

# Untersuchungen zum Einsatz von Magnetorheologischen Fluiden in Kupplungen

*Gefördert vom Sächsischen Staatsministerium für Wirtschaft und Arbeit  
Landesinnovationskolleg “Intelligente Funktionsmodule der Maschinentechnik”.*

## Inhalt

- Zielstellung
- Wirkungsweise und Aufbau von MRF
- Entmischung von MRF in Scheibengeometrien
- Permanentmagnetabdichtung für MRF
- Drehmomentübertragungsgleichungen
- Experimentelle Untersuchungen
- Zusammenfassung und Ausblick

*Verteidigung der an der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden  
von Dietrich Lampe eingereichten Dissertation*

# Zielstellung

## Technologieentwicklung für Maschinentechnik

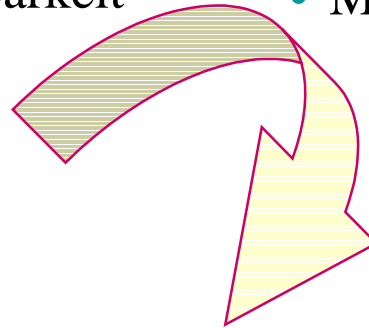
### „Intelligente“ Kupplung auf der Basis magnetorheologischer Fluide

#### Erhöhte Anforderungen

- Direkte elektrische Ansteuerbarkeit
- Kürzere Reaktionszeiten
- Geringerer Verschleiß
- Reproduzierbarkeit

#### Neue Möglichkeiten

- Magnetorheologische Fluide mit höherer Leistungsfähigkeit und besserer Stabilität



#### Zu untersuchende Probleme

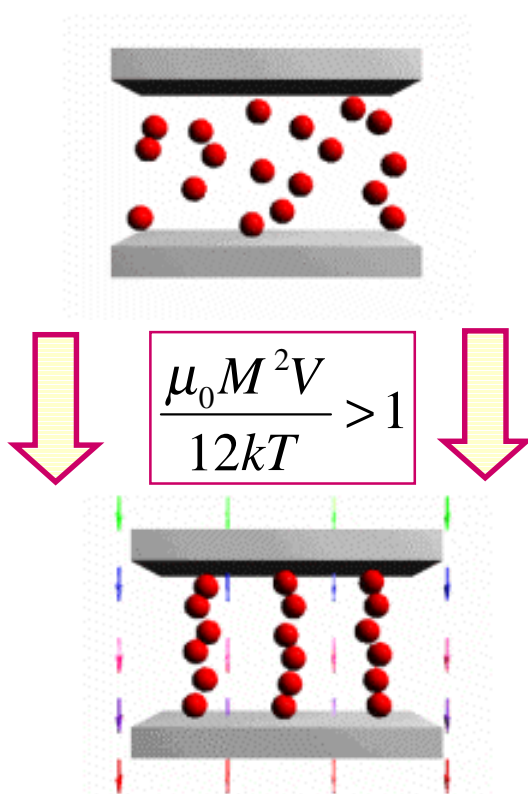
- Drehmomentübertragungseigenschaften
- Entmischung durch Zentrifugalkräfte
  - Abdichtmethoden

# Wirkungsweise und Aufbau von MRF

## Zusammensetzung

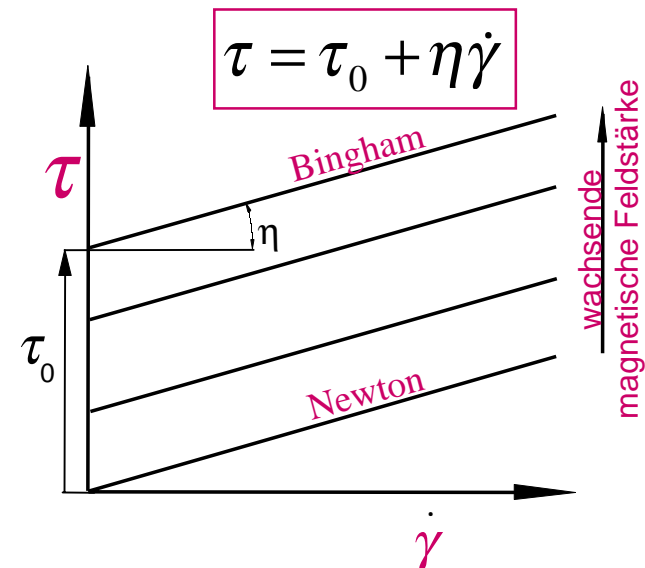
- Ferromagnetische Partikel, Basisöl, Stabilisator

