

## Prüfstandskonzept zur mechanischen Bauteilprüfung

Birkholz, H.; Garzke, M.

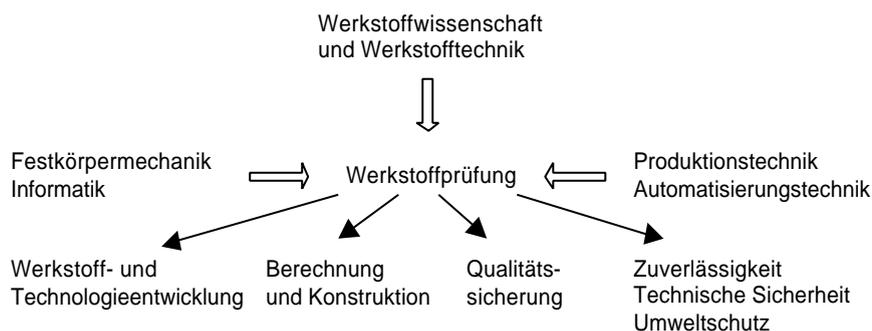
*Die Neuentwicklung eines Prüfstandes zur kombinierten Torsions- und Biegemomentbelastung erfordert einige grundsätzliche Überlegungen zur Krafteinleitung in das Prüfteil sowie zum Antrieb des Prüfstandes.*

*A test-rig-design for combined torque and bending moment loads requires some basic thoughts on drive and force application.*

### 1 Ziele und Aufgaben

Das Prüfen von Werkstoffen sowie daraus gefertigter Produkte hat große Bedeutung für die Eigenschaftsoptimierung, den rationellen Werkstoffeinsatz, das Qualitätsmanagement und die technische Sicherheit. Da ein Werkstoff während des gesamten Lebenszyklus von der Rohstoffgewinnung bis zur Entsorgung in enger Wechselwirkung mit der Umwelt steht, sind auch das Bewerten der Umweltverträglichkeit und der Recycling-Fähigkeit wichtige Anliegen /3/.

Die Werkstoff- und Bauteilprüfung ist Bestandteil von Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnik: ihre Verbindung zu anderen Gebieten der Ingenieurwissenschaft zeigt **Bild 1**.



**Bild 1:** Werkstoffprüfung

Fast alle Verfahren der Werkstoffprüfung kommen in allen Phasen der folgenden Kette

Werkstoff → Halbzeug → Bauteil (-element)  
→ Baugruppe → System

zur Anwendung. Sie werden häufig miteinander kombiniert, um eine umfassende Aussage über die Eigenschaften bzw. das Gebrauchsverhalten der

Werkstoffe unter Einsatzbedingungen zu erhalten. Dabei lassen sich vier Aufgabenbereiche unterscheiden:

- Die Werkstoffdiagnostik,
- die Eigenschaftscharakterisierung,
- die Qualitätsprüfung und
- die Zuverlässigkeits- und Schadensanalyse.

Am Institut für Maschinenwesen existieren für diese Aufgaben u.a. drei Torsionsschwingprüfstände, die allerdings in der Prüffrequenz auf maximal 8,5 Hz limitiert sind /7, 8/. Bei einer geforderten Mindestlastspielzahl von  $10^7$  Lastwechseln ergeben sich Prüfzeiten von ca. 2 Wochen. Es bestand daher die Aufgabe, einen neuen Prüfstand zu entwerfen, der kürzeren Prüfzyklen gerecht wird. Gleichzeitig soll mit allen Prüfständen die Abarbeitung der umfangreichen Testaufgaben sicherstellt werden.

### 2 Prüfeinrichtungen

Zu den Prüfeinrichtungen gehören Werkstoffprüfeinrichtungen und Prüfanlagen. Werkstoffprüfmaschinen sind nach DIN 51220 Maschinen und Geräte, mit denen durch mechanische Beanspruchung Eigenschaftswerte an Proben, Formelementen, Bauteilen und Bauteilgruppen ermittelt werden.

