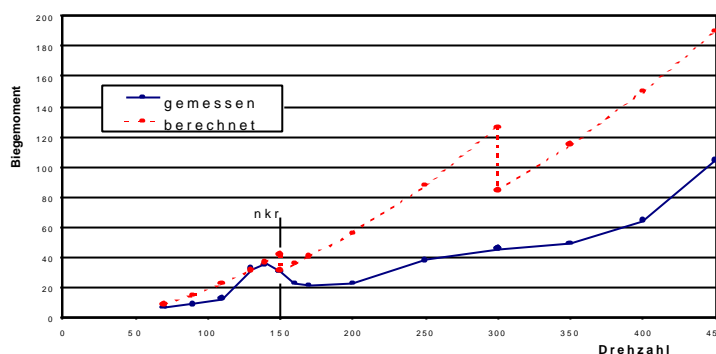


## Ausgangssituation

Rührwerke werden in vielen Zweigen der Wirtschaft zum Rühren von unterschiedlichen Medien verwendet. Die Auslegung der Rührwerkswellen entsprechend der auftretenden Biegebelastung der Wellen und entsprechend den möglichen Schwingungen der Welle sowie des gesamten Rührwerks ist noch sehr unsicher. Deshalb werden die Rührwerke überdimensioniert. Ein Beispiel zeigt das folgende Bild.



Die gemessenen Biegemomente liegen bei hohen Drehzahlen weit unter den entsprechend der betrieblichen Berechnungsvorschrift erwarteten Biegemomenten. Die Welle aus hochlegiertem Stahl wird dadurch zu sicher und zu teuer ausgelegt.

Die Berechnungsvorschriften beziehen sich auf Untersuchungen, die teilweise Jahrzehnte zurückliegen. Dabei wurden die unterschiedlichen Rührorgane typisiert und die hydraulischen Erregerkräfte – als die Ursache der dynamischen Biegemomente – normiert als Radialkraftbeiwerte angegeben. Bei der Normierung wurden an Hand der strömungsmechanischen Ähnlichkeitsgesetze und der Scale-up-Methoden die Parameter

- Durchmesser des Rührorgans
- Drehzahl des Rührorgans
- Dichte des zu rührenden Mediums

berücksichtigt. Als unbedeutend wurde die vom Medium ausgehende Dämpfung angenommen.

Gemessen wurden die durch die hydraulischen Kräfte verursachten Biegemomente in der Welle und es wurde die Beziehung

$$F_R = M_b / l$$

in der Rührtechnik als Grundlage für die Ermittlung der hydraulischen Radialkräfte am Rührorgan verwendet.

Ebenso wurde für den umgekehrten Rechengang – die Ermittlung des Biegemoments zur Rührwerksberechnung – diese Gleichung als Standardgleichung verwendet.  $F_R$  wird dabei nicht als Kraft, sondern als Kraftwirkung auf das Biegemoment definiert. Diese aus der Sicht des Maschinendynamikers ungewöhnliche Definition erklärt sich aus der allgemeinen Unsicherheit im Umgang mit der aus Ähnlichkeitsgesetzen erfolgten Normierung der Erregerkräfte für die Rührorgantypen und aus einer Unsicherheit gegenüber dem dynamischen Verhalten eines Rotors bei Berücksichtigung der Vergrößerungsfunktion  $V_f$ , die im speziellen Anwendungsfall wegen der oft unbekanntenen Dämpfung nicht bekannt ist.

## Forschungsziel

Die vorliegende Forschungsarbeit sollte dazu beitragen, die Einflussgrößen auf das Biegemoment genauer zu definieren, um die Berechnung der Rührwerkswellen für beliebige Anwendungsfälle exakter vornehmen zu können. Es wurden Versuche mit Rührwerken durchgeführt und ausgewertet und mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) Belastungen und Schwingungen der Rührwerke untersucht.

