

## Kennwort: Druck-Viskosität

Datum: 10.06.10

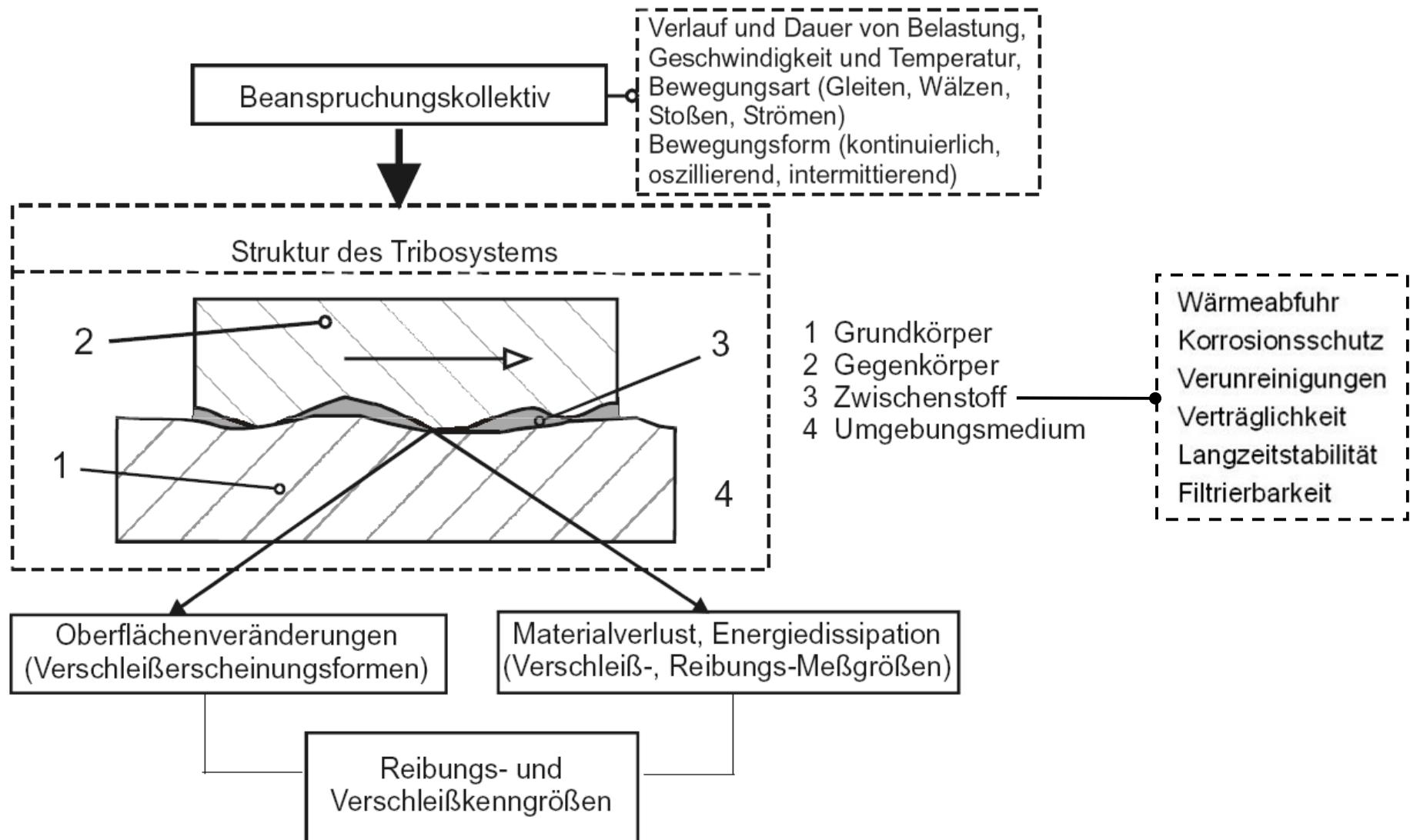
Autor: Dipl.-Ing. Torsten Kretschmer  
communicated by Institutsleiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Jacobs  
Projektleiter: Dr.-Ing. Volker Rombach

- Schmierstoffe in WEA (**WindEnergieAnlagen**)
  - Einfluss auf den Tribologischen Kontakt
  - Schmierstellen in WEA
  - Zielkonflikt bei der Schmierstoffauswahl
- Grundlagen Schmierfilmbildung
  - Druckverteilung
  - EHD – Schmierfilmtheorie
  - Schmierstoffparameter
  - Messtechnische Ermittlung am IME
- Druckabhängige Schmierstoffparameter
  - Einfluss verschiedener Grundöle
  - Einfluss verschiedener Additivierungen
- Experimentelle Schmierfilmhöhe
  - Gegenüberstellung von experimentell ermittelter und berechneter Schmierfilmhöhe
- Aktualisierung des GfT-Arbeitsblattes Nr.3
- Ausblick weiterer Forschungstätigkeit

# Schmierstoff in WEA

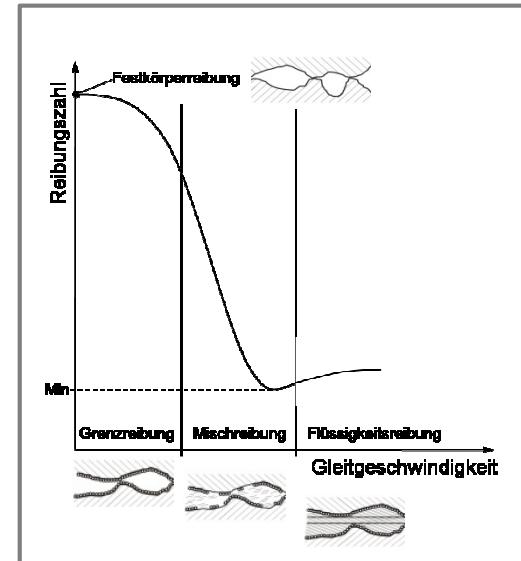
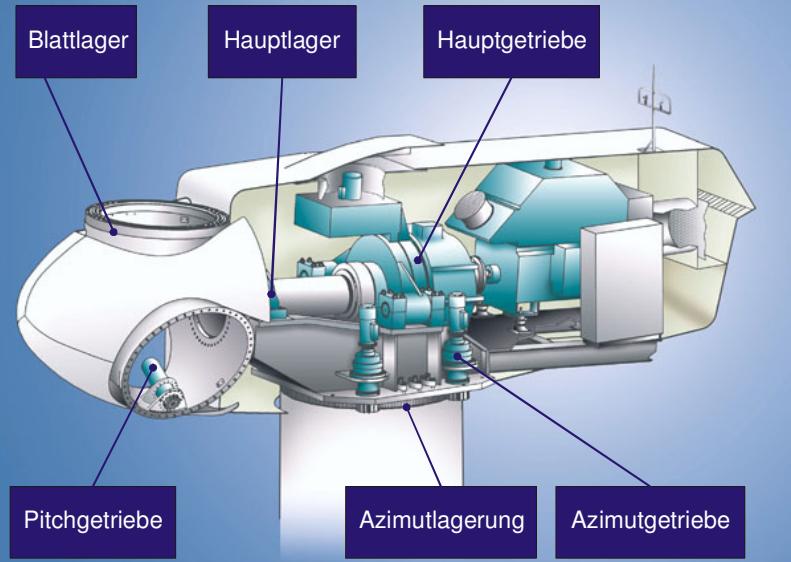
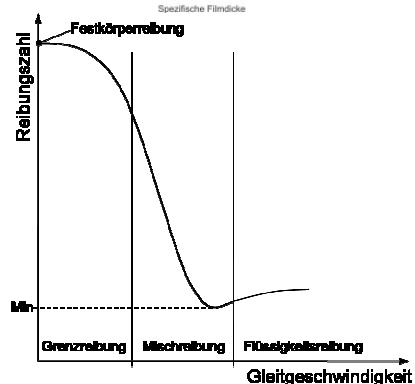
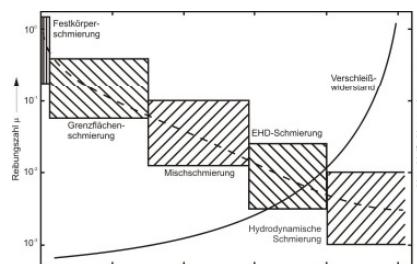
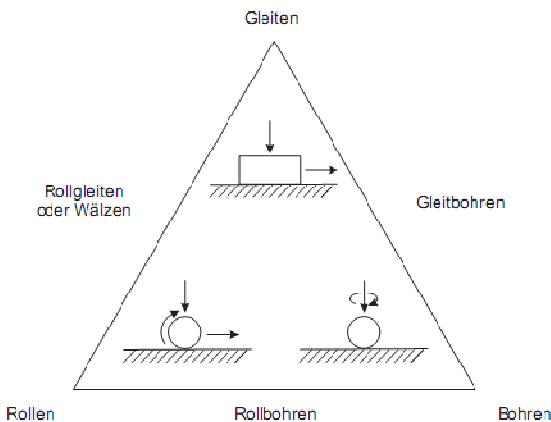
## Einfluss auf den Tribologischen Kontakt

T. Kretschmer  
Folie 3



### Bewegungsart/-form

- Rollen
- Gleiten
- Bohren
- intermittierend
- oszillierend
- kontinuierlich



### Zielkonflikt

#### Soll-Zustand

- Flüssigkeitsreibung für geringen **Verschleiß**
- Mischreibung für geringe **Reibungszahl**
- Guten Korrosionsschutz
- Gleichbleibendes **Leistungsvermögen**  
(Scherstabilität, Alterung, ...)
- Gute Filterbarkeit
- Gute **Verträglichkeit** mit verschiedenen Materialien
- Geringer temperaturbedingter **Viskositätsabfall**
- Hohes **Lasttragvermögen**



#### Ist-Zustand

- Misch-/Grenzreibung bei oszillierender Bewegung, **Anfahr- und Auslaufvorgängen**, hohen Drehzahlen
- **Flüssigkeitsreibung** bei stationären Betriebszuständen einstellbar
- Beeinflussung des tribologischen Kontakts durch Last, **Temperatur**, Drehzahl, **Wassergehalt**, Oberflächenrauheit, Werkstoff, Schmierstoff, **Eigenfrequenz**, freie **Oberflächenenergie**, unterschiedliche Reinheit

### Lösung: Gezielte Additivierung zur Erfüllung der hohen Anforderungen

- **ausreichende Schmierfilmhöhe** entsprechend der Bedingungen (VI-Verbesserer)
- Ausbildung oberflächenschützender Schichten (EP/AW-Additive)