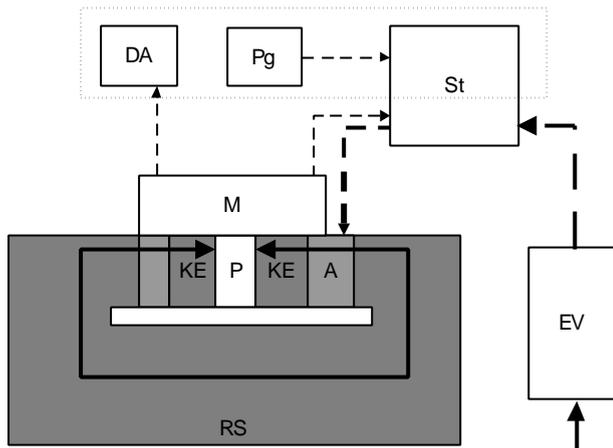
Nicht unter diese Definition fallen demnach z.B. Maschinen und Geräte zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, zur Verschleißprüfung, zur Korrosionsprüfung, und zur abschließlichen Funktions-

prüfung an Bauteilen und Bauteilgruppen [DIN 51220].

Nach /4/ liegt der Unterschied zwischen Werkstoffprüfmaschinen und Prüfanlagen darin, daß Prüfmaschinen Prüfsysteme mit fester räumlicher Anordnung der kraftführenden Teile sind und Prüfanlagen Prüfsysteme mit von Versuch zu Versuch veränderlicher räumlicher Anordnung der kraftführenden Teile sind.

## 2.1 Aufbau einer Prüfeinrichtung

Ein Prüfsystem setzt sich nach /4/ und /5/ aus folgenden unerläßlichen Teilsystemen zusammen: mindestens zwei Krafteinleitungen, einem Antrieb, einer Steuerung, einer Reaktionsstruktur, einer Energieversorgung, Messgeräte, einer Datenausgabe und einer Programmierung, siehe **Bild 2**. Andere Teilsysteme, die nur temporär verwendet werden, und deren Aufgaben und technische Eigenschaften verschiedenartig sein können, werden als Zusatzgeräte bezeichnet. /2/.



P= Probe; KE= Krafteinleitung; A= Antrieb; RS= Reaktionsstruktur; St= Steuerung; EV= Energieversorgung; Pg= Programmierung; M= Meßgeräte; DA= Datenausgabe  
Linien: dick= kraftführend / energieführend; dünn= informationsführend

**Bild 2:** Prinzipieller Aufbau einer Prüfeinrichtung /4/

Nachfolgend werden die oben genannten Begriffe (aus **Bild** ) erläutert. Die hier gewählte Reihenfolge hat ihre Logik, indem ausgehend von den mit der Probe im Kontakt stehenden zu den peripheren Teilsystemen vorgegangen wird /4/:

- Um die bei der mechanischen Verformung der Probe entstehenden Reaktionen zu überwinden, müssen die erforderlichen Kräfte und/oder Momente an mindestens zwei Stellen durch **Krafteinleitungen** an die Probe übertragen werden.
- Um die zur Verformung erforderliche Energie auf die Probe übertragen zu können, muß ein **Antrieb** mindestens eine Krafteinleitung gegenüber den anderen in Relativbewegung versetzen.
- Um eine kontrollierte Verformung der Probe zu ermöglichen, muss die Energiezufuhr zum Antrieb durch eine **Steuerung/Regelung** beeinflusst werden können.
- Um die bei der Prüfung entstehenden Reaktionen aufzunehmen, müssen sich alle nicht rein

dynamisch angetriebenen Krafteinleitungen – wo vorhanden, über deren Antriebe – auf eine gemeinsame **Reaktionsstruktur** abstützen.

