

Experimentelle Untersuchungen über das Verhalten von stahlverstärkten Elastomerschläuchen im Offshore Bereich

Experimental tests on the behaviour of steel-reinforced elastomer pipes for offshore

V. Perzborn, H. Gropper, T. Schramm, Düsseldorf

Zusammenfassung

Für die Ölübernahme im Offshorebereich wurde ein 150 m langer, stahlverstärkter Elastomerschlauch (Innendurchmesser = 190 mm) mit integrierten Kabeln entwickelt und gefertigt. Durch den Einsatz bedingte starke Beanspruchungen, wie Reibung in einem Führungsrohr, Spannungsspitzen im Bereich von geschweißten Verbindungsstellen sowie große Momentenbelastung am Schlauchende, wurden an kurzen Testschläuchen (3 m bzw. 6 m lang) mit Zyklenzahlen von 10000 bzw. 15000 simuliert und die maßgebenden Kräfte und Verformungen gemessen.

Summary

For offshore oil production a 150 m-long steel reinforced elastomer pipe (inner diameter = 190 mm) with integrated cables was developed and manufactured. As the application called for high loads on the pipe such as friction inside a guide line, stress peak points at welded connections as well as great moments at the pipe's end, short test lengths (3 m and 6 m) underwent a simulated number of cycles of 10000 and 15000 respectively and the basic forces and deformations were measured.

1. Einleitung

Die traditionelle Ölübernahme zwischen Tanker und Plattform im "Offshorebereich" erfolgt durch Andocken an Ladebojen, wobei die Wetterbedingungen -hohe Windgeschwindigkeiten und große Wellenhöhen- in rauen Gewässern, wie der Nordsee, die wirklichen Fördermöglichkeiten erheblich einschränken. Zusätzliche Schwierigkeiten bereitet das Manövrieren der enorm massebehafteten Tanker in die exakte Position sowie der Ankoppelvorgang selbst.

Das vom BMFT geförderte Projekt SOLS (Subsea Oil Loading System) erhöht die Einsatzzeit dadurch, daß die Kopplung zwischen Tanker und Entnahmestelle am Meeresboden stattfindet, wodurch auch das exakte Positionieren entfällt und mögliche Kollisionen zwischen Tanker und Ladebojen vermieden werden.

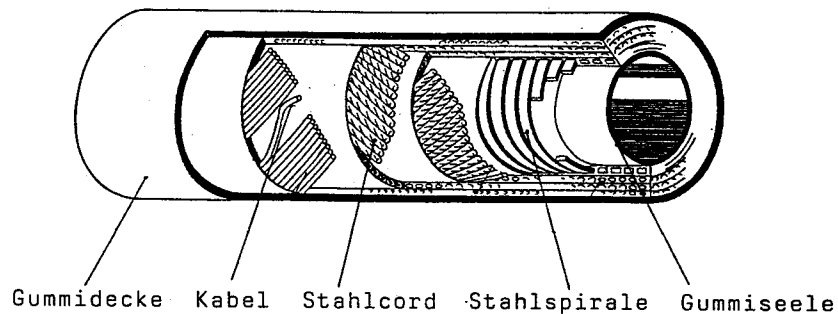


Abb. 1 Schlauchaufbau

Dazu wird ein stahlverstärkter 150 m-langer Elastomer-schlauch von einer Winde (6 m Durchmesser) durch eine Führung (Moonpool) im Tanker mit einer maximalen Geschwindigkeit von 1 m/sec auf den Meeresboden abgelassen. Die am Ende des Schlauches befestigte Ankoppeleinheit wird infolge Eigengewicht und mit Hilfe von 4 um 360 Grad drehbaren Wasserstrahldüsen, die durch den Schlauch versorgt werden,

an das Pipelineende angekoppelt. Dabei wird der gesamte Absenk- und Ankoppelvorgang durch ein hydroakustisches Meßsystem und eine Unterwasservideokamera überwacht und gesteuert. Der Elastomerschlauch ist während dieser Vorgänge und noch mehr während des Beladens starken Belastungen unterworfen. Mit verschiedenen Tests, die im folgenden näher erläutert werden, soll die Eignung des neuentwickelten Ladeschlauches (Abb. 1) für diese Anwendung nachgewiesen werden.