## Funktionsweise



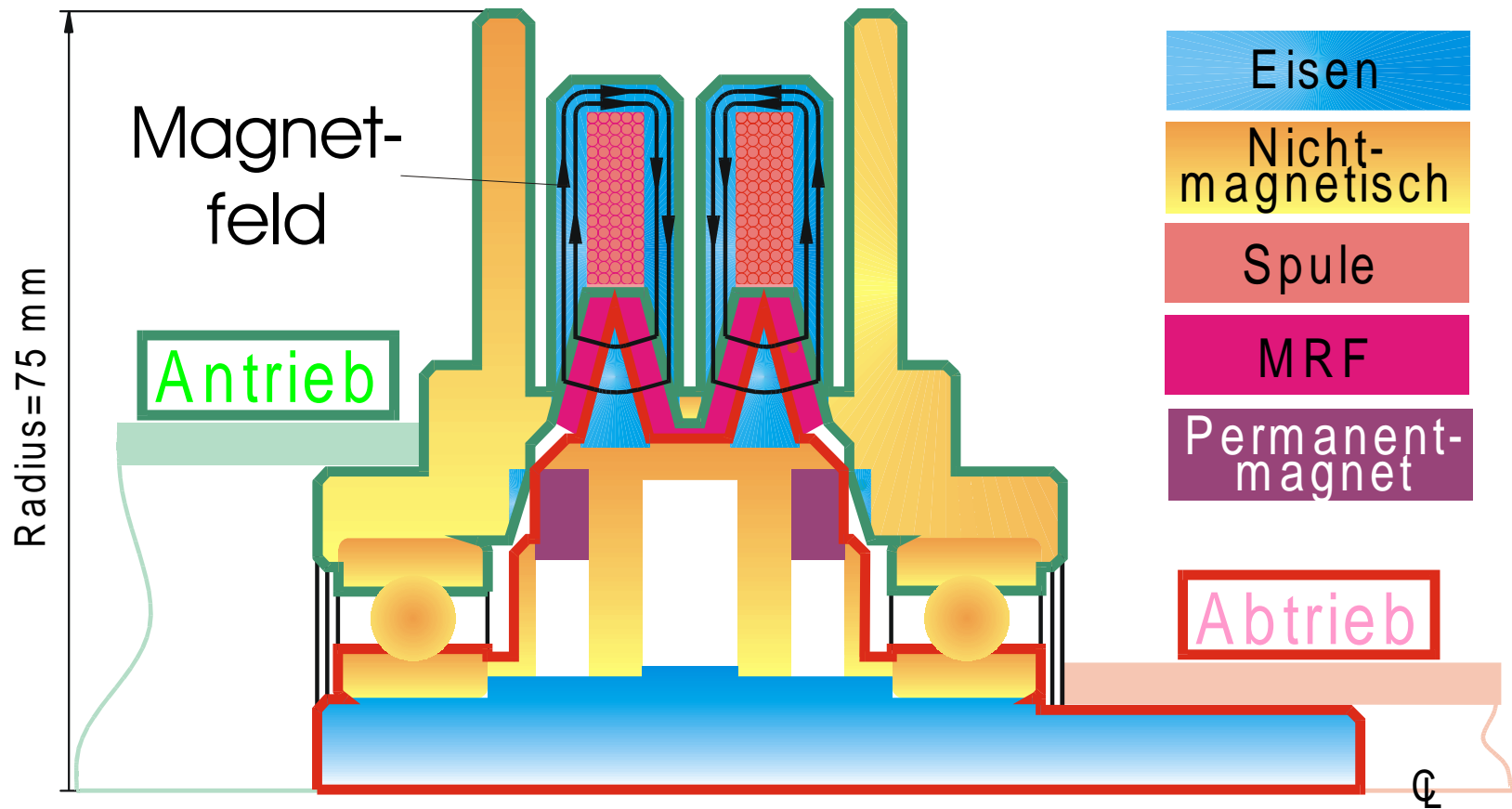
## Strömungsmechanische Beschreibung

- Bingham-Fluid:



- a: **statische** Grenzscherspannung  $\tau_{ys}$
- b: **dynamische** Grenzscherspannung  $\tau_{yd}$

# Aufbau einer MRF-Kupplung

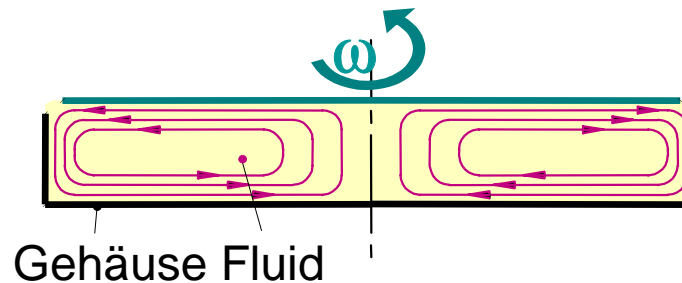


# Entmischung von MRF in Scheibengeometrien

**Problem** Auszentrifugierung der Partikel aufgrund des Dichteunterschiedes

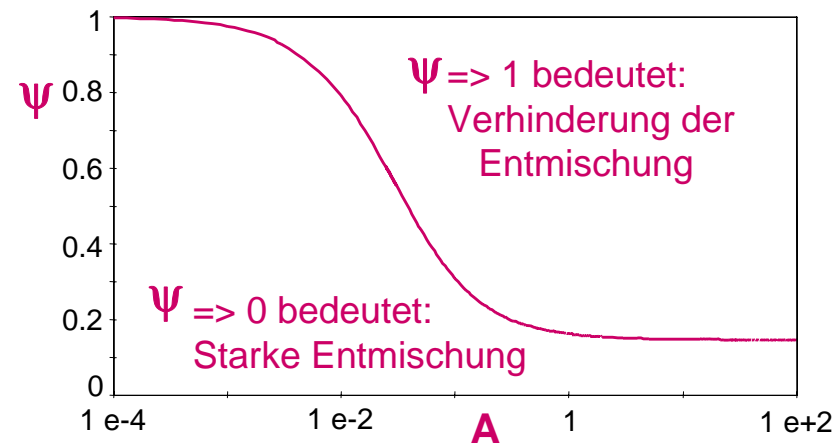
## Lösung

- Zirkulationsströmung



- Kräfte auf Partikel:
  - a: Zentrifugalkraft
  - b: Strömungswiderstand (Stokes)
- $\Rightarrow$  charakteristischer Parameter