- Um der Probe die zu ihrer Verformung erforderliche Energie zuführen zu können, muß der Antrieb von einer **Energieversorgung** gespeist werden.
- Um die Tauglichkeit der von der Probe repräsentierten Objekte für den Gebrauch zu ermitteln und um der Steuerung die nötige Information über den Ist-Zustand der Probe zu liefern, müssen **Messgeräte** die relevanten Versuchsparameter erfassen.
- Um die Tauglichkeit der von der Probe repräsentierten Objekte für den Gebrauch zu ermitteln, müssen die von den Messgeräten erfassten Daten **gespeichert** werden.
- Um der Steuerung den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Zustand der Probe zu ermöglichen, muß eine **SPS** die nötigen Soll-Daten liefern.

## 2.2 Krafteinleitung

Die Krafteinleitung ist das Teilsystem, das unmittelbar auf die Probe einwirkt, und jeder Fehler, der bei seiner Konstruktion oder Anwendung begangen wird, trägt potentiell die Möglichkeit eines falschen Resultats der Prüfung in sich. Das tückische an solchen Fehlern ist die Tatsache, daß sie immer wieder neu begangen werden, selbst wenn das Wissen um ihre Möglichkeit bekannt ist. Dieser Sachverhalt kommt nicht von ungefähr, weil das Entstehen der erwähnten Fehler oft unbemerkt bleibt, sofern nicht offensichtliche funktionelle Mängel auftreten oder durch geeignete Mittel das Bestehen von Unstimmigkeiten aufgedeckt wird. Diese Feststellung behält ihre volle Gültigkeit auch dann, wenn die verwendeten Geräte regelmäßig kalibriert und für gut befunden werden /4/. Vielfach handelt es sich um Mängel, die unter den genormten Bedingungen der Kalibrierung nicht in Erscheinung treten, die praktische Prüfung – beispielsweise an einem Bauteil – aber nachhaltig beeinflussen /2/.

Die Krafteinleitung bei dem zu entwickelnden Prüfstand in die Welle-Nabe-Verbindung kann auf folgende unterschiedliche Arten geschehen:

- Polygonprofil,
- Zahnprofil,
- Keilprofil,
- Kerbzahnprofil

Das Polygonprofil ist aufgrund der geringen Flächenpressung zur Übertragung kleiner bis mittlerer Biegebelastanteile gut geeignet, wobei jedoch unbedingt auf extrem steife Nabengestaltung mit großem Außendurchmesser und mittlerer Verbindungslänge geachtet werden muß, um den auftretenden Reibverschleiß, der besonders stark durch die elastischen Nebenaufweitungen beeinflusst wird, in Grenzen zu halten /1/.

Für dynamische Torsionslasten gilt es, eine spielfreie Polygonverbindung zu verwenden, da eine spielbehaftete Verbindung zu extremen Gleitbewegungen führen würde, und damit ein hoher Reibverschleiß die Folge wäre.

Vorteil eines Polygonprofils (z.B. eines P3G-Profils) ist, daß Innen- und Außenkontur durch Schleifen herzustellen sind, und dadurch eine sehr genaue Fertigung gehärteter Oberflächen möglich ist.

Die Zahn-, Keil- und Kerbzahnprofile zeigen bezüglich ihres Verhaltens bei unterschiedlicher Nabengeometrie prinzipiell ähnliche Eigenschaften, so daß die wichtigsten Gestaltungshinweise für diese Profile gleichermaßen gelten.

