

Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1)

Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.

Zur Untersuchung von Bauteilen und Maschinenelementen bei statischer und dynamischer Belastung sowie unter tribologischen Gesichtspunkten existieren am Institut für Maschinenwesen zahlreiche selbstkonstruierte und in Eigenfertigung hergestellte Prüfstände.

At the Institute of Mechanical Engineering several test machines are in use where investigations of machine elements under static and dynamic loads and tribological views are carried out.

1 Hydropuls- und statische Torsionsprüfstände

Zur Bestimmung des Torsionsschwingfestigkeitsverhaltens von Maschinenelementen wird am IMW ein servohydraulischer Torsionsschwingprüfstand genutzt, **Bild 1**. Ursprünglich für Dauerfestigkeitsuntersuchungen an Zahnwellen-Verbindungen konstruiert, wurden auf diesem Prüfstand zwischenzeitlich auch verschiedene andere Bauteile erfolgreich dynamisch geprüft, z.B. Drehmomentmeßwellen und gebaute Nockenwellen.



Bild 1: Torsionsschwingprüfstand

Das Drehmoment wird durch eine servohydraulische Stelleinheit (Hydroschwinger) erzeugt. Durch Vorgabe eines elektrischen Stellsignals (Sollsignal) an zwei gegenseitig geschaltete Servoventile wird die durch eine externe Hydraulikpumpe erzeugte hydraulische Energie über den Ventilblock in zwei Druckkammern innerhalb des Schwingers geleitet. Der Druck wirkt auf zwei auf der Antriebswelle befestigte Flügel, die infolge

Druck und Ölvolumenstrom gegenüber dem Schwingergehäuse in Bewegung gesetzt werden. Der Prüfstand kann ein maximales Torsionsmoment von 2000 Nm aufbringen, die Erzeugung einer überlagerten Biegebelastung ist nicht möglich. Um die Versagensursachen „Verschleiß“ und „Bruch“ wirksam voneinander trennen zu können, verfügt der Prüfstand zur Vermeidung von Biegung, Querkraft und Fluchtungsfehlern über eingebaute Membrankupplungspaare der Fa. BHS-Cincinnati /1/. Die doppelt angeordneten Membrankupplungen sind extrem torsionsteif und biegeweich, wodurch die infolge Fertigungsabweichungen und die selbst bei hoher Ausrichtungspräzision der Prüfstandsteile und der Prüflinge entstehenden Fluchtungsfehler wirksam vermieden werden können, **Bild 2**.

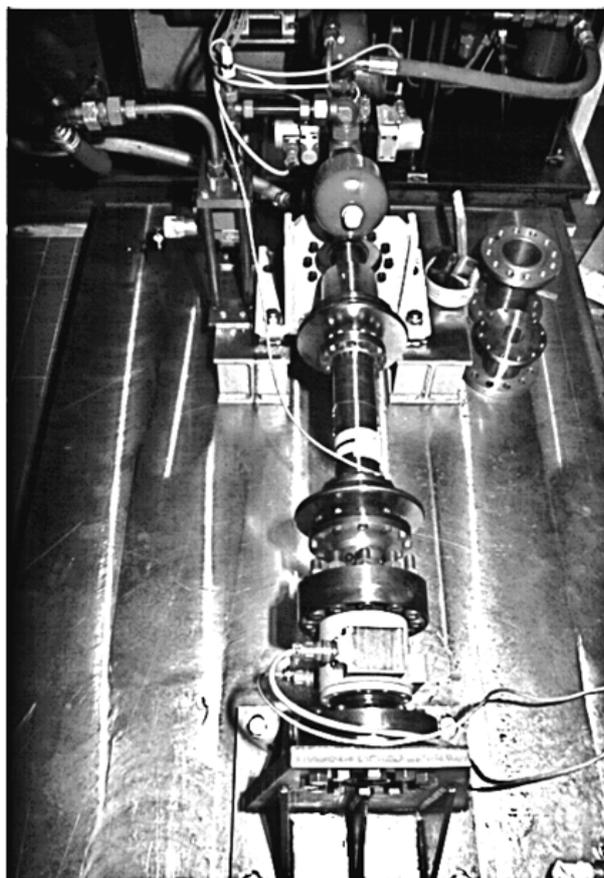


Bild 2: Hydroschwinger mit Membrankupplungen im Antriebsstrang

Die Nabenhalterung besitzt einen Anschluß zur Ölschmierung und Kühlung der zu testenden Zahnwellen-Verbindungen. Durch diese beiden Maßnahmen konnte an den geprüften Zahnwellen-