$$A = \left( \frac{R_p}{S} \right)^2 \frac{v_M (\rho_p - \rho_f)}{\eta_f}$$

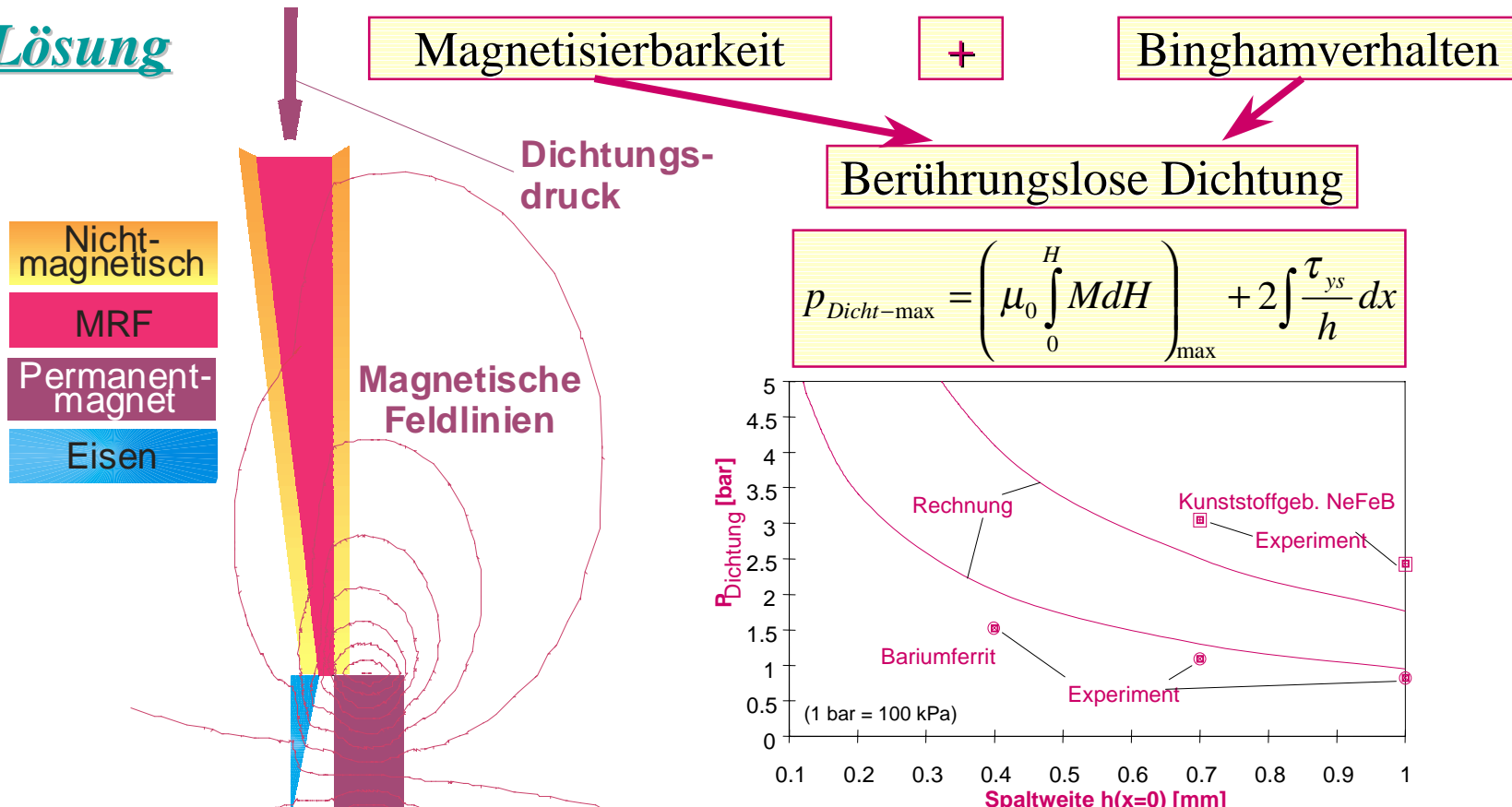


**Spaltvergrößerung verhindert Fluidentmischung**

# Permanentmagnetabdichtung für MRF

**Problem** Gummidichtungen für MRF ungeeignet

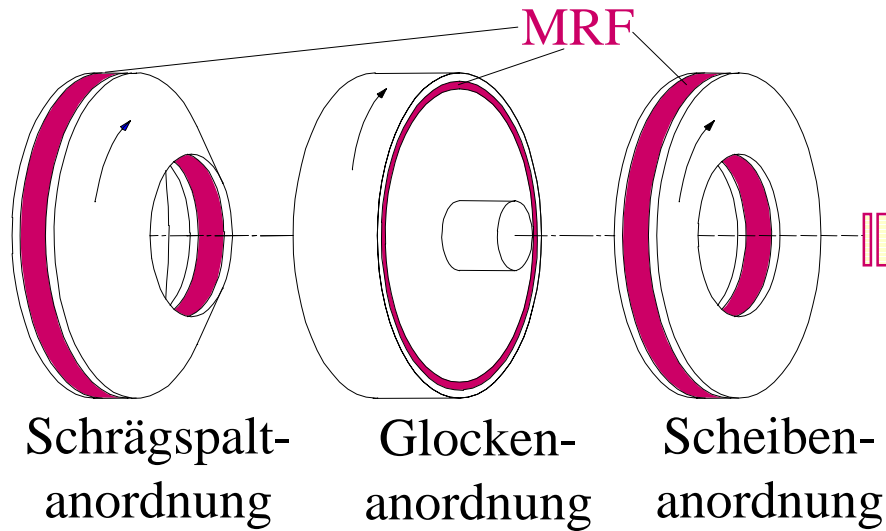
**Lösung**



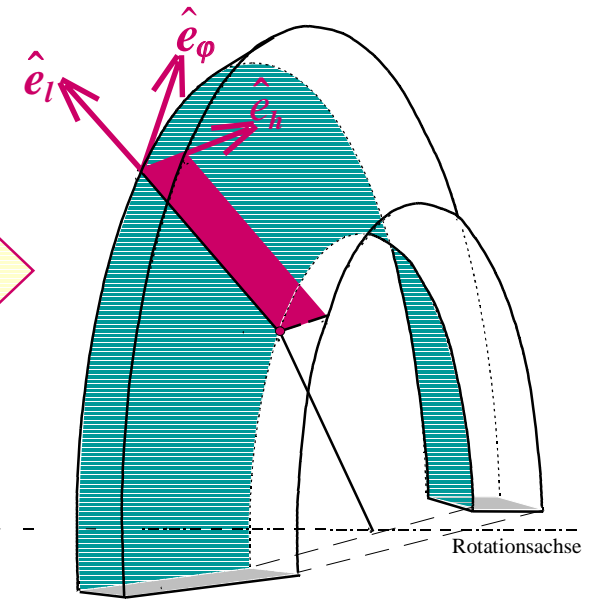
**Höhere Dichtungsdrücke als bei Ferrofluiden**  
**Experiment bestätigt Rechnung**

# Drehmomentübertragungsgleichungen

## Mögliche Bauformen



## Spaltangepaßte Koordinaten



Scherspannung > Grenzscherspannung (B)	
ja	nein
Navier-Stokes	Festkörpergleichungen

# Drehmomentübertragungsgleichungen

## MRF im flüssigen Zustand

- NS-Gleichungen in spaltangepaßten Koordinaten
- Neues 3d-Binghammodell (bisher nur 2d  $\tau = \tau_0 + \eta\dot{\gamma}$  )

Newton

$$\vec{\tau} = \eta \vec{D}$$

$$\tau_{xy} = \eta \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yd} \left[ 1 - \delta_{Dirac} \left( B_y \frac{\partial u}{\partial y} + B_x \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right]$$

Bingham

$$\vec{\tau} = \vec{\tau}_{Bingham} + \eta \vec{D}$$

$M_{dyn} =$

$$\sim \eta \sim \frac{1}{S} \sim (\omega - \varphi) \sim (R_a^4 - R_i^4)$$

+

$$\sim \tau_{yd} \sim (R_a^3 - R_i^3)$$

## MRF im festen Zustand

- Spannung  $\sim$  Dehnung  $\sim$  radiale Position
- $\tau_{ys}$  - maximal ertragbare Spannung bei maximalem Radius