### 2.3 Auswahl der Krafteinleitung

Die hohe Belastung des Prüflings (Welle-Nabe-Verbindung) durch das dynamische Drehmoment führt zu einer sehr großen Flächenpressung an den Krafteinleitungsstellen des Prüflings (bei den o.a. Verbindungen). Allein dieser Umstand verlangt eine spielfreie Verbindung. Kleinste Passungsfehler werden durch die hohe Belastung der Verbindung zu stark fortschreitendem Verschleiß führen, und somit die eingestellte Amplitude der dynamischen Torsion verändern. Das führt zu einem abklingenden Drehmoment und somit zu einer Verfälschung des Versuchsergebnisses, ein Verhalten, welches grundsätzlich bei weggesteuerter Belastung auftritt. Durch das Aufkleben von DMS, die Wahl einer geeigneten Steuerung und damit der Realisierung einer momentgesteuerten Lastaufgabe kann dem Abfallen der Belastung theoretisch entgegengewirkt werden. Die Auswahl eines der o.g. Krafteinleitungssysteme führt also zu sehr geringen Fertigungstoleranzen, vor allem auch bei den Prüflingen, was eine deutliche Verteuerung der einzelnen Versuchsreihen zur Folge hat.

Eine reibschlüssige Verbindung hat z.B. bei der Verwendung eines Spannfutters den Vorteil, als dass Proben mit verschiedenen großen Durchmessern in ein- und derselben Spannvorrichtung einge-

spannt werden können. Extreme Durchmesser-schwankungen können durch ein adaptives Spannsystem bewältigt werden, welches als Zulieferteil bezogen werden kann. Von Nachteil ist u. U. eine zu geringe Flächenpressung, wodurch die Drehmomentübertragbarkeit beschränkt werden kann.

Ringfederspannelemente ermöglichen höhere Flächenpressungen und sind damit zur Übertragung größerer Kräfte an Welle-Nabe-Verbindungen geeigneter. Durchmesserunterschiede der Prüflinge können durch geteilte Hülsen ausgeglichen werden. Die Kosten und der Fertigungsaufwand dieser Hülsen bleiben in einem vertretbaren Rahmen, wodurch die Wahl auf ein Ringfederspannelement fällt.

### 3 Antrieb und Steuerung

Der Antrieb und die dazugehörige Steuerung bestimmen weitgehend die Leistungsfähigkeit eines Prüfsystems. Neben der Charakterisierung des Antriebs nach der Geometrie der Bewegung sind auch folgende Kriterien bedeutsam /4/:

- **Richtung:** Der zu verwendende Antrieb muß aufgrund der dynamischen Torsion doppelwirkend sein, um die Entfaltung der Prüfkraft / des Prüfmoments in zwei Richtungen zu ermöglichen
- **Lastspielzahl:** Der Antrieb muß für wiederholte Belastungen ausgelegt sein, also um Ermüdungsversuche durchführen zu können
- **Höchstbelastung**
- **Arbeitshub**
- **Programmierbarkeit:** Gemeint ist die Eignung zur automatischen Durchführung verschiedenartigster Versuchsabläufe, die innerhalb dieser Arbeit keine Berücksichtigung finden soll.

Nach /4/ muß ein Antrieb von Werkstoffprüfmaschinen wenigstens eine der folgenden Bedingungen erfüllen, um seine Tätigkeit effizient erfüllen zu können. Die zutreffenden Bedingungen sind mit einem „+“ gekennzeichnet.

- Die Belastung der Probe muß von Null aus ansteigend bis zu einem Höchstwert mit möglichst geringer Stoßwirkung und stufenlos aufgebracht werden können (z.B. Zug-, Druck-, Biege-, Verdreh-Prüfmaschinen).(+)
  - Die auf die Probe aufzubringende Kraft muß in bestimmten Stufen wählbar sein und mit möglichst geringer Stoßwirkung aufgebracht wer-

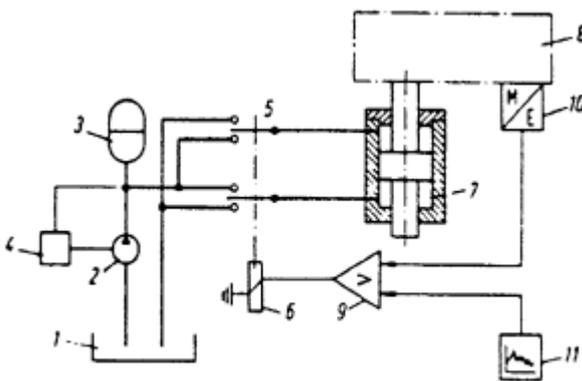
den können (z.B. Härteprüfgeräte, Zeitstandprüfmaschinen).(+)