2. Abriebtest

Beim Absenken bzw. Einholen des Schlauches tritt, besonders bei eingeschalteter Seegangskompensation der Winde, Reibung zwischen Schlauch und Führungsrohr des Führungswagens auf. Eine Realisierung des Tests sowie die angreifenden Kräfte zeigt Abb. 2. Der Schlauch wurde in einem Testrahmen mit einer Längszugkraft von 100 kN beaufschlagt, was dem "Gewicht" des Koppel-elementes und ca. 200 m Schlauch im Wasser entspricht. Gleichzeitig wurde zur Simulation der Strömung eine Querkraft von 8 kN aufgebracht. Die Abriebvorrichtung, ein zylindrisches Stahlrohr mit einem Gewicht von 80 kg, wurde mit einer maximalen Geschwindigkeit von 1 m/sec über den Schlauch in einem Bereich von ± 500 mm mit einem Hydraulikzylinder bewegt. Der Schlauch wurde während des Tests über eine zentrale Bohrung ständig mit Wasser (ca. 10 l/min) versorgt. Durch das Verschieben des Rohres wurde der Schlauch aus seiner Ursprungslage quer zur Schlauchachse ausgelenkt. Die daraus resultierenden Kraftänderungen (Längs- und Querkraft) wurden jedoch durch Druckminderventile in den Hydraulikleitungen kompensiert.

Die nach 0, 2500, 7500 und 15000 Zyklen durchgeführten Umfangsmessungen ergaben keine signifikanten Änderungen.

Der Abrieb war bei Wasserkühlung auch nach 15000 Zyklen so gering, daß selbst in der direkten Kontaktzone die fertigungsbedingte Bandagenstruktur noch teilweise erhalten war. Trockenreibetests ohne Wasserberieselung mußten nach 300 Zyklen abgebrochen werden, weil die Gummioberfläche infolge Reibungswärme eine Temperatur von 388 K angenommen hatte; nennenswerter Abrieb war jedoch auch in diesem Fall nicht festzustellen.

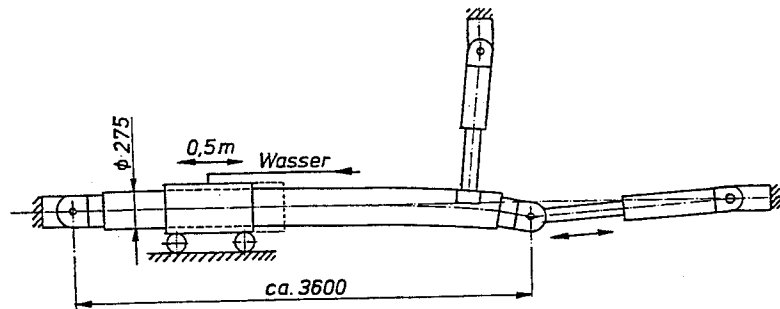


Abb. 2 Abriebtest

3. Nippelknicktest

Die benötigte Schlauchlänge von 150 m kann aus fertigungstechnischen Gründen nicht in einem Stück hergestellt werden; es werden die biegesteifen Metallnippel zweier Einzelstücke zusammengeschweißt. Anschließend wird dieser Bereich übervulkanisiert. Beim Ladevorgang kann es vorkommen, daß dieser Bereich auf der Trommel aufliegt und ein Abheben des Schlauches auftritt, was zu lokalen Beanspruchungen im Übergangsbereich Schlauch - Nippel führt. Der maximale theoretische Winkel zwischen Schlauch und Nippel ergibt sich unter der Annahme, daß am Nippelende ein echtes Abknicken des Schlauches auftritt. In Wirklichkeit stellt sich jedoch ein weicher Übergang zwischen Schlauch und Nippel ein.