$$M_{max\ stat} = \sim \tau_{ys} \sim (R_a^4 - R_i^4) \sim \frac{1}{R_a}$$



# Experimentelle Untersuchungen an MRF-Kupplungen

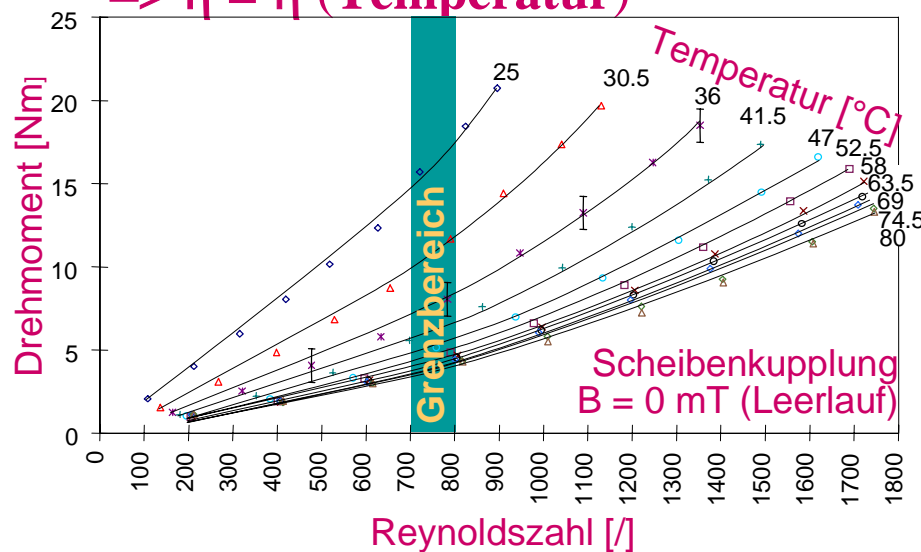
## Im Fluidmodus

### Untersuchungsziele

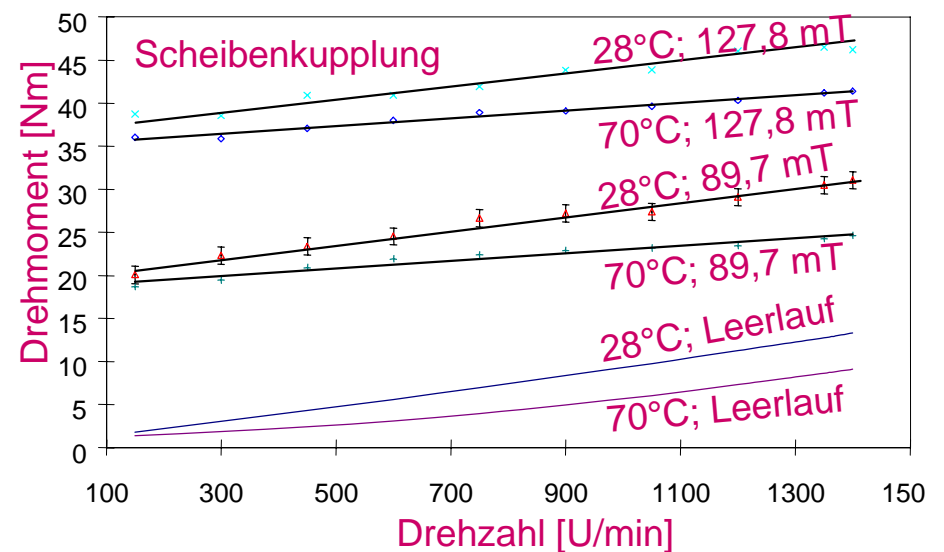
- Drehmomente als Funktion von Drehzahl, Magnetfeldstärke, Temperatur
- Basisviskosität und dynamische Grenzscherspannung der MRF
- Nachweis der Korrektheit der theoretisch abgeleiteten Drehmomentgleichungen
- Bestimmung der Grenzreynoldszahl

### Ergebnisse Leerlauf

=>  $\eta = \eta$  (Temperatur)