- Die schwingende Belastung der Probe muß zwischen beliebigen Grenzwerten gesteuert werden können (z.B. Dauerschwingprüfmaschinen).(+)
- Die wiederholten Belastungen der Probe müssen in ihrem zeitlichen Ablauf gesteuert werden können (z.B. Prüfmaschinen für Schwingversuche).
- Die für die Belastung der Probe vorgesehene mechanische Arbeit muß einstellbar sein (z.B. Pendelschlagwerke, Fallwerke).

### 3.1 Antriebsarten

Die am häufigsten in Prüfsystemen zur Verwendung kommenden Antriebsarten werden hier kurz vorgestellt:

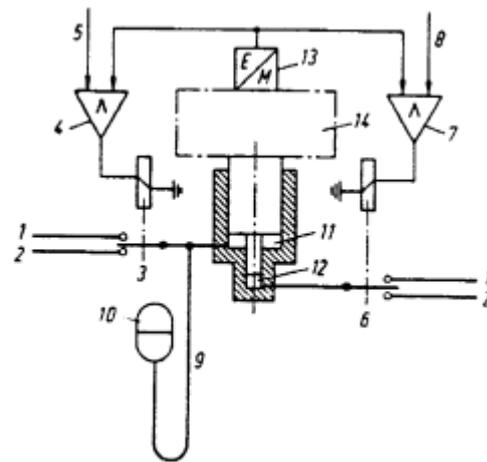
**Hydraulische Antriebe:** Als hydraulisch gilt ein Antrieb, dessen energietragendes Medium eine im wesentlichen inkompressible Flüssigkeit (meist Hydrauliköl) ist. Heute wird hauptsächlich zwischen servohydraulischen (vgl. **Bild 3**) und servohydraulischen Resonanzantrieben (vgl. **Bild 4**) unterschieden.



1=Reservoir; 2=Pumpe; 3=hydropneumatischer Druckspeicher; 4=Pumpenregelung; 5=Regelventil; 6=elektromagnetische Ansteuerung des Ventils; 7=Zylinder; 8=übriges Prüfsystem mit Probe; 9=Regelverstärker; 10=Istwert-Geber f. d. Regelgröße; 11=Sollwert-Geber f. d. Regelgröße

**Bild 3:** Prüfstand mit servohydraulischem Antrieb /4/

Der Servohydraulische Antrieb (oder auch Servohydraulik) ist ein Antriebskonzept, das über eine fast unbegrenzte Programmierbarkeit verfügt. Die Servohydraulik ist heute der flexibelste Antrieb für Prüfsysteme.



1=Anschluß an Druckspeicher; 2=Anschluß an Reservoir; 3,4,5=Ventil, Verstärker u. Sollwert-Eingang f. Regelung d. stat. Kraftanteils; 6,7,8=Ventil, Verstärker u. Sollwert-Eingang f. d. Erregung d. Resonanzschwingung; 9=Rohrleitung mit als schwingender Masse dienender Ölsäule; 10=Druckspeicher; 11=Zylinder; 12=Erreger-Zylinder; 13=Istwert-Geber f. d. Regelgröße; 14=übriges Prüfsystem mit Probe