Verbindungen kein Verschleiß festgestellt werden, alle Verbindungen versagten infolge Dauerbruch. Die Belastungsaufgabe wird über einen externen Frequenzgenerator vorgenommen, die Überwachung des Verdrehbereiches erfolgt über einen eingebauten Winkelaufnehmer. Wird der zulässige Verdrehbereich überschritten, schaltet die angeschlossene SPS den Prüfbetrieb ab. Die Meßwertfassung (Sollsignal, Drehmoment, Verdrehwinkel) geschieht durch einen PC.

Neben Lebensdaueruntersuchungen lautet oftmals die gestellte Prüfaufgabe die Ermittlung des maximal übertragbaren statischen Torsionsmomentes oder die Bestimmung des Verdrehwinkels bei einer vorgegebenen Belastung. Für derartige Untersuchungen wird der in **Bild 3** dargestellte Verspannkasten genutzt.

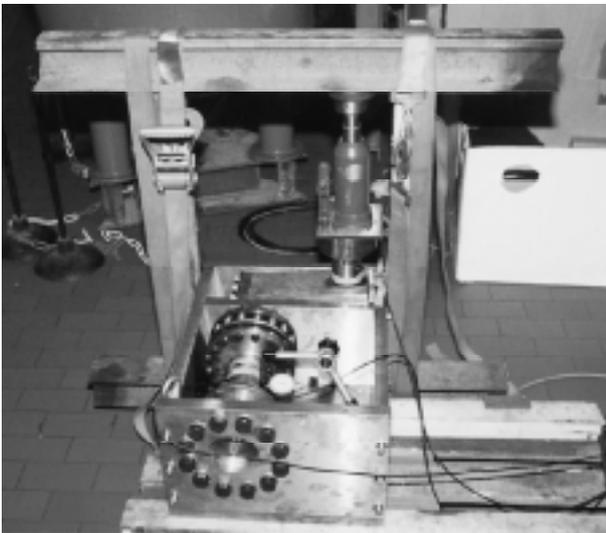


Bild 3: Prüfstand für statische Torsionsuntersuchungen (Verspannkasten)

Die Lastaufgabe auf den Hebel mit angeschlossener Kraftmeßdose kann wahlweise über eine zu verspannende Rahmenkonstruktion oder eine Zugspindel erfolgen. Letztere findet dann ihre Anwendung, wenn die zu untersuchenden Bauteile sehr torsionssteif sind, so daß die Auswertung der lastabhängigen Verdrehwinkel auf der institutseigenen Koordinatenmeßmaschine erfolgen muß. Aufgrund der massiven Kastenbauweise ist der Einfluß der Verspannkastensteifigkeit auf das Meßergebnis äußerst gering. Im Rahmen eines von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Forschungsvorhabens wurde mit diesem Prüfstand das Bruchmoment und die Verdrehwinkelsteifigkeit der o.g. Doppel-Membrankupplungen ermittelt. Die aufzubringenden Torsionsmomente betragen dabei mehr als 15000 Nm.

Für Prüfaufgaben, bei denen vordergründig die Bestimmung des maximal übertragbaren Torsionsmomentes im Mittelpunkt steht, genügt der Einsatz einer handelsüblichen Meßuhr zur Registrierung des Beginns der teilplastischen Bauteilbeanspruchung bzw. des Bruchs oder Durchrutschens der Verbindung bzw. des Bauteils. **Bild 4** zeigt die Prüfanordnung einer im Rahmen einer Industriekooperation untersuchten Längsstift-Verbindung /2/. Dabei erwiesen sich die verwendeten Längsstifte trotz ihrer geringen Größe im Vergleich zum Wellendurchmesser ($d_s/d_w=0,125$) als äußerst tragfähig, der Ausfall der Verbindung trat durch Bruch der Nabe ein.

Trotz der kompakten Bauweise des Verspannkastens können auch größere Bauteile eingehend untersucht werden, die für die Aufnahme der jeweiligen Prüfobjekte notwendigen Anschlußflansche werden dabei entsprechend gefertigt.