Ohne Einschränkung der Allgemeingültigkeit wurde der Schlauch in einer gestreckten und nicht getrommelten Lage getestet. Eine Prinzipskizze des Tests zeigt Abb. 3. Die Zugkraft des abgetrommelten Schlauchteils wurde über einen kraftkonstanten Hydraulikzylinder simuliert. Im Bereich des biegesteifen Nippels wurde der Schlauch senkrecht zu seiner Achse 15000 mal mit einem Hydraulikzylinder auslenkt. Während des gesamten Tests wurden der Innendruck, die Längskraft sowie mit Hilfe induktiver Näherungsgeber die Auslenkung des Schlauches gemessen, wobei die Auslenkkraft über der Zyklenzahl konstant gehalten wurde.

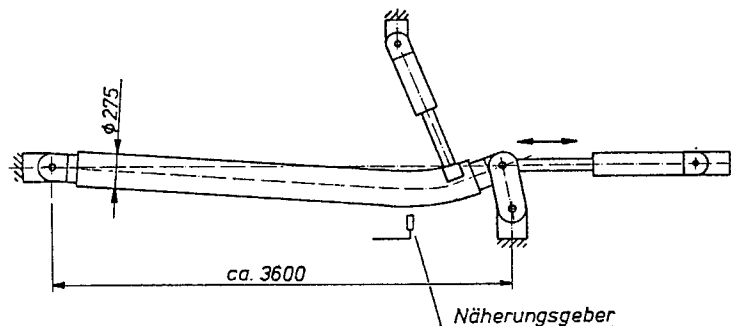


Abb. 3 Nippelknicktest

Eine Schädigung des Schlauches hätte nur durch zwei mögliche Ereignisse eintreten können:

- a) die lokale Dehnung bzw. Stauchung der Stahlcordbewehrung im Übergangsbereich zwischen Nippel und Schlauch ist zu hoch;
- b) am Nippelende treten Spannungsspitzen auf.

Diese Schäden würden infolge der großen Biegesteifigkeitsänderungen auf den direkten Übergangsbereich Nippel - Schlauch begrenzt sein und zu Delaminierungserscheinungen in der Schlauchwand führen, was wiederum einen Druckabfall nach sich ziehen könnte.

Über die gesamte Testdauer von 15000 Zyklen waren jedoch weder ein Druckabfall, noch eine Vergrößerung der Auslenkung bei gleicher Auslenkkraft festzustellen. Ein mit dem "vorgeschädigten" Schlauch anschließend durchgeführter Längszugzerreißtest ergab auch eine Zerstörung im Schlauch (es kollabierte die eingebaute Federstahlspirale) und nicht im Nippelbereich. Es kann davon ausgegangen werden, daß auch ein häufiges Auf- und Abtrommeln des Schlauches im Einsatz die Funktionsfähigkeit des Schlauches nicht beeinträchtigen wird.

4. Einspanntest

Bei der Ölentnahme wird aus Sicherheitsgründen ein längeres Stück Schlauch abgelassen, als es der direkten Strecke Pipeline end manifold - Tanker entspricht. Dabei muß der Schlauch aus konstruktiven Gründen an beiden Enden der Randbedingung "vertikale Tangente" genügen. Von seinem mechanischen Verhalten her kann der Schlauch mehr einem biegeschlaffen Seil als einem Stab zugeordnet werden. Dies bedeutet, daß der Schlauch infolge der angreifenden Kräfte (Eigengewicht, Auftrieb, Strömung und Wellenbewegung) bis in die Nähe des Bodens wie ein Seil nahezu senkrecht herunterhängt und die Überlänge im bodennahen Bereich durch eine Art Tropfenbildung abgebaut wird (Abb. 4).