# Schmierstoff in WEA

## Zielkonflikt bei der Schmierstoffauswahl

T. Kretschmer  
Folie 6

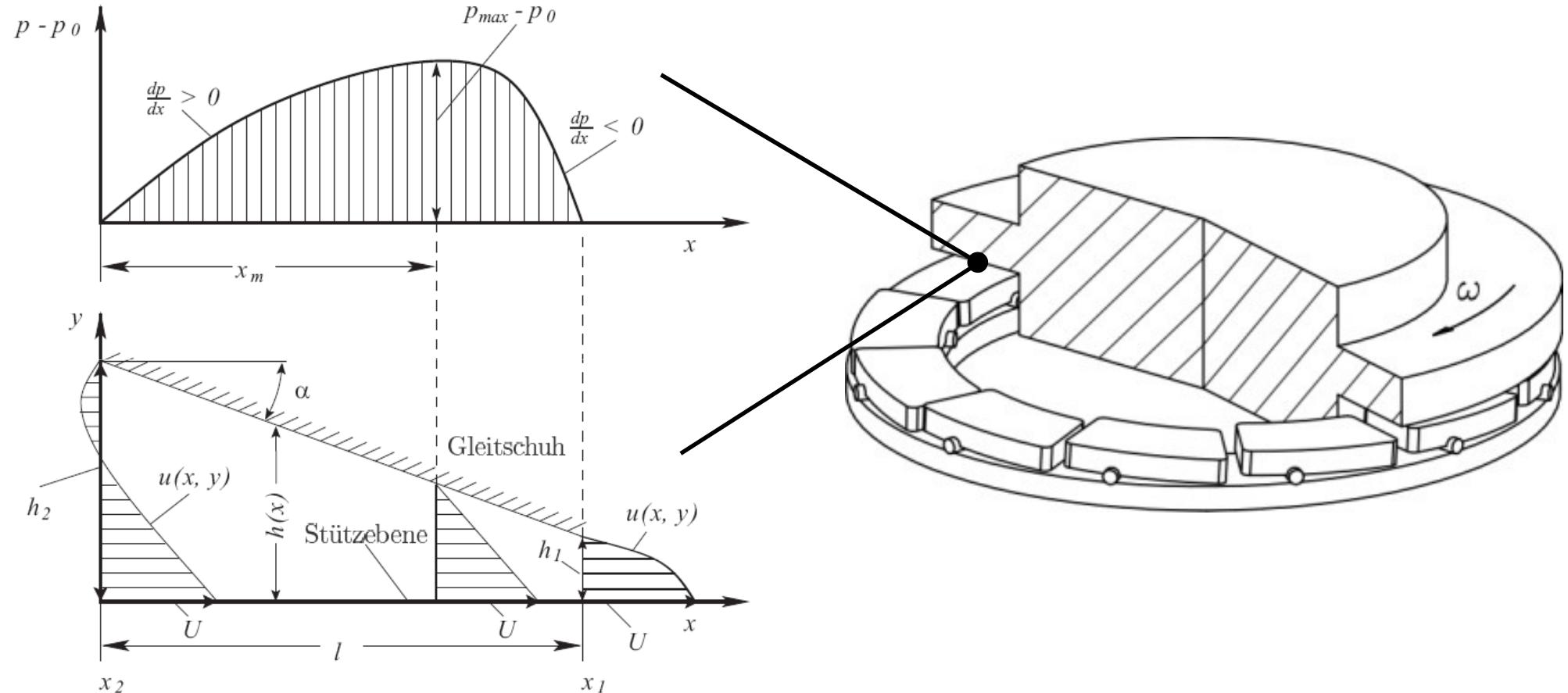
	Produktnam	Hersteller	Grundöltyp	
Soll:	Castrol Tribol 1100 VG320	Castrol	Mineralöl	
	Castrol Optigear BM 320	Castrol	Mineralöl	
	Addinol Ecogear M 320	Addinol	Mineralöl	
	Mobilgear XMP 320	Exxon Mobil	Mineralöl	
	Castrol Tribol 1710 VG320	Castrol	Mineralöl / PAO	
	Mobilgear SHC XMP 320	Exxon Mobil	PAO	
	Castrol Optigear Synthetic A320	Castrol	PAO	
	Castrol Optigear Synthetic X320	Castrol	PAO	
	Addinol Ecogear S 320	Addinol	PAO	
	Shell Omala HD 320	Shell	PAO	
	Fuchs Renolin UNISYN CLP 320	Fuchs	PAO	
	Klübersynth GEM 4-320 N	Klübersynth	PAO	
	Fuchs Renolin PG 320	Fuchs	PG	
Lösung:	Klübersynth GH 6-320	Klübersynth	PG	
	Castrol Tribol BioTop 1418/320	Castrol	Ester	
	Klübersynth GEM 2-320	Klübersynth	Ester	
	Fuchs Gearmaster Eco 320	Fuchs	Ester	

Quelle: Internet

# Grundlagen Schmierfilmbildung

## Druckverteilung

T. Kretschmer  
Folie 7

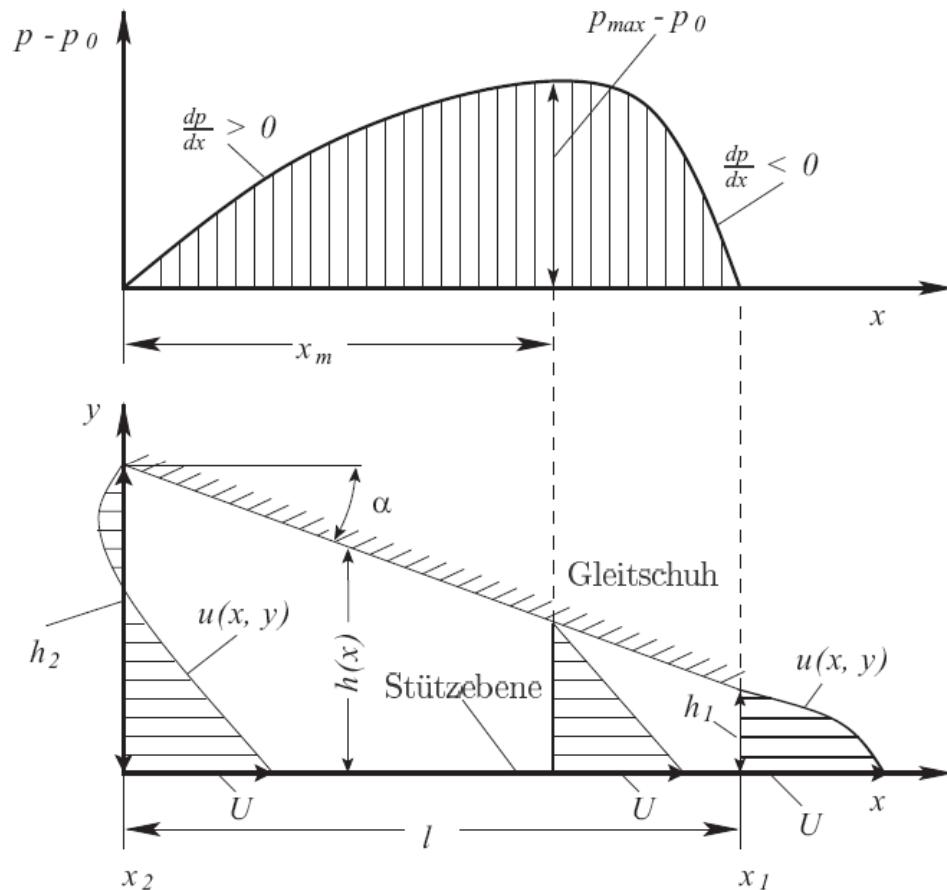


Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im unendlich breiten konvergenten Schmierspalt

# Grundlagen Schmierfilmbildung

## Druckverteilung

T. Kretschmer  
Folie 8



Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im unendlich breiten konvergenten Schmierspalt

- vereinfacht **NAVIER-STOKES**-Gleichung für unendliche Breite (Geschwindigkeit in Abhängigkeit vom Druckgradient)

$$u(x, y) = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} \cdot (y^2 - y \cdot h(x)) + U \left( 1 - \frac{y}{h(x)} \right)$$

- REYNOLDSsche Differentialgleichung**

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12 \frac{\partial h}{\partial t} + 6U \frac{\partial h}{\partial x}$$

$= 0$ , für stationären Betrieb

- Druckverlauf in Abhängigkeit vom Spaltquerschnitt  $h(x)$

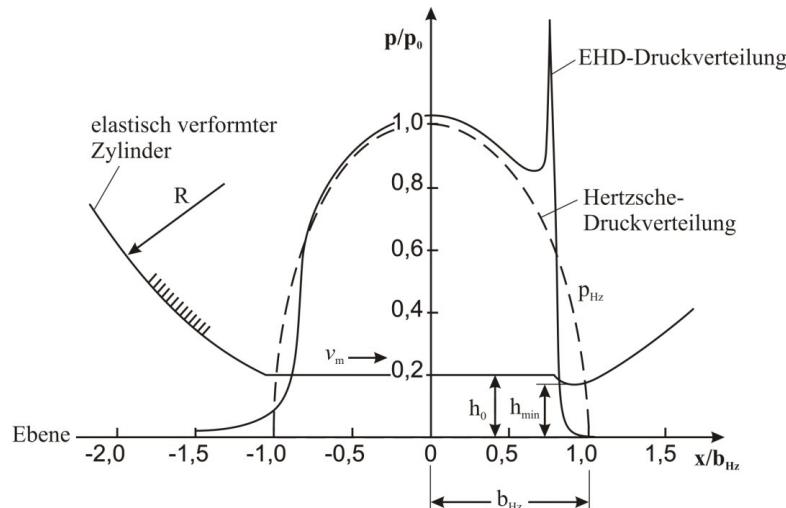
$$p(x) = 6U\eta \frac{(h_1 - h(x))(h_2 - h(x))}{(h_1 + h_2)h(x)^2}$$

Lösung nur numerisch möglich,  
häufig unpraktisch für den Anwender

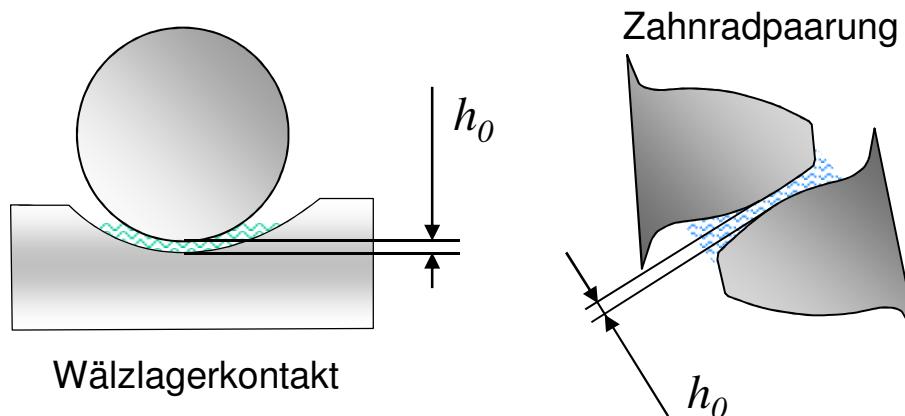
# Grundlagen Schmierfilmbildung

## EHD-Theorie

T. Kretschmer  
Folie 9



Druckverteilung im EHD – Schmierspalt



- analytische Berechnung der Schmierfilmdicke auf Grundlage der Arbeit von Dowson / Higginson

- klassische Theorie der **Hydrodynamik**
- Theorie der **elastischen** Festkörperdeformation

$$h_0 = \frac{1,0 \alpha_p^{0,6} \cdot \eta(\vartheta)^{0,7} \cdot u^{0,7} E^{0,03} R^{0,43}}{W^{0,13}}$$

$\alpha_p$ ...Druck-Viskositätskoeffizient,  $\eta$ ...dynamische Viskosität

- Einflussgrößen auf den EHD – Kontakt
  - Belastung und Relativgeschwindigkeit
  - Kontaktgeometrie
  - Schmierstoff

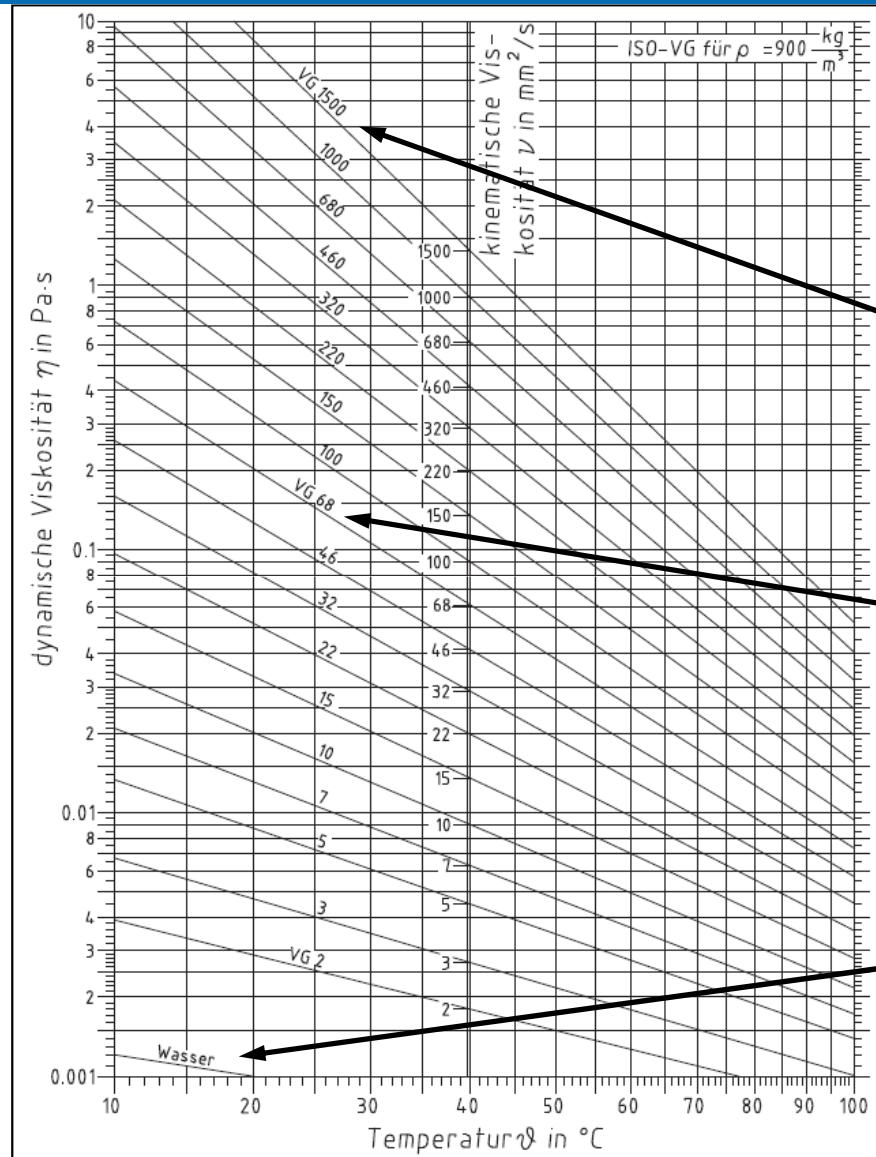
Ziel:

- Berechnung der Schmierfilmhöhe
- Quantifizierung des Schmierungszustands

# Grundlagen Schmierfilmbildung

## Schmierstoffparameter

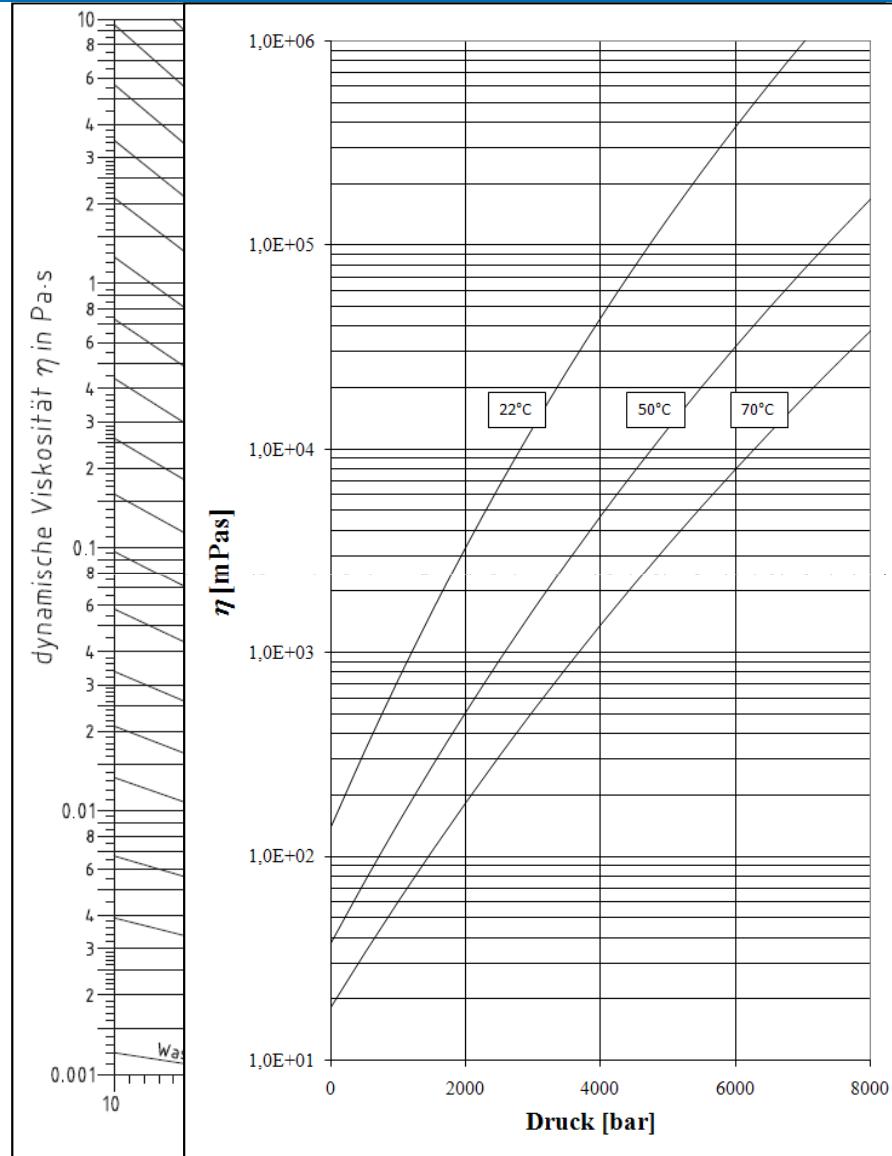
T. Kretschmer  
Folie 10



# Grundlagen Schmierfilmbildung

## Schmierstoffparameter

T. Kretschmer  
Folie 11

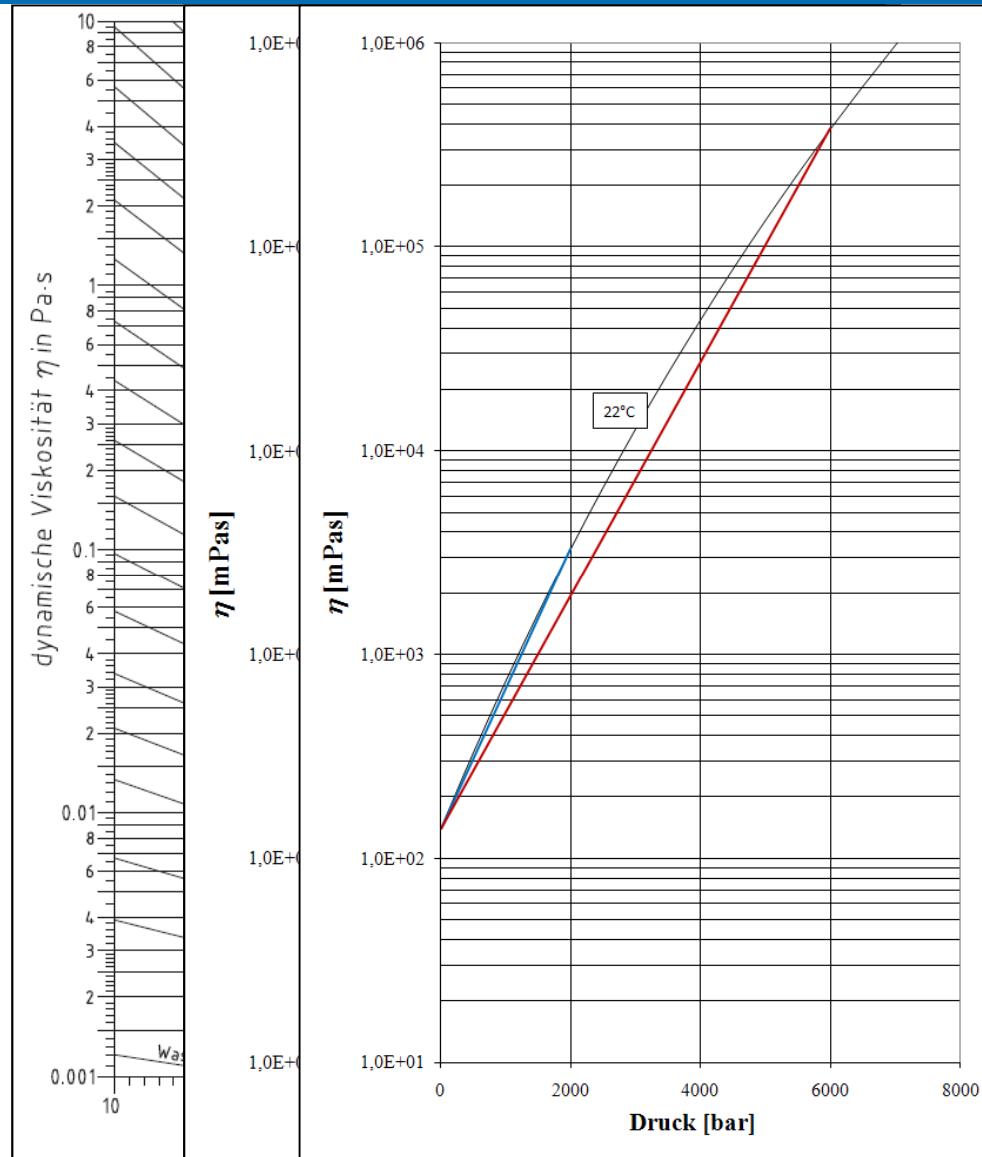


- Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit
  - Viskositätsindex VI-Index (DIN ISO 2909)
  - Viskositäts-Temperatur-Koeffizient  $\alpha_T$  (DIN 51563)
- Viskositäts-Druck-Abhängigkeit
  - Viskositäts-Druck-Koeffizient  $\alpha_p$

# Grundlagen Schmierfilmbildung

## Schmierstoffparameter

T. Kretschmer  
Folie 12

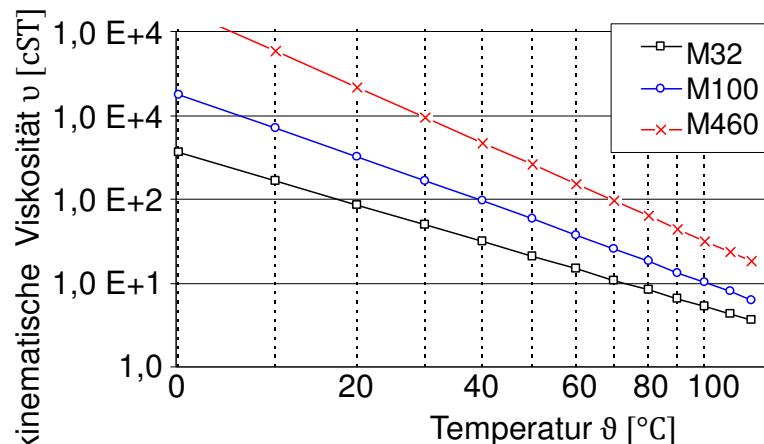
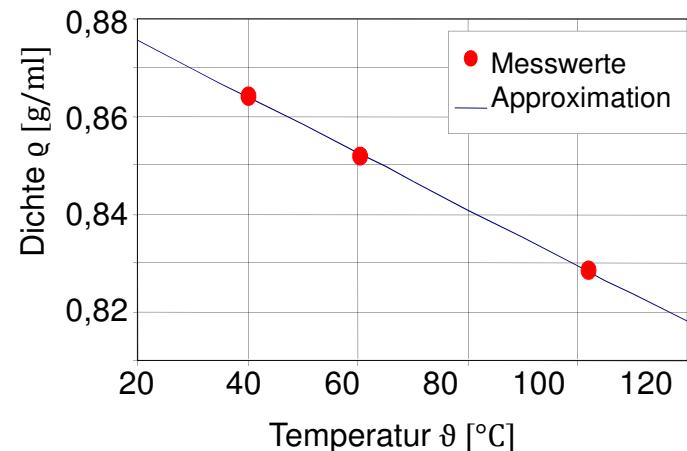


- Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit
    - Viskositätsindex VI-Index (DIN ISO 2909)
    - Viskositäts-Temperatur-Koeffizient  $\alpha_T$  (DIN 51563)
  - Viskositäts-Druck-Abhängigkeit
    - Viskositäts-Druck-Koeffizient  $\alpha_p$
  - Approximation der Viskositäts-Druck-Abhängigkeit (Sekante am Viskositätsverlauf)
    - Barusgleichung:  $\eta(\vartheta, p) = \eta_0 \cdot e^{\alpha_{Barus} \cdot p}$
    - Modulansatz nach IME:
$$\alpha_{Barus} = \alpha_{Modul(IME)} = \frac{[\ln \eta - \ln \eta_0]}{p - p_0} = \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \vartheta + (b_1 + b_2 \cdot \vartheta)p}$$
- genaue Vorhersage der dyn. Viskosität
  - exakte Prognose der Schmierfilmhöhe