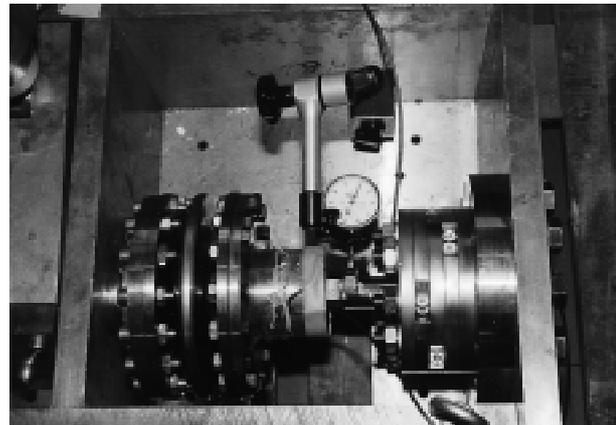


Bild 4: Detailansicht des Verspannkastens mit eingesetzter Meßuhr zur Bestimmung der Deformation

2 Verspannungsprüfstände

Neben Untersuchungen mit reiner Torsionsbelastung ist die experimentelle Erprobung von Maschinenteilen unter kombinierten Belastungen aus Drehmoment, Biegemoment, Querkraft und Axialkraft auf zwei Verspannprüfständen und einem Exzenterprüfstand möglich. Die Prüfstände decken den gesamten Leistungsbereich bis maximal 315 kW umlaufende Leistung ab. Die Prüfstandssteuerung und Meßwertfassung erfolgt mittels speicherprogrammierbarer Steuerungen (SPS) und übergeordneten Meßwertrechnern. Ein typischer Anwendungsfall ist die experimentelle Ermittlung des Verschleißverhaltens von Zahn- und Keilwellen-Verbindungen, das einen weiteren Forschungs- und Arbeitsschwerpunkt am IMW darstellt. In meh-

renen Projekten, die von der Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. (FVA) gefördert wurden, sind umfangreiche Untersuchungen zum Einfluß von Werkstoff, Verzahnungsqualität, Schmierungsverhältnissen, Axialbewegungen und Zentriereigenschaften auf das Verschleißverhalten dieser formschlüssigen Welle-Nabe-Verbindungen durchgeführt worden. Charakteristisch war bei diesen Untersuchungen stets die Belastungskombination aus Drehmoment und Querkraft, die auf diese Steckverzahnung einwirkte. Realisiert wurde diese Belastungsart auf zwei verschiedene Möglichkeiten, die zu folgenden zwei Prüfstandskonzepten führten.

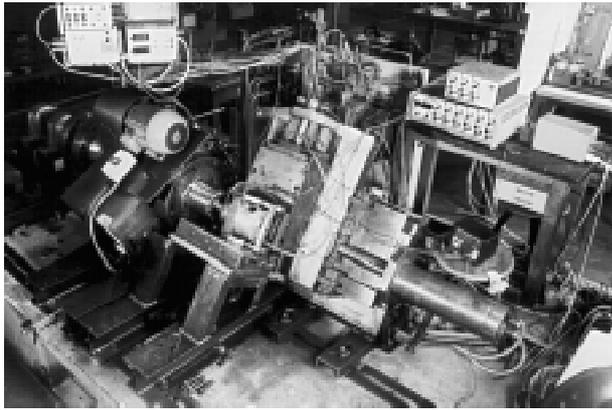


Bild 5: Exzenterprüfstand

Als erstes wurde das Exzenterkonzept in einem entsprechenden Prüfstand (**Bild 5**) realisiert. Dieser Prüfstand erreicht eine Umdrehungszahl von bis zu 760 U/min bei einer Drehmomentbelastung von bis zu 7500 Nm. Das Drehmoment wird über einen Hebelarm von austauschbaren Krafterelementen erzeugt. Für die Erzeugung statischer und quasistatischer Drehmomente werden geregelte Spindelhubgetriebe als Krafterelemente eingesetzt. Sie sind ebenso geeignet zur Mittellastaufbringung. Über Kurbeltriebe werden die dynamischen Drehmomentbelastungsanteile realisiert. Durch diesen modularen Aufbau der Krafterelemente können sämtliche Drehmomentbelastungen im Bereich von ± 7500 Nm statisch, schwellend oder wechselnd aufgebracht werden. Die unter Betriebsbedingungen einwirkende Querkraft wird über eine exzentrische Auslenkung des Antriebsstranges erreicht, die Querkraft bewegt sich relativ gesehen um die Achse des Prüfteils. Üblicherweise ist die Querkraft ortsfest und das Prüfteil rotiert darunter. Der wesentliche Vorteil dieser Umkehrung der Bewegungspartner ist die erheblich vereinfachte Anbringung der Meßsensorik am Prüfteil, da dieses nicht rotiert, sondern nur begrenzte translatorische Bewegungen in den drei Raumachsen ausführt.

