist. Diese Möglichkeit nicht zu nutzen hieße, vor der Ziellinie stehen zu bleiben.

Die Fehlervermeidung als Arbeitsprinzip der Genaufertigung fordert aber auch mit recht wenig Nachgiebigkeit eine hohe Verantwortlichkeit aller Beteiligten. Schon ein flüchtiger Blick zu Schiffbauern anderer Länder [5] bis [9], aber auch der eigene Anspruch an Arbeits- und Lebensqualität drängen zu entschlossenem Herangehen an diese Herausforderung. Der Schwerpunkt zukünftiger Arbeit wird in der kontinuierlichen Verbesserung der Werkzeuge und der Stabilisierung der Genaufertigung gesehen. Die Gegenüberstellung von Toleranz und Streuung im Fertigungsprozess zeigt an, dass der Prozess noch Schwankungen aufweist, die durchaus als vermeidbar zu betrachten sind.

Literatur

- 1 Okumoto, Yasuhisa u. a.: Approach to Accurate Production of Hull Structures. IHI Engineering Review, Heft Nr. 1, 27. Januar 1994, Seite 25–31.
- 2 Beyer, Manfred: Mobiles 3-D-Meßsystem MONMOS im Schiffbau. Hansa – Schifffahrt – Schiffbau – Hafen. 132. Jahrgang, 1995, Nr. 5.
- 3 Beyer, Manfred: Accuracy Control in Steel Fabrication. IIW Shipbuilding Seminar, April 17–19, 1996, Odense, Denmark.
- 4 Ijichi, M.; Kohtake, S.; Kashima, H.: Computer Application to Accuracy Control in Hull Construction. Elsevier Science Publishers B. V. (North Holland), 1985, S. 475–484.
- 5 Okumoto, Y.; Matsuzaki, S.: Study of Accuracy Control of Hull Structure. Journal of Ship Production. Vol. 10, No. 1, Feb. 1994, pp. 51–58.
- 6 Aoyama, K.; Nomoto, T.; Takechi, S.: Basic Studies on Accuracy Management System for Shipbuilding. 9th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, 1997, Yokohama.



- 7 Storch, R. L.; Gribskov, J. R.: Accuracy Control for U.S. Shipyards. *Journal of Ship Production*, Vol. 1, No. 1, Feb. 1985. pp. 64–77.
- 8 Chirillo, L. D.: Process analysis via accuracy control. The national shipbuilding research program. US Department and Maritime Administration in corporation with Todd Pacific Shipyards Corporation.
- 9 Jacobsen, N., u. a.: Automatic Robot Welding in Complex Shipstructures. 9th International Conference on Computer Applications in Shipbuilding, 1997, Yokohama.