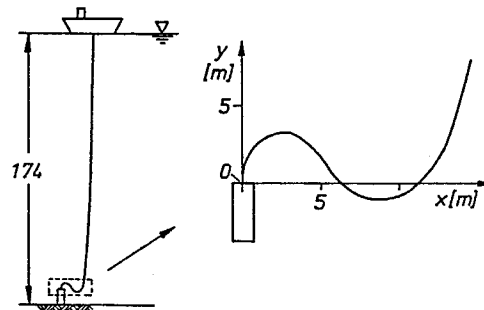


Abb. 4
Schlauch-
konfiguration

Dabei entstehen in diesem Bereich verhältnismäßig große Biegemomente, die bis zur Einspannstelle stetig anwachsen und den Schlauch stark verbiegen. Eine erhöhte Gefährdung ergibt sich an der Übergangsstelle Nippel - Schlauch, weil an dieser Stelle die Biegesteifigkeit eine sprunghafte Änderung von ca. zwei Zehnerpotenzen erfährt (Abb. 5). Aus diesem Grund wurden Möglichkeiten zur Erhöhung der Biegesteifigkeit von Schläuchen untersucht.

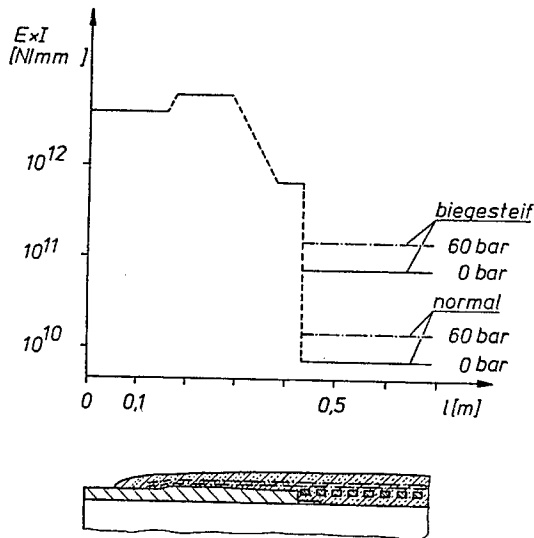


Abb. 5
Biegesteifig-
keitssprung
Nippel-Schlauch

Der von Telefonkabeln oder sonstigen Geräteleitungen bekannte Knickschutz weist im allgemeinen einen mindest doppelt so großen Durchmesser wie das jeweilige Kabel auf. Da der Schlauch durch den Moonpool geführt werden muß und dieses Führungsrohr nur eine gerinfügig größere lichte Weite als der Schlauch besitzt, kam diese Maßnahme nicht in Betracht. Damit entfielen auch "Biegerestriktoren" mit einem Aufbau aus Scheiben und Seilen oder Blöcken. Versuche mit härteren Gummisorten, teilweise mit Fasern verstärkt, brachten nur eine Biegesteifigkeitserhöhung um den Faktor 2.

Es wurde daher der Einfluß des Wickelwinkels der Stahlcordbewehrung auf die Biegesteifigkeit des Schlauches untersucht /1/. Üblich ist ein Wickelwinkel von 54.5 Grad, weil dann die Radialdehnungen gleich groß sind wie die Axialdehnungen. Man kann sich dies leicht an den beiden Extremfällen $\alpha = 90$ Grad und $\alpha = 0$ Grad verdeutlichen. Für den Fall $\alpha = 90$ Grad hat man eine sehr weiche Spirale vorliegen, die einem aufgebrachten Biegemoment durch nahezu reine geometrische Formänderung ausweicht. Im anderen Fall $\alpha = 0$ Grad liegen parallel zur Schlauchachse lauter Zug- und "Druckseile". Die Zugseile nehmen sofort Kräfte auf und längen sich entsprechend ihrem Stoffgesetz. Auf der Druckseite stellt sich durch die geringe Stauchfähigkeit der Stahldrahtlitzen schon bei geringen Formänderungen ein Stabilitätsproblem ein; der Stahlcord versucht, seitlich oder radial auszuweichen. Hierbei ist ein seitliches Ausweichen durch die dichte Lage der benachbarten Litzen und ein radiales Ausweichen nach innen durch die verhältnismäßig steife Spirale eingeschränkt. Der Stahlcord kann nur radial nach außen zur Gummidecke ausbeulen. Dieses Ausbeulen kann durch zusätzliche radiale Stahlcordbandagierung reduziert werden: der Stahlcord wird in kurzen Abständen unterstützt, die Knicklänge wird reduziert und an Stelle der Beulen treten viele Runzeln mit geringer Amplitude, die unschädlich sind. Zusätzlich ergibt sich eine Biegesteifigkeitserhöhung (Faktor 2 bei zweilagiger Wicklung)