Neben der mechanischen Belastungsaufbringung ist auch die Simulation erhöhter Umgebungstemperatur bis ca. 120°C im Prüflingsbereich realisiert worden. Weitere Umweltsimulationen, wie z.B. Feuchte-Wärme oder Salznebel, sind durch den "stehenden" Prüfling, der einfach abzudichten ist, leicht realisierbar.

Das zweite Prüfstandskonzept beruht auf einer mechanisch/hydraulischen Torsionsverspannung eines geschlossenen Antriebsstranges. Diese Prüfstandskonzeption ist auch als Verspannprüfstand bekannt. Das Institut für Maschinenwesen besitzt zwei solcher Verspannprüfstände, die sich in ihren Leistungsdaten unterscheiden (**Bilder 6 und 7**).

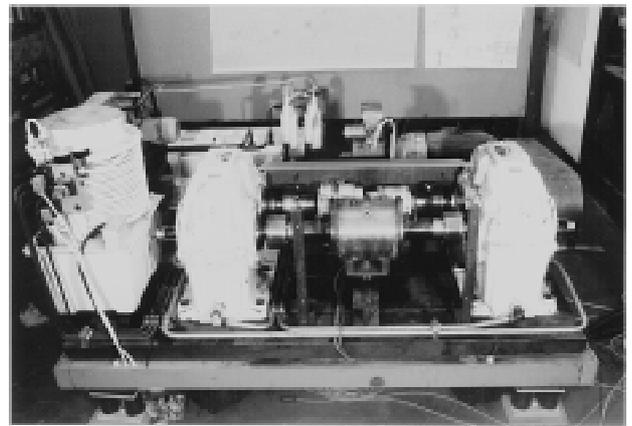


Bild 6: Verspannprüfstand I (210 kW)

Der erste ist in **Bild 6** dargestellt, er hat eine umlaufende Leistung von bis zu 210 kW bei einer Drehzahl im Prüfwellenstrang von 2000 U/min und einem Drehmoment von 1000 Nm. Der Prüfwellenstrang ist der vordere Wellenstrang in **Bild 6**. In dem dahinterliegenden Wellenstrang befindet sich der hydraulische Verspannmotor mit der dazugehörigen hydraulischen Drehdurchführung der Firma GLYCO Antriebstechnik. Für den Schutz der Verspanneinrichtung vor Biegebelastungen sind zusätzlich zwei Membrankupplungen /1/ im hinteren Wellenstrang integriert. Das Hydraulikaggregat für die Verspanneinrichtung ist zur Erzeugung statischer und quasistatischer Drehmomente ausgelegt. Neben der Drehmomentbelastung wird auf diesem Prüfstand eine Radialverschiebung oder Querkraft über ein Spindelhubgetriebe mit angeschlossener Hebelkonstruktion auf den Prüfwellenstrang geregelt aufgebracht. Die mittig im Vordergrund erkennbare Trommel dient zur Simulation unterschiedlicher Schmierzustände an Welle-Nabe-Verbindungen.