## Forschungsergebnis

Die Untersuchungen wurden an einem SNR-Rührwerk mit einer Welle  $\varnothing 40 \times 3000$  mm und einem Propeller  $\varnothing 400$  mm durchgeführt. Die wichtigsten Ergebnisse sind:

- Für die messtechnische Beurteilung der Belastung der Welle ist die Messung des Biegemoments gegenüber der Messung von Bewegungsgrößen am besten geeignet. Dazu wurde eine spezielle Messnabe entwickelt. Diese Messnabe gestattet durch Adapter das Messen an unterschiedlichen Wellendurchmessern.
- Es wurde eine Wegweisung für eine Berechnungsvorschrift abgeleitet und der Einfluss der Vergrößerungsfunktion und der Dämpfung auf die  $c_R$ -Werte als wesentlich erkannt. Die Ermittlung der realen Dämpfungswerte hat dabei eine große Bedeutung.
- Mit der bisherigen Berechnungsvorschrift werden die Rührwellen im überkritischen Bereich zu groß dimensioniert.
- Die Belastungen durch mechanische und hydraulische Unwuchten sind klein gegenüber den Belastungen durch stochastisch auftretende hydraulische Kräfte. Größte Belastungen erfolgen durch langfristig, über mehrere Umdrehungen wirkende hydraulische Kräfte. Diese treten auch bei voller Überdeckung und besonders im exzentrischen Betrieb auf. Während die Messungen in der Grube ein quadratisches Anwachsen der Belastung mit der Drehzahl zeigten, ergibt sich bei exzentrischem Betrieb ein noch höherer Gradient. Um auch diese Effekte in eine Berechnungsvorschrift umsetzen zu können, sind weitere Versuchsreihen erforderlich.
- Aus den FEM-Berechnungen lassen sich die Eigenfrequenzen mit ihren Schwingungsformen und die folgenden Ergebnisse in Abhängigkeit von der Drehzahl, einschließlich der kritischen Drehzahl, darstellen:
  - Biegemomente an beliebigen Stellen der Welle,
  - Lagerkräfte,
  - Auslenkungen der Welle und für beliebige andere Strukturpunkte wie Behälterdeckel, Motorschwerpunkt, Laterne, Gleitringlager

Die wichtigsten FEM-Ergebnisse sind:

- Die Eigenfrequenzen werden vor allem von der Behältergröße, Behälterwanddicke, der Steifigkeit der Dichtung und der Lager sowie von der Motor-/Getriebe-Masse beeinflusst.
- Die Kreiselwirkung ist für die untersuchten Varianten vernachlässigbar klein.
- Die Propellerflügel haben eine hohe Steifigkeit und somit eine hohe Eigenfrequenz. Sie beeinflussen das Rotorschwingverhalten nicht.
- Die 2. Eigenfrequenz liegt bei starrer Aufspannung des Rührwerks, z. B. auf einem Prüfundament, weit oberhalb des Arbeitsbereiches ( $n_{kr2} > 900$  U/min). Bei der Befestigung der Rührwerke auf Behältern bis 4 mm Wanddicke liegt die 2. Eigenfrequenz im Arbeitsbereich ( $n_{kr2} = 330$  bis  $450$  U/min), kritische Zustände sind daher möglich.
- Bei messtechnischen Untersuchungen konnten die Größen der Erregerkräfte und der Dämpfungseinfluss des Mediums ansatzweise ermittelt werden. Die FEM-Ergebnisse sind daher relativ zueinander vergleichbar.

## Anwendung und wirtschaftliche Bedeutung

Die Ergebnisse sind von allgemeinem Interesse in der Rührtechnik, weil für Konstrukteure von Rührwerken trotz Existenz diesbezüglicher Berechnungsvorschriften die größte Unsicherheit noch immer bei der Ermittlung der mechanischen Beanspruchung der Rührwerkswellen einschließlich der Rührorgane besteht. Der Grund ist, dass der Hauptteil der mechanischen Beanspruchung im engen Zusammenhang mit strömungsmechanischen Vorgängen steht, die zeitlich stochastischen Gesetzen unterliegen.

Besonders wichtig sind die Ergebnisse über den Einfluss der Rührwerksbehälter auf das Schwingungsverhalten und auf die Belastung der Rührwellen. Das kann helfen, mit den Erzeugnissen neue Märkte zu erschließen.

Eine Wegweisung für die Erarbeitung einer Berechnungsvorschrift wurde als ein Ergebnis der Forschungsarbeit dargestellt. Die Fortführung der Arbeiten ist sehr sinnfällig, da mit den in diesem Thema bereits durchgeführten Messungen und Berechnungen eine fundierte Grundlage für die noch ausstehenden Parts geschaffen wurde. Mit den gewonnenen Erfahrungen und der weitgehend realen FEM-Modellierung des Rührwerks ist eine sichere Basis für weitere Arbeiten gegeben.