### Ergebnisse mit Magnetfeld



**Nachweis der Linearisierbarkeit  
des Geschwindigkeitsprofils  
durch Magnetfeld**

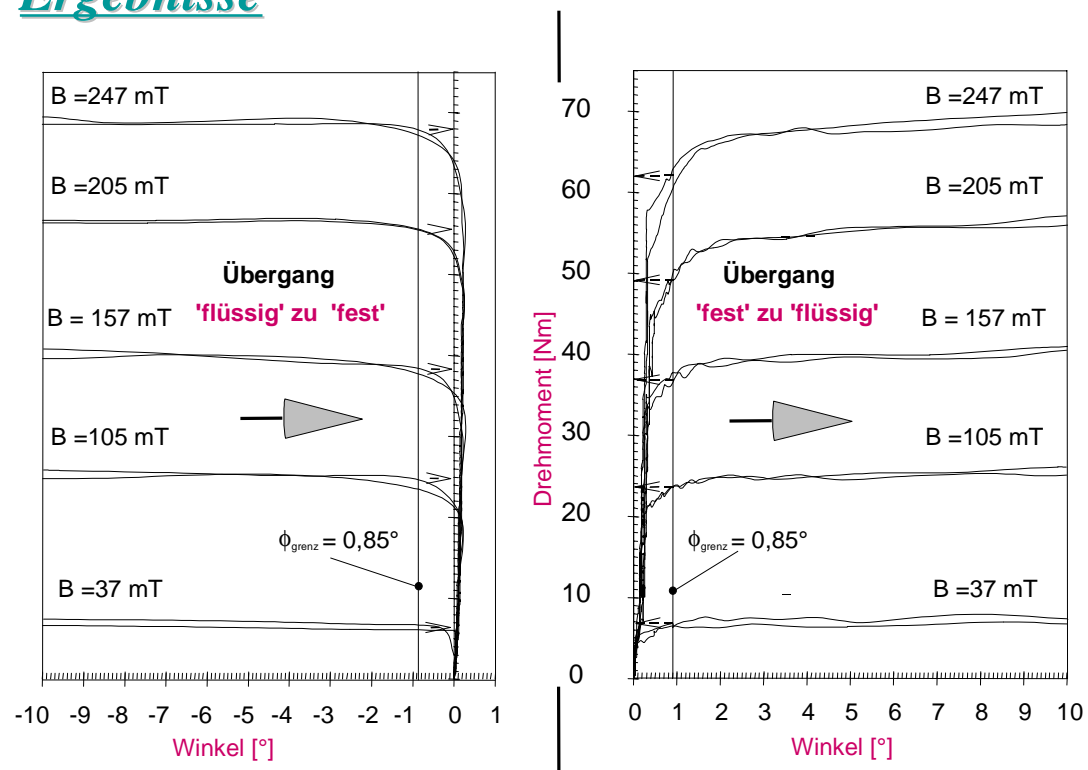
# Experimentelle Untersuchungen an MRF-Kupplungen

## Phasenübergang zwischen Festkörper- und Fluidmodus

### Untersuchungsziele

- Statische und dynamische Grenzdrehmomente und Grenzs Schubspannungen
- Übergang zwischen synchroner und schlupfender Drehmomentübertragung
- Einfluss der Drehmomentänderungsgeschwindigkeit

### Ergebnisse



- Erstmals  $\tau_{\text{ys}}$  und  $\tau_{\text{yd}}$  separat gemessen
- Trotz  $\tau_{\text{ys}} > \tau_{\text{yd}}$   
=> für Scheibenkupplung:  
 $M_{\text{max-stat}} < M_{\text{min-dyn}}$
- Kupplungsdesign ohne Drehmomentsprung ermöglicht