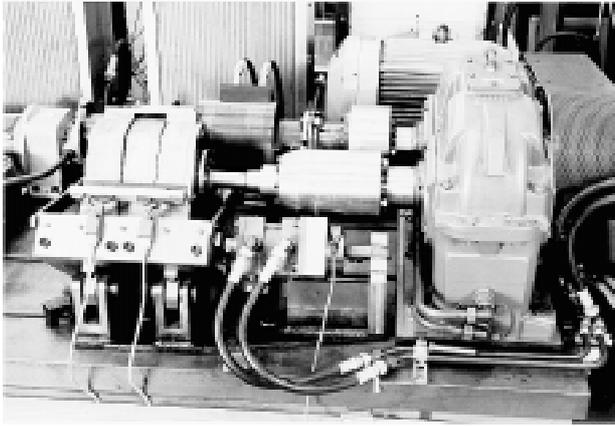


Bild 7: Verspannprüfstand II (315 kW)

Der zweite Verspannprüfstand (**Bild 7**) besitzt eine leistungsfähigere Verspanneinheit. Die maximale Umlaufende Leistung beträgt 315 kW bei einer Drehzahl im Prüfwellenstrang von 2000 U/min und einem Drehmoment von 1500 Nm. Die Verspanneinheit erlaubt in Verbindung mit der vergrößerten Hydraulikversorgung und einer Servo-Ansteuerung neben der erhöhten Belastung auch den Betrieb mit schwelenden Drehmomenten. Wechselmomente sind wegen der eingesetzten Zahnradgetriebe nicht möglich. Die Querkraftaufbringung und Radialverschiebung erfolgt bei diesem Prüfstand hydraulisch. In **Bild 7** ist etwas unterhalb der Bildmitte ein weiterer Hydraulikzylinder zu erkennen, der für die Axialverschiebung im Prüfwellenstrang eingesetzt wird. Auf diese Weise können die bei Kardanwellen und Schieberädern funktionsbedingten Axialverschiebungen innerhalb der Welle-Nabe-Verbindung simuliert werden.

Mit Hilfe dieser Prüfstandsausstattung ist das IMW in der Lage, vielfältige Bauteiluntersuchungen an allen üblichen Bauteilen der Antriebstechnik durchzuführen. In Verbindung mit dem ebenfalls vorhandenen Berechnungs-Knowhow, daß in diesem Heft in weiteren Artikeln dargestellt wird, ist hier eine umfassende Lösungsplattform für antriebstechnische Probleme vorhanden.

3 Prüfstand zur Messung des Querelastizitätsmodul von Drahtseilen

Durch die Entwicklungen neuer Verseilungsarten (verdichtete Litzen; **Bild 8**) hat sich das Steifigkeitsverhalten von Drahtseilen entscheidend verändert. Insbesondere im Hinblick auf die Belastungen von Trommelkörpern, welche mit Drahtseilen dieser Bauart bewickelt werden, erhöhen sich die Beanspruchungen bei gleicher Stranglast.

In den einschlägigen Normen (DIN 1073; DIN 51201; VDI 2358) werden jedoch lediglich Meßvorschriften für die Ermittlung der Längselastizitätsmoduln von Drahtseilen gegeben. In einer Reihe von Dimensionierungen und Bauteilbeanspruchungsanalysen wurde jedoch auf der Basis von Dietz, Bechtloft /3,5/ und durch weiterführende Arbeiten am IMW der unmittelbare Zusammenhang zwischen Querelastizitätsmodul E_{SQ} und den auftretenden Trommelbelastungen nachgewiesen.

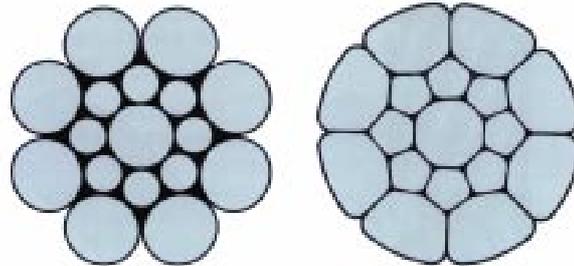


Bild 8: Standardverseilung / verdichtete Litzen

Mit dem Bau eines Prüfstandes wurde das Ziel verfolgt, zuverlässige Kennwerte der Elastizität der Drahtseile in Querrichtung zu ermitteln. Die so ermittelten Kennwerte dienen unter Verwendung einer geeigneten Dimensionierungsmethode zur sicheren Auslegung von Trommelkörpern.

3.1 Grundlagen

Durch eine Vielzahl von Messungen an realen Bauteilen sowie der Dimensionierung von Trommelkörpern mit der Methode der finiten Elemente konnte ein Zusammenhang zwischen der Quersteifigkeit der verwendeten Drahtseile und der Beanspruchungen im Trommelkörper festgestellt werden.