**Bild 4:** Prüfstand mit servohydraulischem Resonanzantrieb /4/

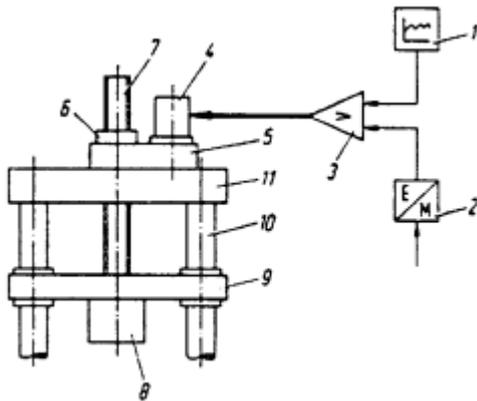
Der Servohydraulische Antrieb (oder auch Servohydraulik) ist ein Antriebskonzept, das über eine fast unbegrenzte Programmierbarkeit verfügt. Die Servohydraulik ist heute der flexibelste Antrieb für Prüfsysteme. Mit ihrer universellen Programmierbarkeit und ihrer Fähigkeit, prinzipiell vom Standversuch bis zu hochfrequenter Ermüdung fast jeden Versuchsablauf zu meistern, nimmt die Servohydraulik eine privilegierte Stellung ein. Es ist jedoch zu bemerken, daß der Energieverbrauch hierbei einen erheblichen Anteil der Versuchskosten verursacht. Dazu kommt, daß die aufgewendete Energie letztlich zur Erwärmung von Öl dient, dessen Kühlung u.U. beträchtliche Entsorgungskosten bedingt. Es wird zwischen einfachwirkender und doppelwirkender Servohydraulik unterschieden.

Der Resonanzantrieb wird unter dem Begriff „Servohydraulischer Resonanzantrieb“ als spezielle Antriebsart angesehen, obwohl er an ein und demselben Prüfsystem durch relativ einfache Umschaltoperationen im Wechsel mit normaler Servohydraulik angewendet werden kann. Das Grundprinzip der einfachwirkenden Variante des servohydraulischen Resonanzantriebs stellt Bild 4 dar /4/.

**Elektromechanische Antriebe:** Sie bestehen zur Hauptsache aus mechanischen Elementen, die aber durch einen nichtmechanischen (elektrischen) Primärtrieb in Bewegung gesetzt werden.

Das Prinzipschema eines mit Servosteuerung ausgerüsteten elektromechanischen Antriebs üblicher

Bauart zeigt **Bild 5**: Ein Regelverstärker verarbeitet die von einem Sollwert-Geber (Programmierung) und einem Istwert-Geber (Messung des zur Steuerung verwendeten Parameters) kommenden Signale und leitet das Resultat dem Antriebsmotor zu. Dieser bewegt über die erforderlichen Zwischenglieder (Getriebe, Spindel, Mutter) eine Krafteinleitung derart, daß der Istwert des betreffenden Parameters dem Sollwert folgt.



1=Sollwertgeber f. d. Regelgröße (Kraft, Weg, Verformung usw.); 2=Istwert-Geber f. d. Regelgröße; 3=Regelverstärker; 4=Servomotor; 5=Getriebe; 6=Mutter; 7=Spindel; 8=bewegte Krafteinleitung; 9=bewegte Traverse; 10=Säulen; 11=feste Traverse; 7,8,9=verschiebbare Elemente, aber nicht verdrehbar; 6=verdrehbar, jedoch nicht verschiebbar

**Bild 5:** Prüfstand mit elektromechanischem Antrieb /4/

Der Automationsgrad der elektromechanischen Antriebe ist durchaus offen: Es kann sich ebenso gut um die Beschränkung auf konstante Geschwindigkeit der Krafteinleitungsorgane wie um das Durchspielen hochfrequenter Funktionsabläufe handeln.

*Elektromagnetische Antriebe:* Als elektromagnetisch wird ein Antrieb bezeichnet, bei dem die von einem Elektromagneten auf einen eisernen Anker oder auf einen stromdurchflossenen Leiter wirkende Kraft ohne wesentliche Zwischenglieder zur Bewegung einer Krafteinleitung verwendet wird.