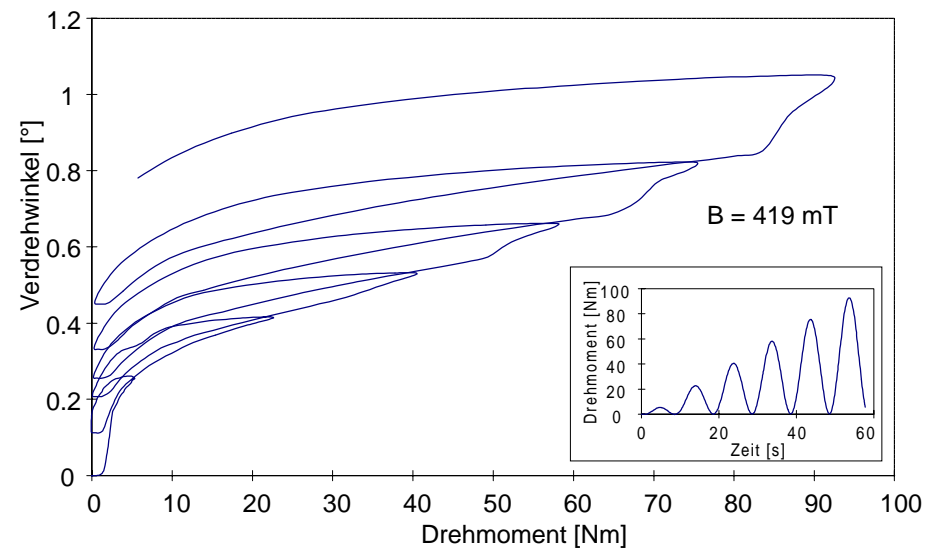
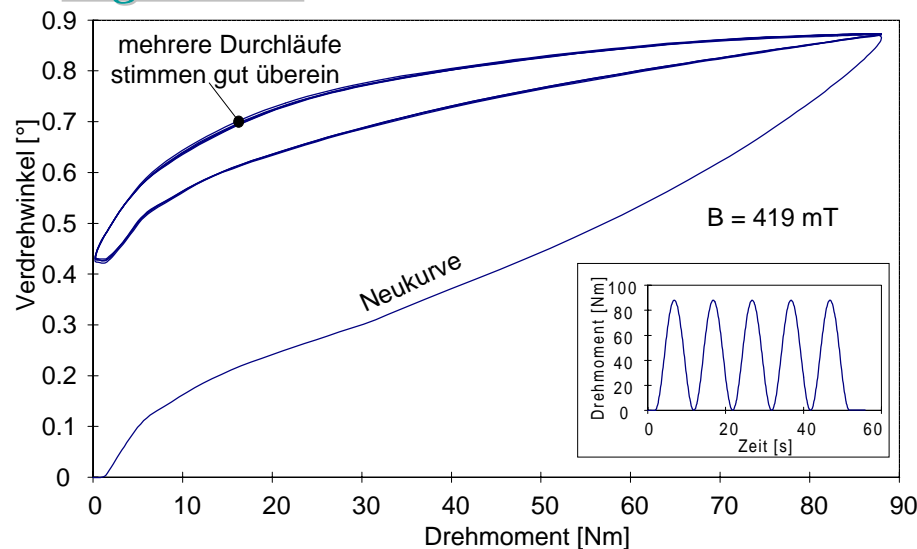
# Experimentelle Untersuchungen an MRF-Kupplungen

## Im Festkörpermodus

### Untersuchungsziele

- Kriechverhalten von MRF
- MRF im festen Zustand als linear-elastische Körper?
- Schubmodul durch magnetische Feldstärke beeinflussbar?

### Ergebnisse



- Maximalverdrehwinkel unabhängig von Verformungsgeschichte
- Remanenter Verdrehwinkel nach Belastungsabbau stets vorhanden
- Verdrehung nicht linear zur Drehmomentbelastung
- Kein Kriechen meßbar
- Nur bei Annäherung an von B abhängiges Grenzdrehmoment ist Einfluss auf remanente Verformung zu registrieren

# Zusammenfassung und Ausblick

## Gewonnene Erkenntnisse

- Verhinderung der Entmischung durch Fluidzirkulation
- Abdichtung von MRF-Kupplungen mittels Permanentmagneten
- Dreidimensionales Binghammodell abgeleitet
- Abgeleitete Drehmomentübertragungsgleichungen experimentell bestätigt
- Grenzreynoldszahl  $Re_{\text{Grenz}} = 750$
- Linearisierung des Geschwindigkeitsprofils durch Magnetfeld
- Existenz eines Verdrehwinkels für maximales im festen MRF-Zustand übertragbares Drehmoment gezeigt und Größe bestimmt
- Bei Lastabbau verbleibt remanente Verformung der MRF - Größe hängt von der vorher erreichten Maximallast und der Feldstärke ab
- Durch die Feldstärke steuerbarer Schubmodul für MRF nicht existent
- Last ohne messbares Kriechen ertragbar.
- Schaltzeiten theoretisch analysiert und experimentell bestimmt

## Ausblick

- Anwendungsreifer Entwicklungsstand von MRF-Kupplungen
- Perspektiven für:
  - Antriebstechnik
  - Energieerzeugung
  - Wickelvorgänge
  - Automobilbereich
  - Spezielle Anwendungen