Es wurde festgestellt, daß bei konstanten Seillasten die Beanspruchung im Trommelkörper bei steigendem Querelastizitätsmodul zunehmen. Bestätigt wurden diese Resultate durch die in /4/ und /6/ angeführten Messungen am realen Trommelkörper. Hierbei wurden drei identische Trommelkörper (F_{smax} : 30 kN; 23 Windungen, 5 Lagen) mit identischen Seillasten je Versuch unter Verwendung von Drahtseilen unterschiedlicher Machart im Versuch getestet. Zum Einsatz kamen hier:

1. Drahtseil Bauart Warrington,
2. Drehungsarmes Hubseil,
3. hochfestes Drahtseil (verdichtete Litzen).

In den Versuchen wurden unterschiedliche Trommellasten gemessen. Da lediglich die Seilmachart der variable Parameter war, konnte die Varianz in den Trommellasten hierauf zurückgeführt werden.

Durch die Gegenüberstellung der Resultate analytischer Berechnungen nach /3/, Berechnungen mit der Methode der finiten Elemente und den Ergebnissen der Messungen am realen Bauteil konnte nachgewiesen werden, daß im wesentlichen die Varianz der Seilquersteifigkeiten für die unterschiedlichen Trommelbelastungen ausschlaggebend ist. Hieraus wurde die Forderung abgeleitet, ein geeignetes Meßverfahren zur Ermittlung dieses Kennwertes zu entwickeln.

3.2 Konstruktion des Prüfstandes

Im Folgenden wird die im Institut für Maschinenwesen durchgeführte Entwicklung eines Prüfstandes zur Messung der Querelastizitätsmoduli von Drahtseilen erläutert.

Wie bereits in /3/ von Dietz festgestellt, ist die Quersteifigkeit eines Drahtseiles nicht nur von der Machart, sondern auch von der anliegenden Vorspannung abhängig. Das heißt, eine Varianz der Stranglast hat eine Veränderung des Quersteifigkeitsverhaltens zu Folge. Für die Entwicklung eines Prüfstandes bedeutet dies, daß die Aufbringung einer variablen Vorspannung in Längsrichtung sowie eine Kraftaufbringung in Querrichtung des Drahtseiles realisiert werden muß.

Zur Messung des charakteristischen Kennwertes ist zu bemerken, daß nicht die Durchmesserverringern unter Längsvorspannung den Kennwert repräsentiert, sondern das Elastizitätsverhalten unter zusätzlich wirkender Querkraft den Zielparameter darstellt.



Bild 9: Gesamtansicht Prüfstand

Zu diesem Zweck wurde der Prüfstand vergleichbar einer Zugprüfmaschine aufgebaut. In **Bild 9** ist der betriebsbereite Prüfstand in der Gesamtansicht dargestellt.

Die Stranglast wird über acht Hydraulikzylinder mit einem Betriebsdruck von max. 200 bar erzeugt. Die gewählte Anordnung erlaubt die Aufnahme von bis zu sechs Drahtseilen mit einem Durchmesser von 7 bis 32 mm. Die Seilbefestigungspunkte sind einstellbar ausgeführt. Es wird hierdurch ermöglicht, daß Längenunterschiede von bis zu 70 mm zwischen den Seilen einer Prüfgruppe ausgeglichen werden können.

Die Vorspannung in den Drahtseilen ist stufenlos über ein rechnergesteuertes Proportionalventil bis zur Maximalkraft von $F_{\text{max}} = 1.200 \text{ kN}$ regelbar. Hierbei wird die jeweilige Einzelstranglast als Regelgröße verwendet.

Die Messung der Querelastizitätsmoduli erfolgt bei statischer Stranglast. Die Meßeinrichtung hierfür ist in **Bild 10** dargestellt. Sie besteht im wesentlichen aus einem Hochdruckhydraulikzylinder, welcher über variable Stempelgeometrien die Querkraft in die im Prüfstand befindlichen Drahtseile einleitet. Zur Messung werden die aufgebrachten Kräfte in Querrichtung als auch die Stauchung der Drahtseile unter der eingestellten Last ermittelt. Durch ein horizontales Verfahren des Querprüfgerätes ist es möglich, an einer Charge eingespannter Drahtseile mehrere Messungen innerhalb des Meßraumes (1,50 m) durchzuführen.