Man kann mit einem Elektromagneten bei genügend kleinem Luftspalt eine große Anziehungskraft auf einen in dessen Feld befindlichen Anker ausüben. Der in der Praxis zugängliche Einsatzbereich eines elektromagnetischen Antriebs ergibt sich zwingend aus diesem Umstand sowie aus der hohen Flexibilität einer elektrischen Ansteuerung: Einerseits besteht die Möglichkeit, in kurzer Zeit beträchtliche Kräfte auf- und wieder abzubauen; andererseits darf der Hub des Ankers ein gewisses Maß nicht überschreiten, da sonst durch den erweiterten Luftspalt eine dramatische Abnahme der

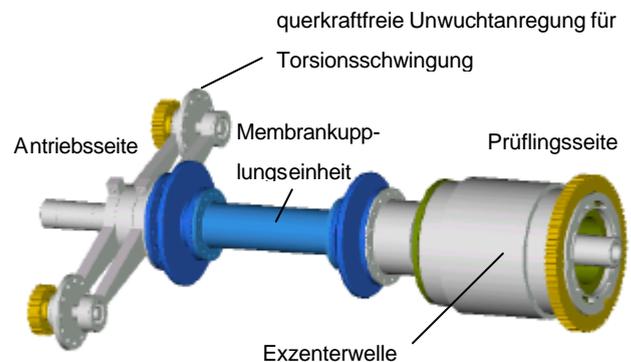
Antriebsleistung unvermeidlich wird. Damit ist der elektromagnetische Antrieb prädestiniert für die hochfrequente Ermüdungsprüfung mit kleinen Schwinghuben.

**3.2 Auswahl des Antriebs**

Die oben beschriebenen Vorzüge eines servohydraulischen Antriebs werden für das zu entwickelnde Prüfsystem nicht in vollem Umfang benötigt. Auch der sehr hohe Energiebedarf und das Problem der Kühlung weisen auf ein wirtschaftlich geeigneteres Antriebskonzept. Der elektromagnetische Antrieb ist zu unflexibel, was die Amplituden des dynamischen Drehmoments betrifft, und zu kompliziert für das Aufbauen eines umlaufenden Biegemoments. Daher fällt die Auswahl nicht nur aus Kostengründen auf ein elektromechanisches Antriebssystem. Es sind auch seine Flexibilität, sein geringerer Energiebedarf und nicht zuletzt sein verhältnismäßig einfacher Aufbau, die in diesem speziellen Fall für dieses System sprechen.

**4 Realisiertes Prüfstandskonzept**

Am IMW ist ein Prüfstandskonzept erarbeitet worden, welches die Prüfung von Bauteilen unter Torsions- und Biegemomentenbelastung bei hohen Prüffrequenzen ermöglicht /6/. Eine Prinzipskizze der Antriebseinheit zeigt **Bild 6**.

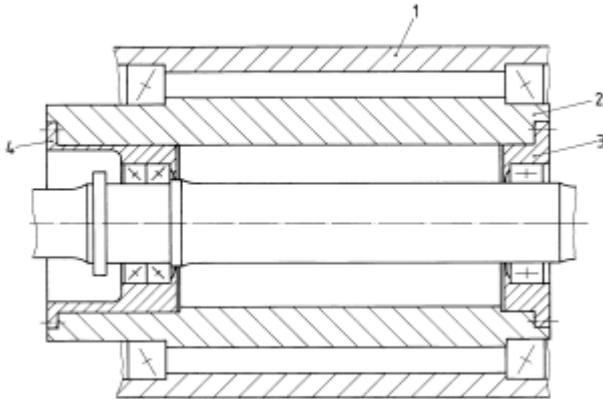


**Bild 6:** Prinzipskizze der Antriebseinheit

Die Realisierung der Torsionsschwingung erfolgt über eine elektromechanische Anregung derart, dass ein Elektromotor über eine biegsame Welle und einen Zahnriementrieb, zwei um 180° versetzte Unwuchtmassen in Bewegung setzt. Der Zahnriementrieb dient dabei der Synchronisierung der beiden Unwuchtmassen. Die Unwuchtmassen werden von einem Schwingerjoch getragen, welches mit dem Wellenstrang ein schwingfähiges Feder-