Anhand von Tests (Abb. 6) sind sowohl die Biegesteifigkeiten (Abb. 7) als auch Zugsteifigkeiten von Schläuchen mit verschiedenen Designs ermittelt worden. Mit diesen Werten ist vom LMT in Aachen eine Computersimulation verschiedener Schlauchkonfigurationen /2/ durchgeführt worden, bei der die Parameter: -Überlänge, -Ansatz von Strömungskräften, -Innendruck, -Länge des biegesteifen Stückes und -Länge des Übergangsbereiches variiert wurden. Nach Auswer-

tung dieser Daten wurde zur Reduzierung der Schlauchkrümmung an der Ankoppeleinheit dieses Schlauchende auf 2 m Länge durch zwei zusätzliche Stahlcordlagen im Winkel von + 35 Grad (fertigungsbedingt) verstärkt. Der zusätzliche Stahlcord wurde noch über weitere 8 m eingebaut, wobei der Wickelwinkel sukzessive auf 55 Grad angehoben wurde, um ein "Verschmieren" der Biegesteifigkeit auf den ursprünglichen Wert zu erreichen und um Spannungsspitzen am Ende des Stahlcords zu reduzieren. Zusätzlich wurde mit 2 Lagen radial gewickeltem Stahlcord bandagiert. Diese beiden Maßnahmen erhöhten die Ausgangsbiegesteifigkeit um das 10fache, wobei der minimale Biegeradius nur um etwa den Faktor 4 - 5 vergrößert wurde.

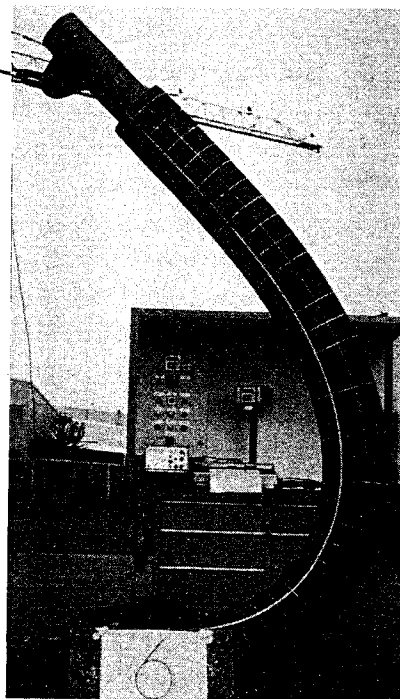
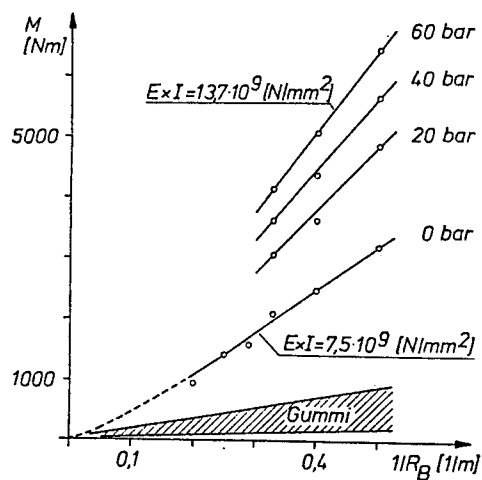


Abb. 7 Biegesteifigkeit

Abb. 6 Biegetest

Um den Schlauch auf seine Tauglichkeit für das SOLS-Projekt zu untersuchen, wurden zwei Testschläuche gebaut: einer in dem Grunddesign und einer in der biegesteifen Version. Deren Länge wurde nach Auswertung der Computerberechnung mit 6 m festgelegt, weil an dieser Stelle auch für unterschiedliche Konfigurationen das Biegemoment weitgehend abgebaut oder bereits ganz zu Null geworden ist. Damit entfällt das Anbringen und besonders das aufwendige Nachführen eines Momentes.