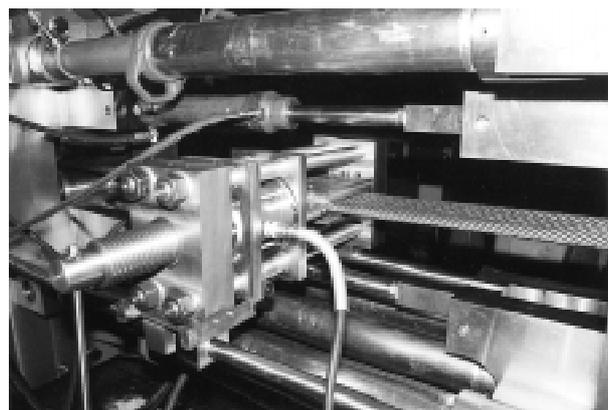


Bild 10: Querprüfeinrichtung

3.3 Messprogramm

Derzeit befinden sich 10 Drahtseile unterschiedlichster Machart mit einem Durchmesser von 14 mm in der Prüfung. In Anlehnung an /3/ wird ein Verhältnis von $\sigma_Q/\sigma_L < 0,3$ mit σ_L von 0 bis 50 % der Nennfe-

stigkeit gefahren. Die Resultate der Messungen werden 1999 präsentiert.

Besondere Beachtung findet auch die Anordnung der Drahtseile im Prüfstand. In der gewählten Ausführung ist es möglich, sowohl parallel liegende Seile als auch pyramidenförmig geschichtete Drahtseile im Hinblick auf ihr Querelastizitätsverhalten zu untersuchen. Ziel der variablen Anordnung der Drahtseilpackung ist die Simulation eines Abschnitts der Bewicklung auf einem Trommelkörper. Die Varianz der Anordnung der Drahtseile wird den Schwerpunkt der zweiten Versuchsreihe darstellen.

3.4 Ausblick und Zusammenfassung

Der am Institut für Maschinenwesen entwickelte Prüfstand zur Messung der Querelastizitätsmoduli von Drahtseilen ist 1998 in Betrieb genommen worden. Mit dem Prüfstand ist es möglich, die Querelastizitätsmoduln von Drahtseilen unter variabler Längsspannung zu messen. Es können Drahtseile in einem Durchmesserbereich von 7 bis 32 mm beliebiger Machart geprüft werden.

Ziel der z.Zt. noch laufenden Untersuchungen ist die Erstellung eines geeigneten, standardisierten Meßverfahrens zur Ermittlung der Querelastizitätsmoduli von Drahtseilen. Die Weiterverarbeitungen der so gewonnenen Ergebnisse wird im Rahmen des Forschungsvorhabens S 407 der Stiftung Industrieforschung zu einem Berechnungsansatz zur Dimensionierung von Trommelkörpern unter Einarbeitung der Einflüsse der Seilparameter zum Ziel haben.

4 Literatur

- /1/ Birkholz, H.; Garzke, M.; Mupende, I.: TWINTORS®-Membrankupplung für Turbomaschinen, Institutsmitteilung Nr. 23, Institut für Maschinenwesen, Clausthal, 1998
- /2/ Burgtorf, U.; Garzke, M.; Schäfer, G.: Spielbehaftete Längsstift-Verbindungen – eine unterschätzte Welle-Nabe-Verbindung?, Institutsmitteilung Nr. 22, Institut für Maschinenwesen, Clausthal 1997
- /3/ Dietz, P.: Ein Verfahren zur Berechnung ein- und mehrlagig bewickelter Seiltrommeln. Dissertation, TH Darmstadt, 1971
- /4/ Henschel, J.: Experimentelle Beanspruchungsanalysen – Vorstellung eines Konzepts und Darstellung der Umsetzung an drei

Beispielen, Institutsmitteilung Nr. 20, Institut für Maschinenwesen, Clausthal 1995

- /5/ Bechtloft, G.: Die Beanspruchung des Drahtseilquerschnittes unter Längslast und ebener Querpressung (II), Draht-Welt 55 (1969) 3, S. 147-158
- /6/ Henschel, J.: Teilbericht zum Forschungsvorhaben „Gestaltung und Dimensionierung von Windentrommeln“, IMW Clausthal 1998