Masse-System bildet. Der Vorteil dieser Schwingungsanregung liegt im Gegensatz zu der am Institut bereits vorhandenen Hebelumlenkung in der spielfreien Lastaufgabe besonders bei Spannungsverhältnissen im Bereich  $-\infty < R < 0$ . Diese Art der Drehmomenterzeugung hat sich in verschiedenen anderen Fällen als leistungsfähig erwiesen /9/.

Das Biegemoment resultiert aus einer exzentrisch gelagerten Wellenanordnung (**Bild 7**), die in einer ähnlichen Ausführung ihre Zuverlässigkeit mehr als ein Jahrzehnt bewiesen hat /7/.



**Bild 7:** Prinzipielle Darstellung der Exzentereinheit zur Biegemomentenerzeugung

Bei diesem Prinzip ist die Welle in drei exzentrischen Hülsen (Punkte 2, 3 und 4) gelagert. Diese Anordnung befindet sich in einem herkömmlichen Lagergehäuse (1). Bei Verdrehung der Hülsen gegeneinander lässt sich eine Exzentrizität von 0 mm bis 5 mm stufenlos einstellen. Versetzt man die Hülse 2 in eine Drehbewegung, wirkt auf den Prüfling ein umlaufendes Biegemoment.

Die Entkopplung des Schwingerjochs von der Exzentereinheit geschieht durch eine Membrankupplungseinheit. Membrankupplungen sind extrem torsionssteif, können aber Winkelverlagerungen durch ihre biegeeweiche Membran hervorragend ausgleichen /10/.

Mit dem Prüfstandskonzept wird es möglich, Prüffrequenzen bis ca. 40 Hz zu realisieren. Damit wird sich die o.a. Prüfzeit von ca. 2 Wochen auf etwa 3 Tage vermindern.

## 5 Literatur

/1/ Hove, Ulrich: Zum Verhalten biege- und torsionsbelasteter Profilwellenverbindungen. Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Berlin 1986

/2/ Tiegom, Jean Désiré: Entwicklung eines wissenschaftlichen Systems über mechanische Werkstoff- und Bauteilprüftechnik. Schriftenreihe Konstruktionstechnik, Berlin 1996

/3/ Blumenauer, H. (Hrsg.): Werkstoffprüfung. 6.Auflage. Leipzig; Stuttgart: Dt. Verl. Für Grundstoffindustrie, 1994

/4/ Erismann, Th.H.: Prüfmaschinen und Prüfanlagen: Hilfsmittel der zerstörenden Materialprüfung. Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris u.a.: Springer 1992

/5/ RILEM, Matériaux et constructions, Essais et recherches, vol. 16 - Nr.92: Commission Technique RILEM 30 - TE, Equipment d'essais des matériaux. Paris: Bordas-Dunod 1983

/6/ Tiefenau, N.: Prüfstandskonzepte bei variablen Last- und Geometriebedingungen. Unveröffentlichte Diplomarbeit am Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal 2000

/7/ Garzke, M.; Henschel, J.; Schäfer, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 1). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998

/8/ Birkholz, H.; Heider, G.: Prüfstände zur Bauteiluntersuchung am IMW (Teil 2). Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998

/9/ Cornelius, E.-A.: Die Dauerdrehwechselfestigkeit von Wellen unter dem Einfluß von Preßsitzen. Konstruktion 9 (1957), H. 8

/10/ Birkholz, H.; Garzke, M.; Mupende, I.: TWINTORS® - Membrankupplung für Turbomaschinen. Mitteilungen aus dem Institut für Maschinenwesen der TU Clausthal, 1998