Das eine Schlauchende wurde über die biegesteifen Nippel fest eingespannt, während das andere Schlauchende mit Hilfe von zwei Pneumatikzylindern zwischen zwei Punkten bewegt wurde, deren Koordinaten aus der Computerberechnung für zwei unterschiedliche Schiffsabsenkungen resultierten (Abb. 8). Dabei war dieses Schlauchende über zwei Stahlseile, die über Umlenkrollen geführt wurden, mit den Pneumatikzylindern verbunden, sodaß die Richtung der jeweiligen resultierenden Kraft aus Berechnung und Test miteinander verglichen werden konnte. Zusätzlich waren in die beiden Stahlseile zwei Zugkraftaufnehmer integriert.

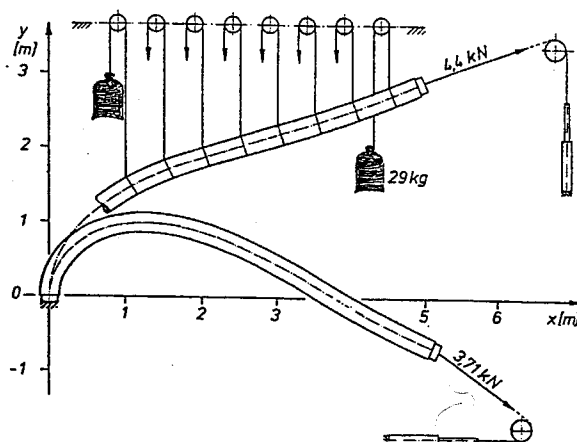


Abb. 8
Einspanntest

Damit war es möglich, ebenfalls die Größe der jeweiligen resultierenden Kraft aus Berechnung und Test miteinander zu vergleichen. Außerdem sollte durch die ständige Messung der eventuell geringer werdenden Zugkräfte eine Schädigung des Schlauches frühzeitig angezeigt werden. Zusätzlich wurde während der gesamten Tests über 10000 Zyklen der Innendruck überwacht und aufgezeichnet. Die Gesamtkonfiguration des Schlauches in den beiden Extrempositionen wurde alle 2500 Zyklen vermessen.

Da dem Schlauchgewicht des wassergefüllten Schlauches von 104 kg/m eine Auftriebskraft von 58 kg/m entgegenwirkte, konnte diese Kraft für die Berechnung einer realistischen Konfiguration nicht vernachlässigt werden und mußte auch für die Tests realisiert werden. Dazu wurden im Abstand von 0.5 m, 29 kg schwere Sandsäcke am Schlauch befestigt, die, über Umlenkrollen geführt, der Schlauchbewegung folgten und eine entsprechende Auftriebskraft simulierten.

Es trat während der gesamten Tests weder ein Druckabfall auf, noch eine signifikante Änderung der aufzubringenden Kräfte oder der Schlauchkonfiguration. Durch die vorgegebene Beanspruchung erfolgte keine Schädigung des Schlauches. Dies wird auch dadurch erhärtet, daß der Schlauch bei einem anschließenden Berstdruckversuch nicht im Bereich des kleinsten Biegeradius (größtes Moment), sondern an einer vorher kaum belasteten Stelle geborsten ist.