# Schmierstoffparameter

## Umgebungsdruck

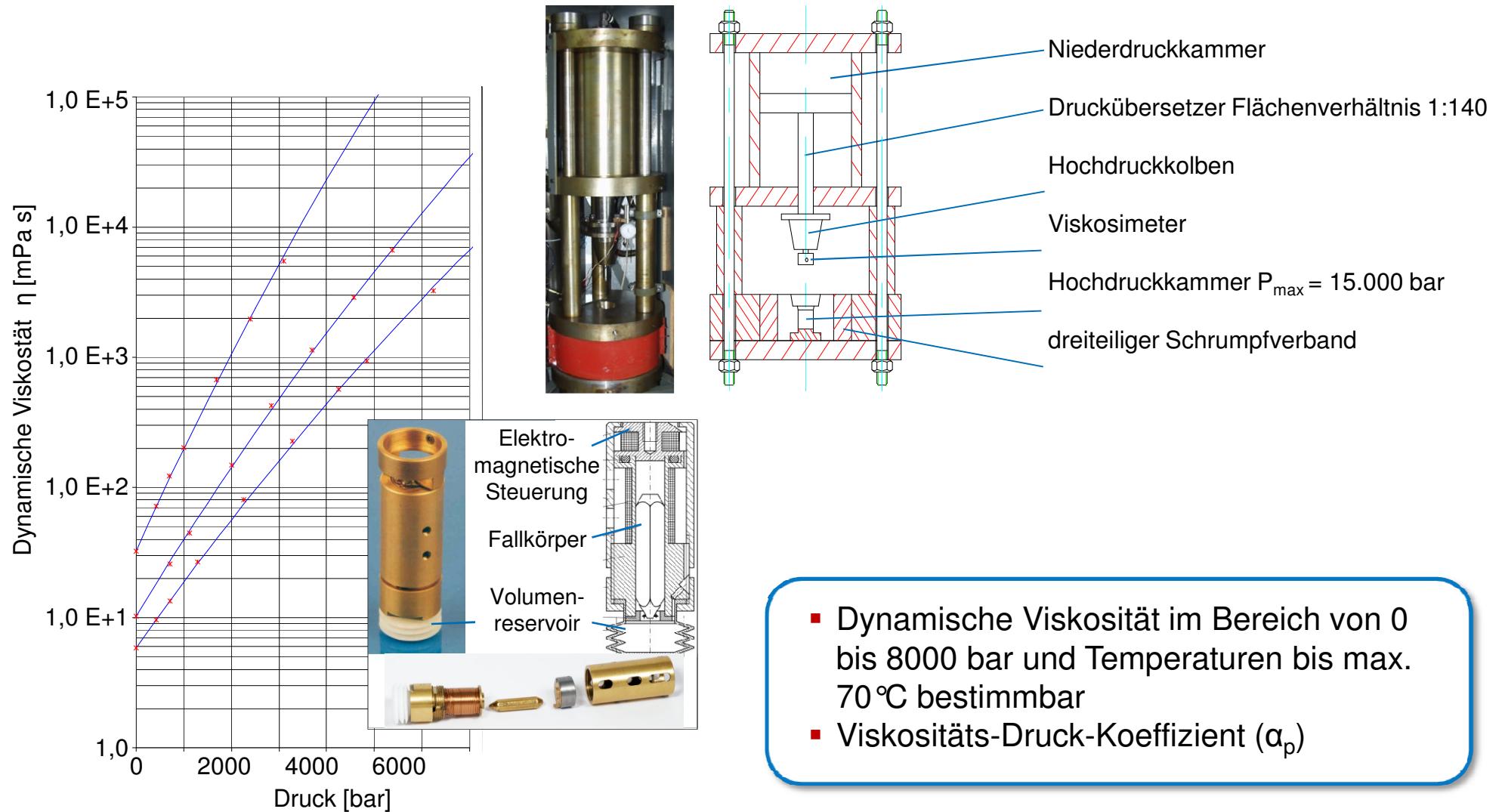
T. Kretschmer  
Folie 13



- Dichtebestimmung nach DIN 51757 mit Hilfe von Pyknometern nach Gay- Lussac
- Ermittlung der Viskosität und des Viskositätsindex (VI) bei Umgebungsdruck nach DIN 51562-2 mit dem Mikro-Ubbelohde-Viskosimeter
- kinematische und dynamische Viskosität bei verschiedenen Temperaturen

# Schmierstoffparameter Hochdruck

T. Kretschmer  
Folie 14



### Grundöltypen:

- Mineralöle (M)
- Polyal- $\alpha$ -olefine (PAO)
- Polyglykole (PG)
- Ester (E)
- Hydrocracks (HC)

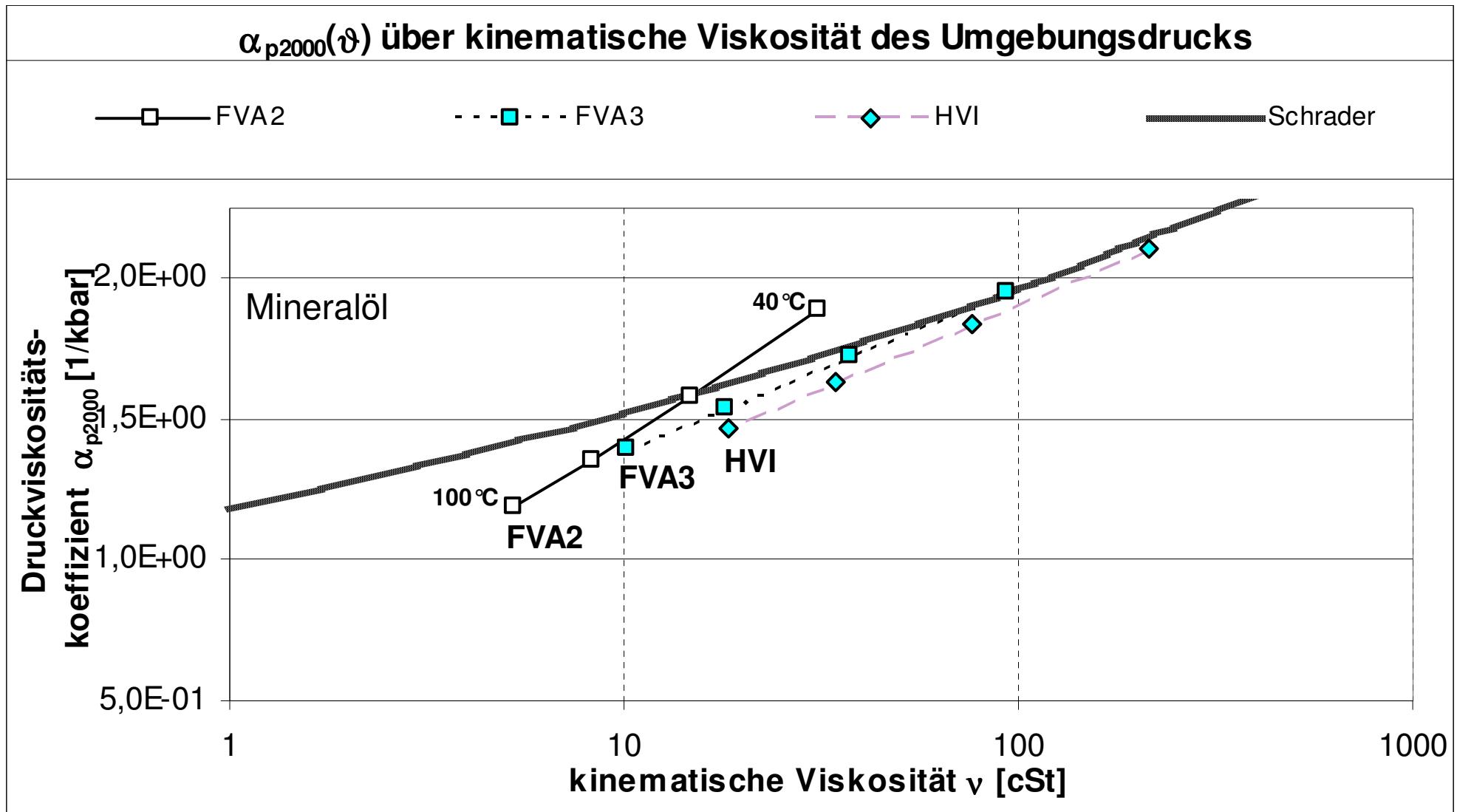
### Modellschmierstoffe:

- Grundöl pur
- Grundöl + VI-Verbesserer (PMA, PIB)
- Grundöl + EP/AW-Additiv (Anglamol 2000)
- Praxisschmierstoff

# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000\text{bar}}$ Mineralöl

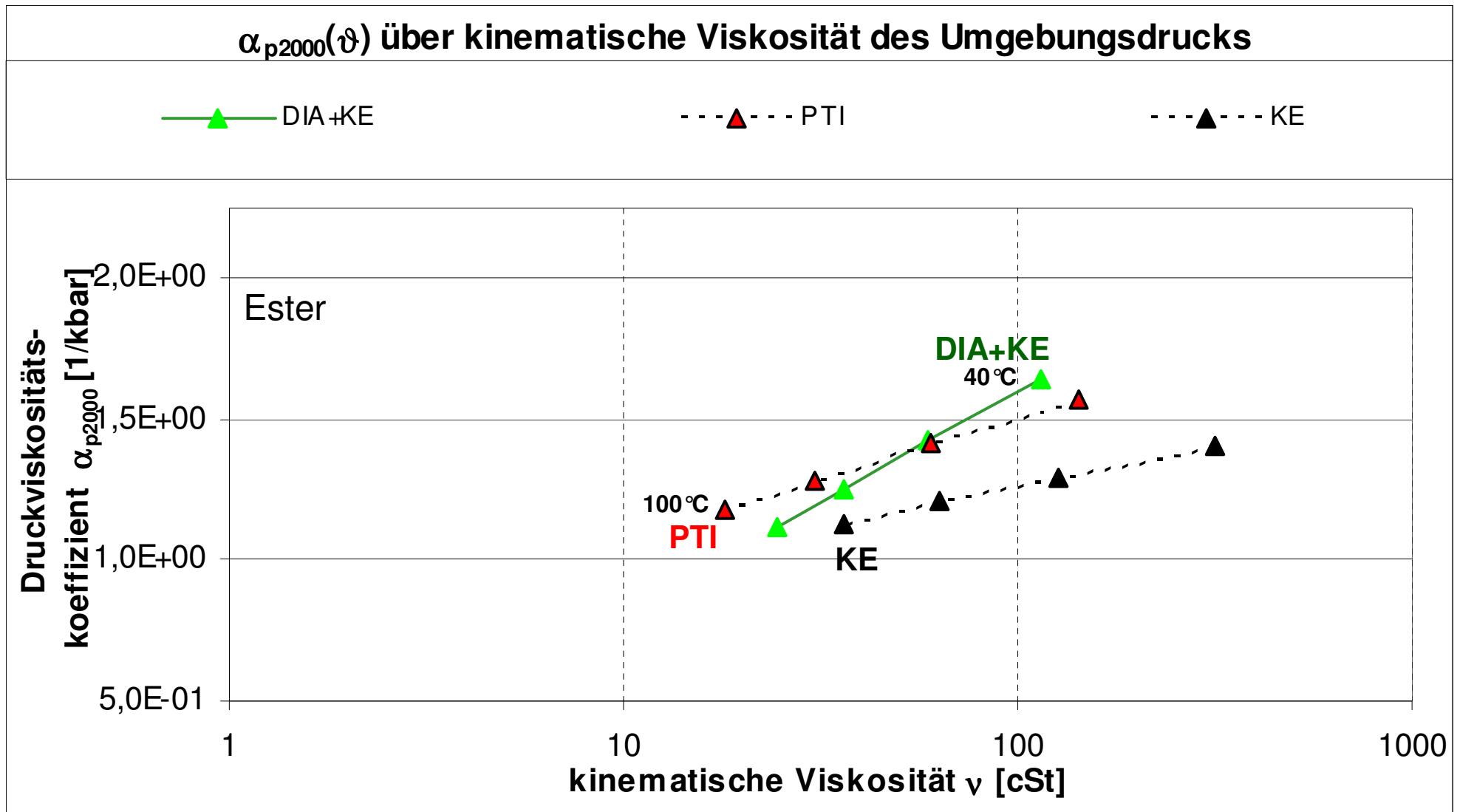
T. Kretschmer  
Folie 16



# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000\text{bar}}$ Ester

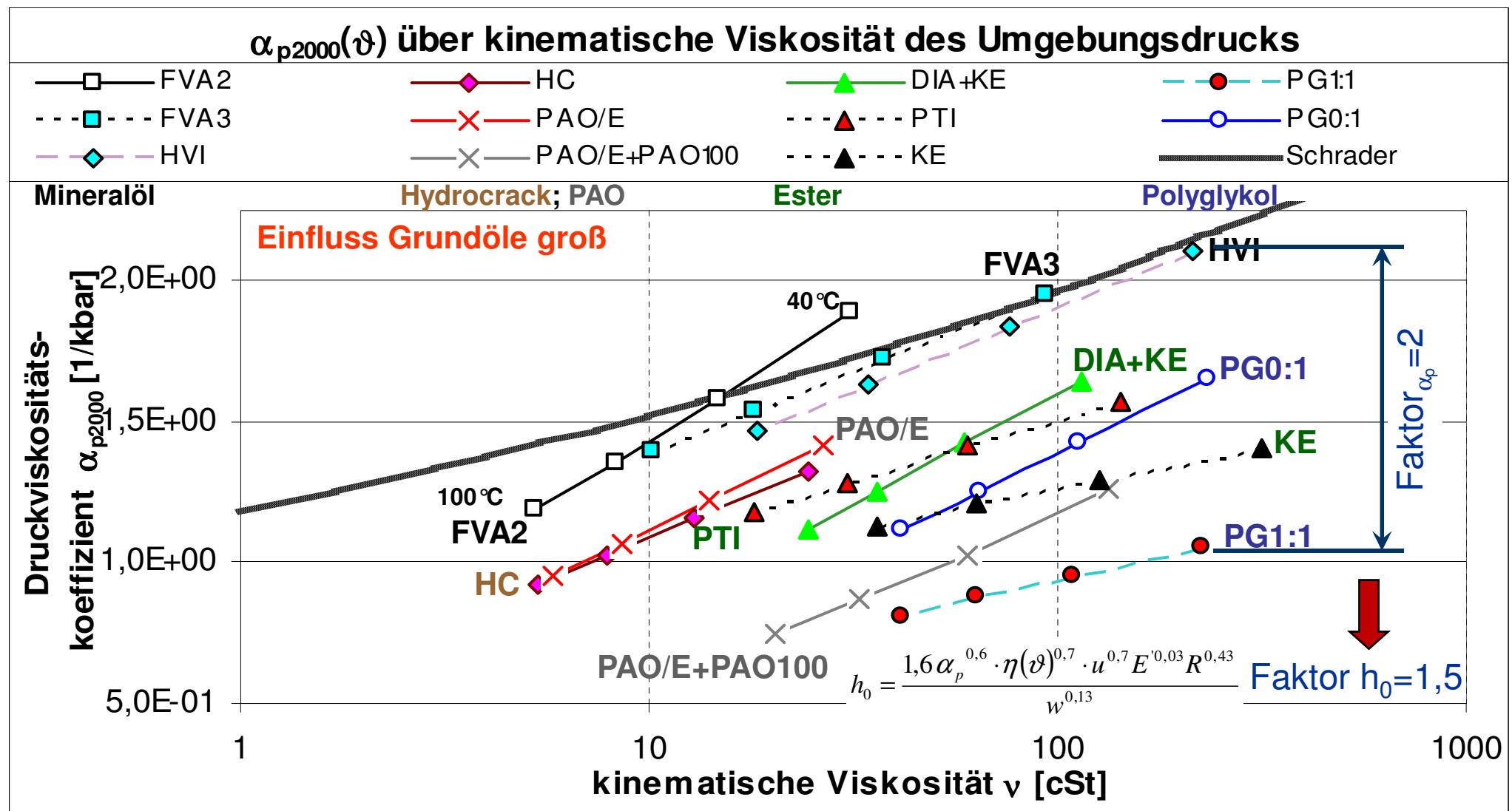
T. Kretschmer  
Folie 17



# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000\text{bar}}$ Grundöle

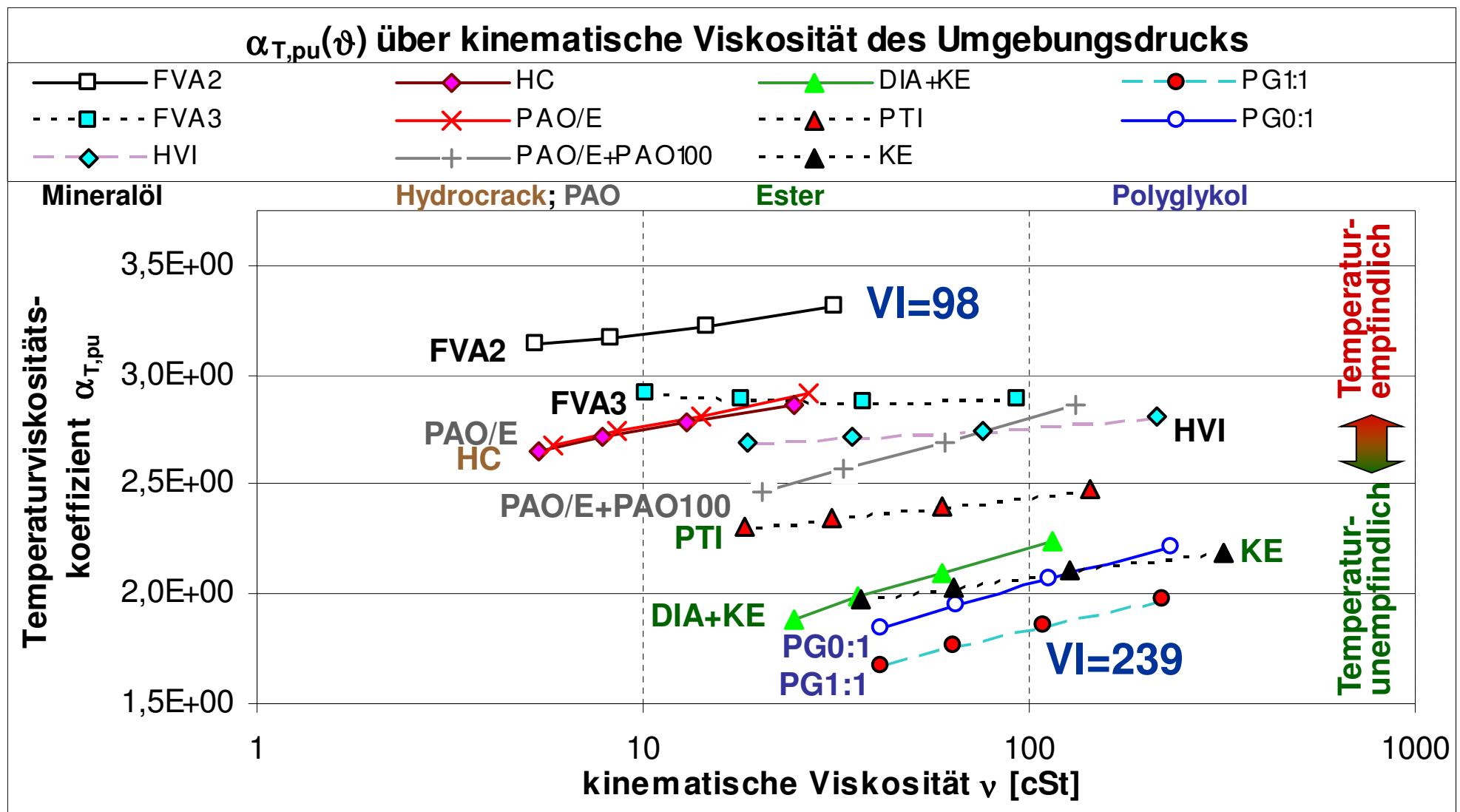
T. Kretschmer  
Folie 18



# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Temperatur-Koeffizient $\alpha_{T,0\text{bar}}$ Grundöle

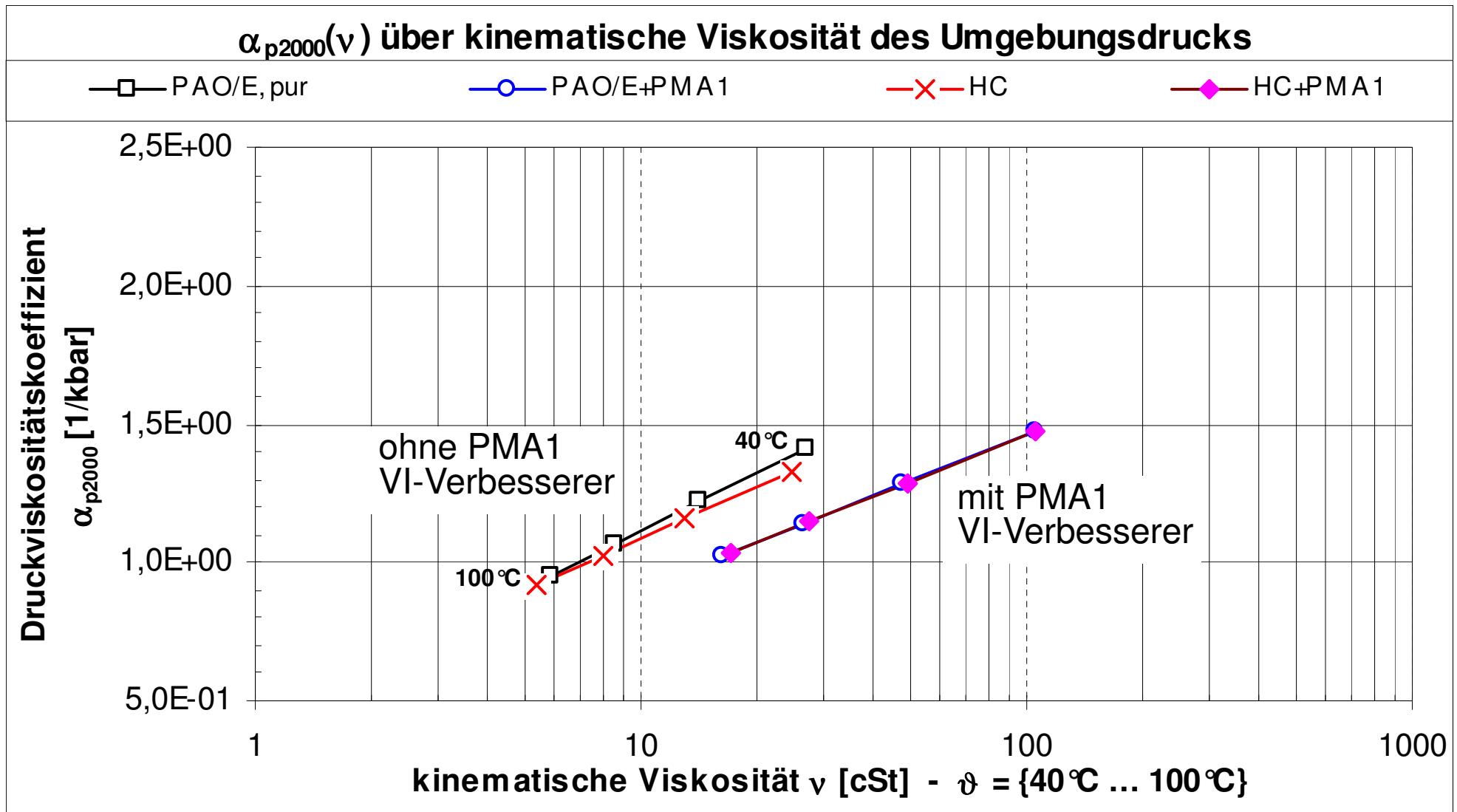
T. Kretschmer  
Folie 19



# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000\text{bar}}$ VI-Verbesserer