5. Kabelintegration

Zur Übertragung von elektrischer Energie für die Hydraulikmotoren sowie zur Informationsverarbeitung sollten zusätzlich Energie- und Datenkabel und erstmalig auch Lichtwellenleiter vollständig in die Schlauchwand integriert werden. Da auch durch eine Spirale verstärkte Elastomer-

schläuche bei einer Zugbeanspruchung eine Dehnung von bis zu 8% aufweisen, wurden alle Kabel in einer Helixform in die Decke integriert (Abb. 9). Es wurden so jeweils 300 m Kabel in 150 m Schlauch einvulkanisiert. Da diese Überlänge für einen kaum dehnfähigen (max. 1%) Lichtwellenleiter immer noch zu gering ist, wurde der LWL zusätzlich noch in einer Sinusform in dem Schlauch verlegt, sodaß etwaige Zugkräfte nicht durch Längsdehnung sondern durch ein Aufspringen der Sinusform (kleinere Amplitude und größere Phase) abgebaut würden.

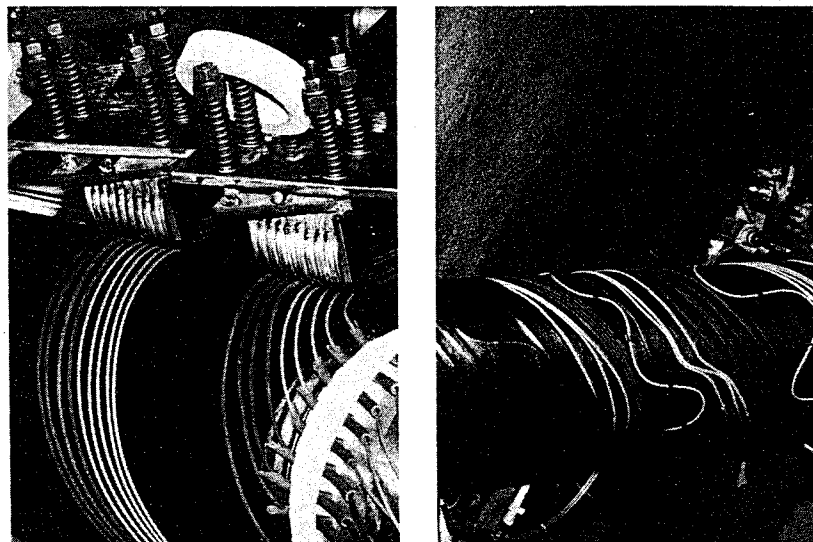


Abb. 9 Kabelintegration

Eine Schädigung der einzelnen Kabel konnte durch die oben angeführten Tests auch nach 15000 Zyklen nicht festgestellt werden. Hierbei konnte der LWL jedoch nur visuell auf Lichtdurchgang überprüft werden, da für eine quantitative Messung die Länge nicht ausreichend war. Messungen an der Hauptausführung mit Hilfe einer Rückstreuung, bei

der ein kurzer Lichtimpuls in den LWL eingekoppelt und von jedem Ort des LWL ein konstanter Teil des Lichtes zurückreflektiert wird, ergab eine sehr hohe Dämpfung von ca. 100 dB/km, sodaß eine wirtschaftliche Betreibung von TV-Systemen nicht möglich ist. Eine nachträgliche Fehleranalyse ergab, daß infolge unterschiedlichen Schrumpfverhaltens der reinen Faser und eines die Faser umgebenden Kunststoffröhrchens beim Vulkanisationsprozess Micro- und Macrobending aufgetreten ist, sodaß an vielen Stellen Licht aus der Faser ausgekoppelt wurde. Derzeitig wird ein LWL entwickelt, der im einen Stahlcord integriert wird. Durch die Stahldrahtarmierung soll ein Schrumpfen des Kunststoffröhrchens weitgehendst vermieden werden.

Schrifttum

- /1/ Peuker, M. Zum Festigkeits- und Verformungsverhalten unidirectional cordverstärkter Elastomere, Dissertation, RWTH Aachen, 1981
- /2/ Kokkinowrachos, K. Static and dynamic Analysis for the Design of Flexible Risers in Floating Production Systems, PRADS, 1987
Giese, K.