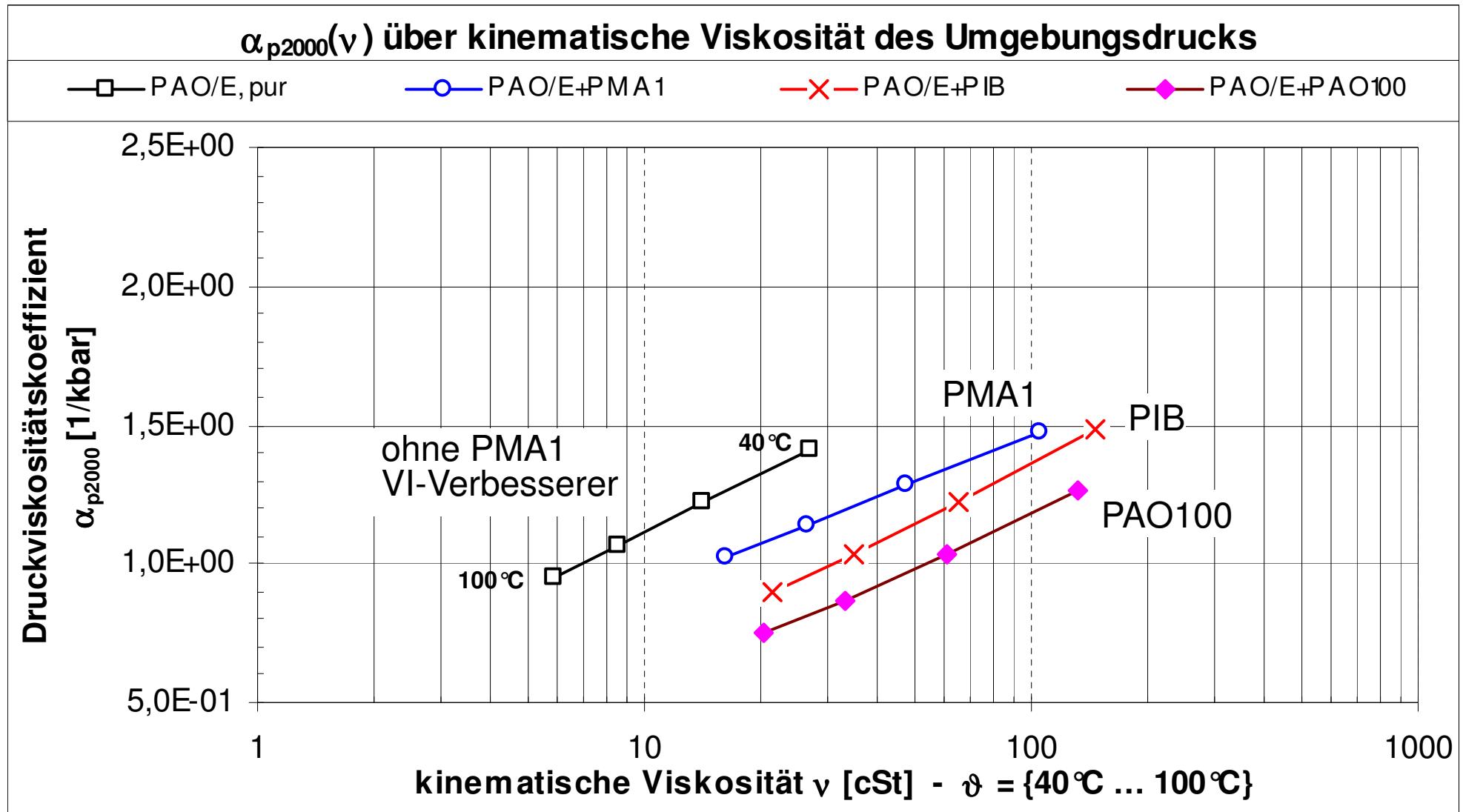
T. Kretschmer  
Folie 20



# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000\text{bar}}$ VI-Verbesserer

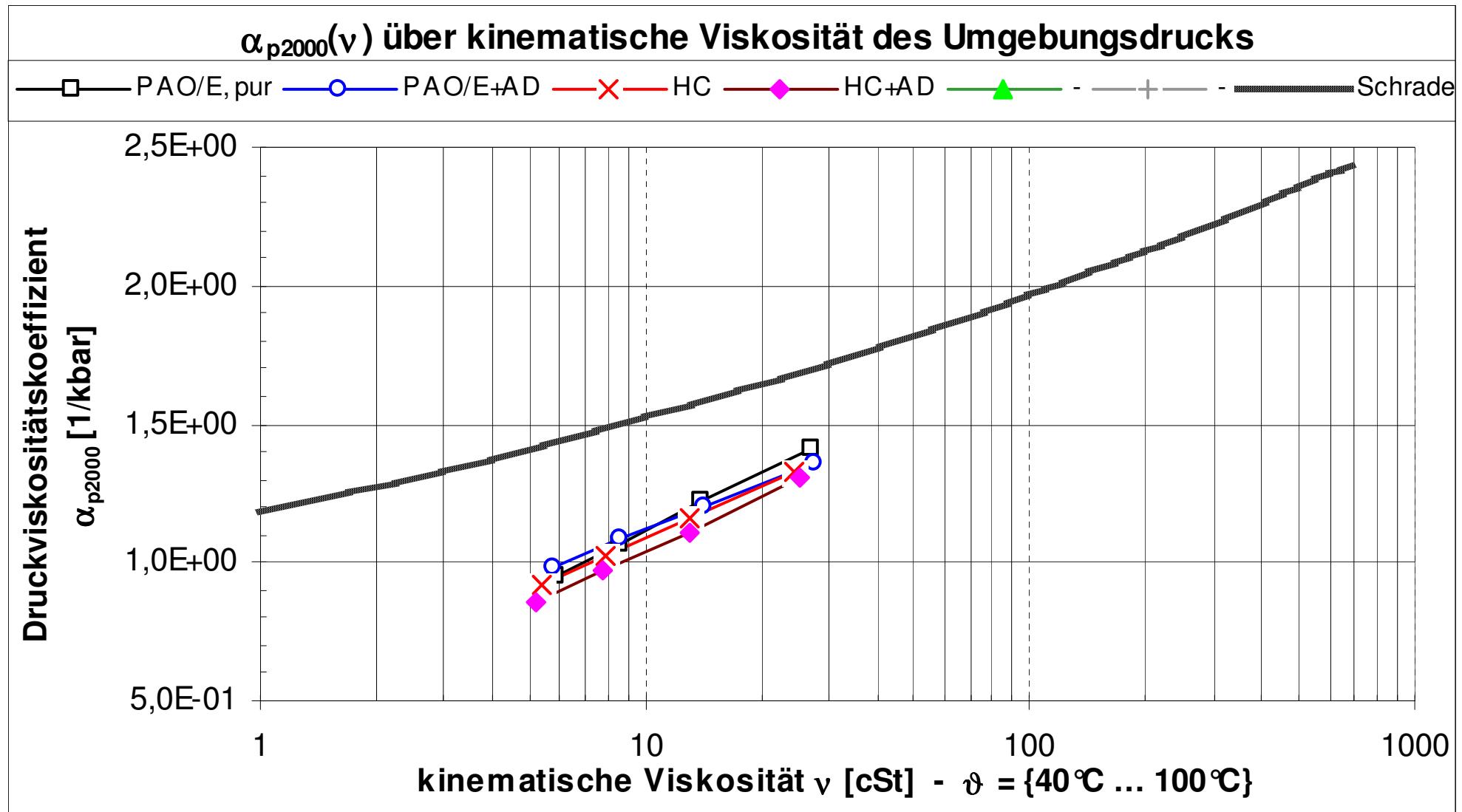
T. Kretschmer  
Folie 21



# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000\text{bar}}$ EP/AW-Additiv

T. Kretschmer  
Folie 22



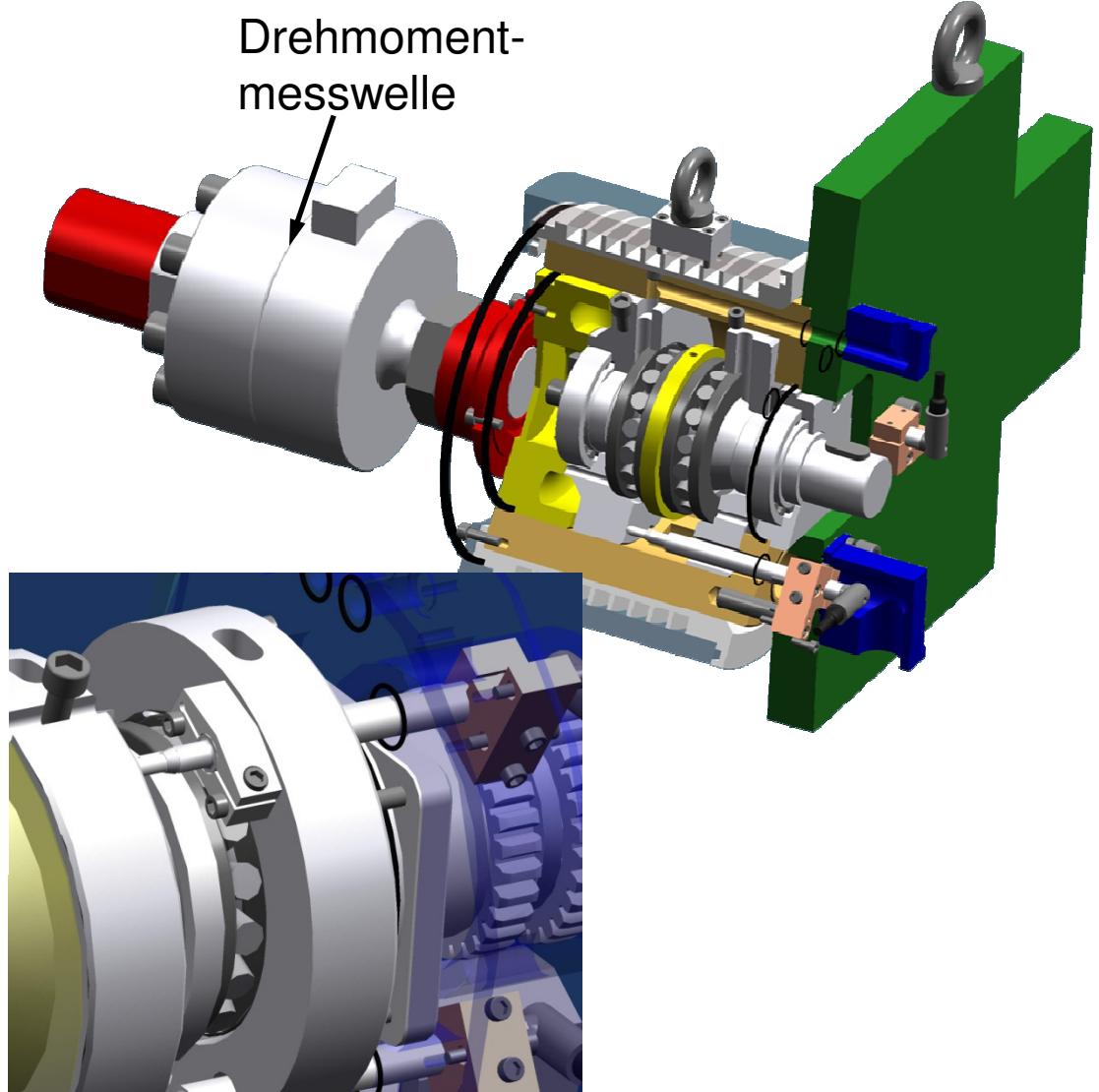
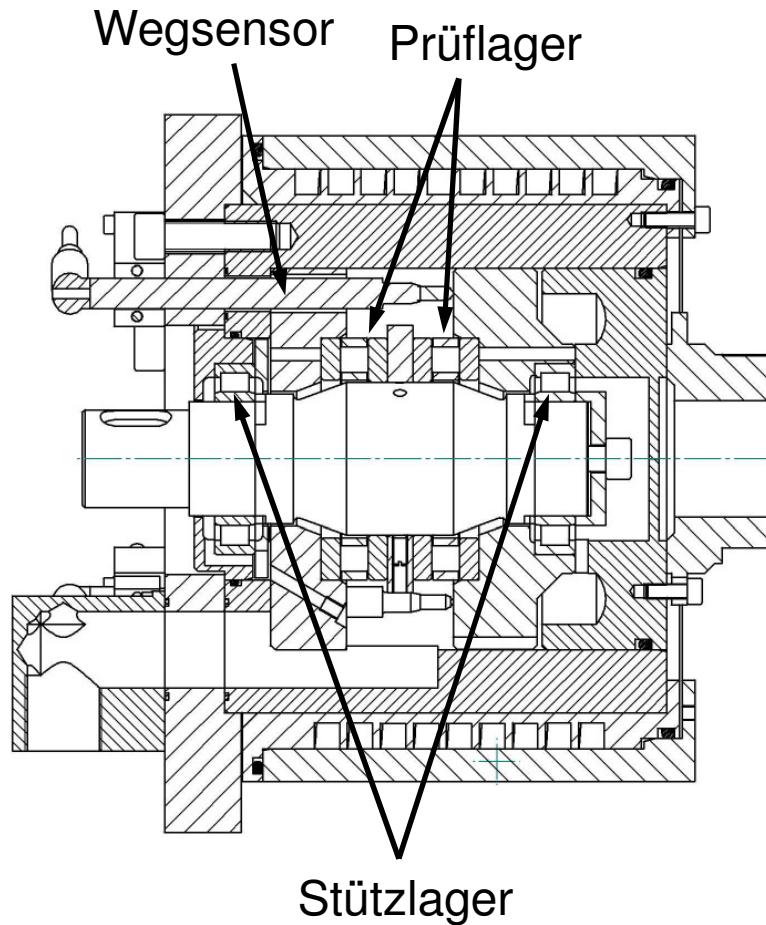
Zwischenbilanz:

- Viskosität der Öle ist stark von Temperatur und Druck abhängig
- Viskosität-Druck-Koeffizient der Öle ist stark vom Grundöl abhängig
- Viskosität-Druck-Koeffizient der Öle ist vom zugesetzten VI-Verbesserer abhängig
- Viskosität-Druck-Koeffizient ist kaum vom zugesetzten EP/AW-Additiv abhängig

- Schmierstoffe in WEA (**WindEnergieAnlagen**) ✓
  - Einfluss auf den Tribologischen Kontakt
  - Schmierstellen in WEA
  - Zielkonflikt bei der Schmierstoffauswahl
- Grundlagen Schmierfilmbildung ✓
  - Druckverteilung
  - EHD – Schmierfilmtheorie
  - Schmierstoffparameter
  - Messtechnische Ermittlung am IME
- Druckabhängige Schmierstoffparameter ✓
  - Einfluss verschiedener Grundöle
  - Einfluss verschiedener Additivierungen
- Experimentelle Schmierfilmhöhe
  - Gegenüberstellung von experimentell ermittelter und berechneter Schmierfilmhöhe
- Aktualisierung des GfT-Arbeitsblattes
- Ausblick weiterer Forschungstätigkeit

# Experimentelle Schmierfilmhöhe FE8-SDM

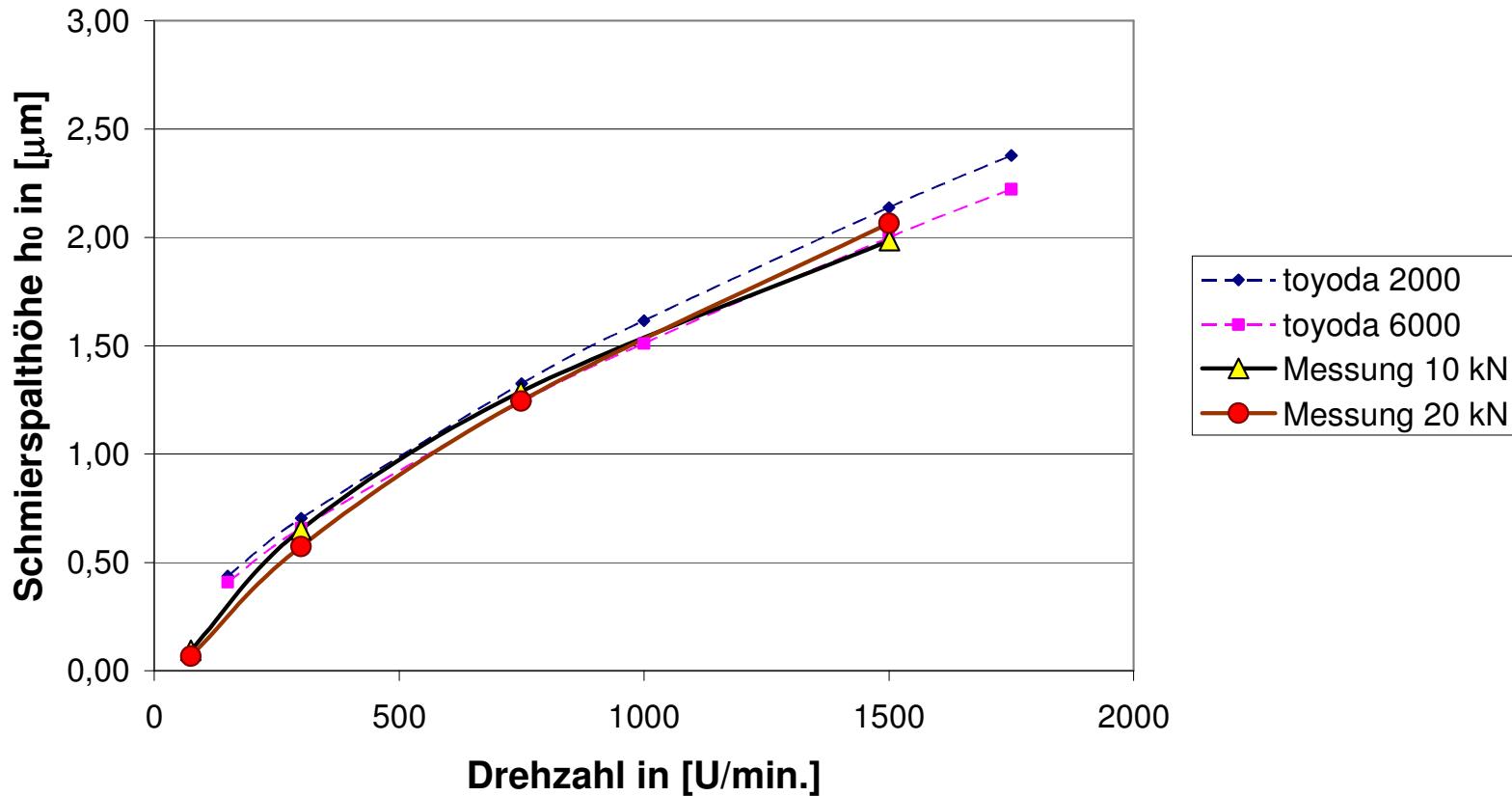
T. Kretschmer  
Folie 25



# Experimentelle Schmierfilmhöhe

## Gegenüberstellung experimentell – theoretisch FVA3

T. Kretschmer  
Folie 26



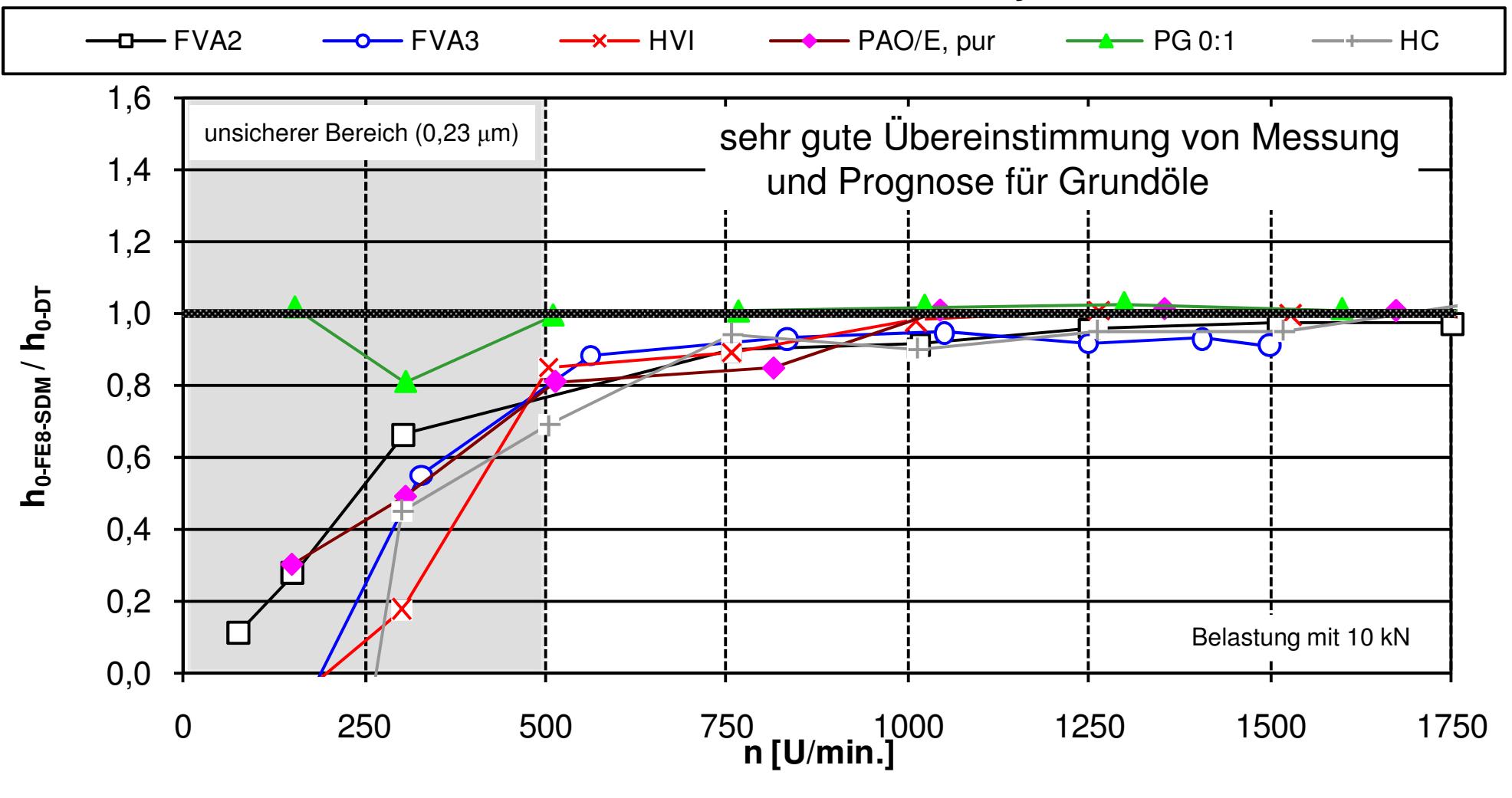
$$\text{Dowson / Toyoda: } h_0 = 3,06 \cdot \alpha_p^{0,56} \cdot \eta_0^{0,69} \cdot u^{0,69} \cdot w^{-0,1} \cdot E^{-0,03} \cdot R^{0,41}$$

# Experimentelle Schmierfilmhöhe

## Gegenüberstellung experimentell – theoretisch Grundöle

T. Kretschmer  
Folie 27

### Schmierfilmdicke FE8-SDM zu Theorie nach Toyoda über Drehzahl

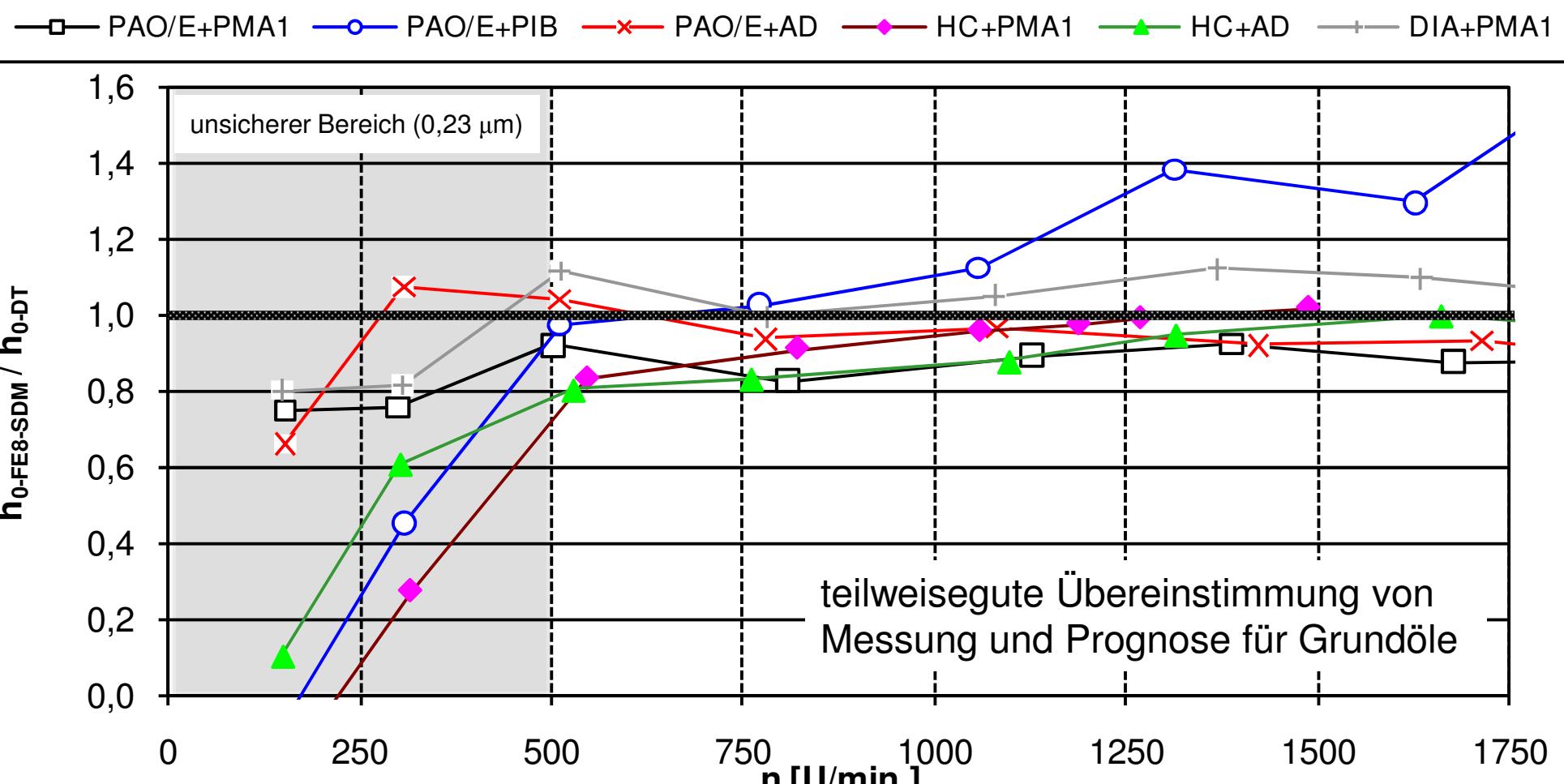


# Experimentelle Schmierfilmhöhe

## Gegenüberstellung experimentell – theoretisch Additive

T. Kretschmer  
Folie 28

### Schmierfilmdicke FE8-SDM zu Theorie nach Toyoda über Drehzahl



### Zwischenbilanz:

- Kein Unterschied der Schmierfilmhöhe bei einer Erhöhung der Last im FE8-SDM von 10 kN auf 20 kN
- Unsicherer Bereich der Messkette bei Schmierfilmhöhen  $< 0,2 \mu\text{m}$
- Gute Übereinstimmung von Messwerten und Berechnungsergebnissen für alle untersuchten Grundöltypen
- Gute Übereinstimmung von Messwerten und Berechnungsergebnissen für EP/AW und PMA1 versetzte Schmierstoffe
- Schmierfilmhöhe für PIB deutlich größer als berechnet (hohe Vorhersagesicherheit)

# GfT-Arbeitsblatt Nr.3

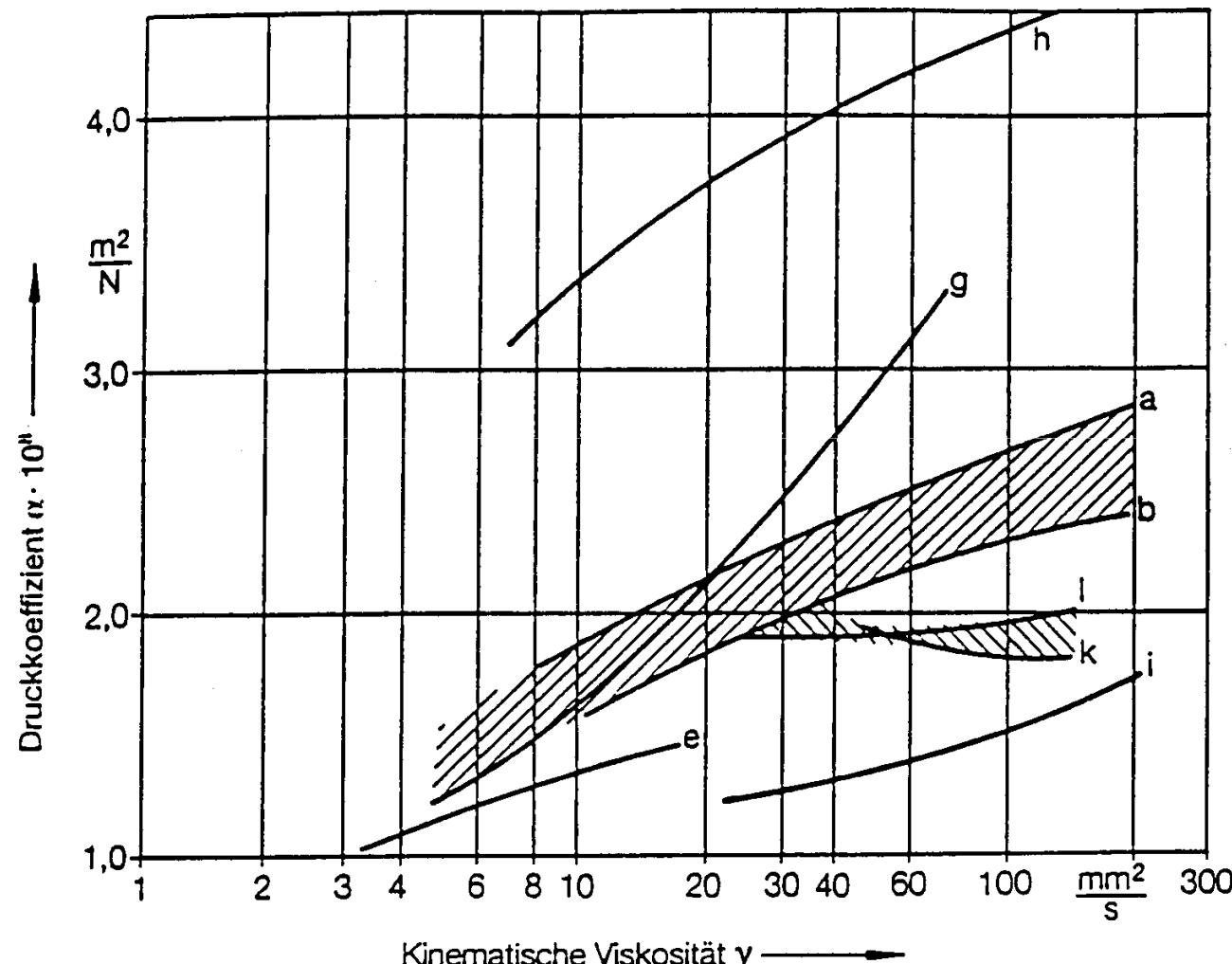
## Überarbeitung

T. Kretschmer  
Folie 30

Bild 3: Druckkoeffizient  $\alpha$  als Funktion der kinematischen Viskosität  $v$ , gültig für Druckbereich 0 - 2 000 bar

- a = naphthenbasisches Mineralöl
- b = paraffinbasisches Mineralöl
- e = Diester
- g = Triarylpophosphatester
- h = Fluorkohlenwasserstoff
- i = Polyglykol
- k,l = Silikone

### Legende GfT-Arbeitsblatt 1993



# GfT-Arbeitsblatt Nr.3

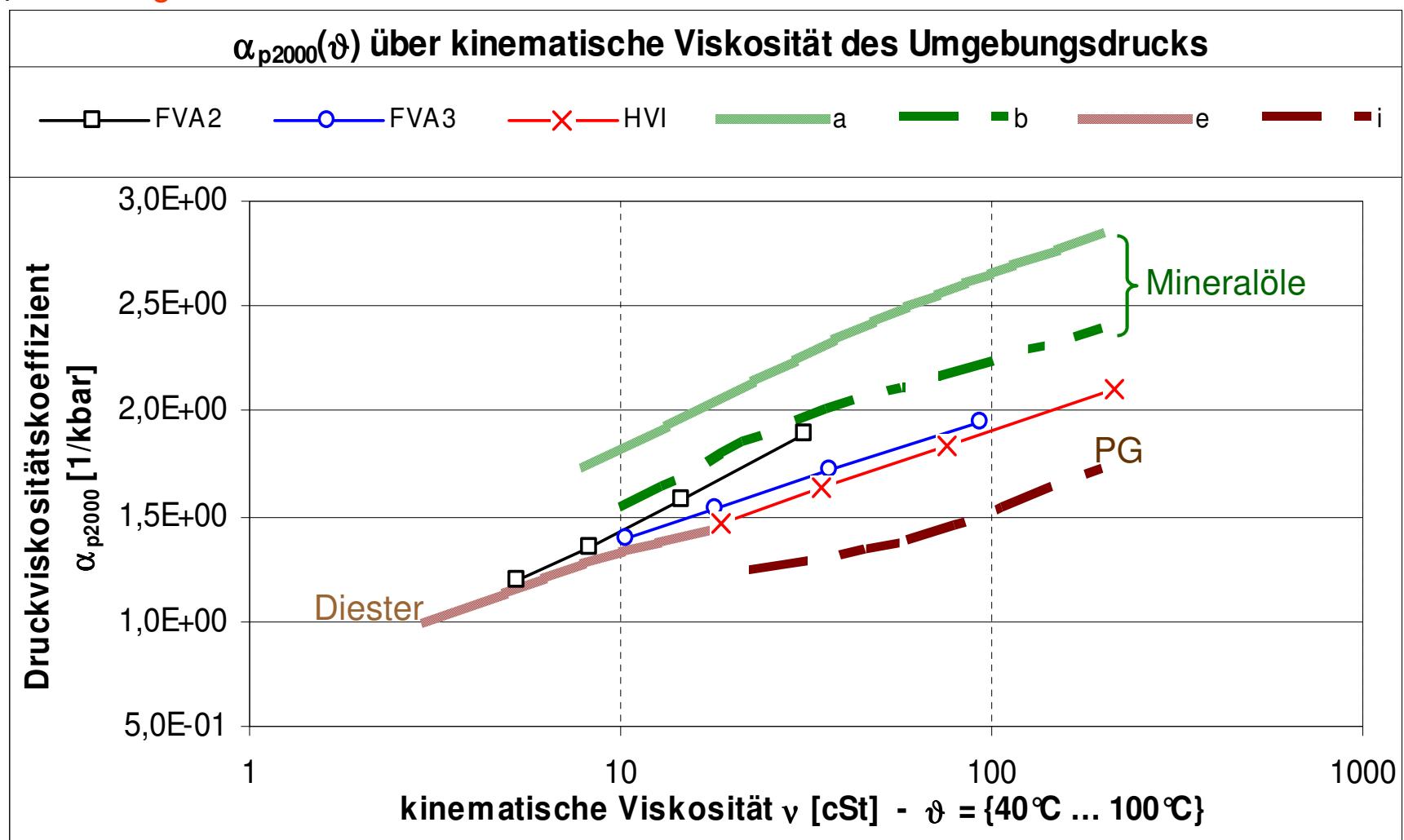
## Überarbeitung

T. Kretschmer  
Folie 31

Bild 3: Druckkoeffizient  $\alpha$  als Funktion der kinematischen Viskosität  $\nu$ , gültig für Druckbereich 0 - 2 000 bar

- a = naphthenbasisches Mineralöl
- b = paraffinbasisches Mineralöl
- e = Diester
- g = Triarylpophosphatester
- h = Fluorkohlenwasserstoff
- i = Polyglykol
- k,l = Silikone

### Legende GfT-Arbeitsblatt 1993



# GfT-Arbeitsblatt Nr.3

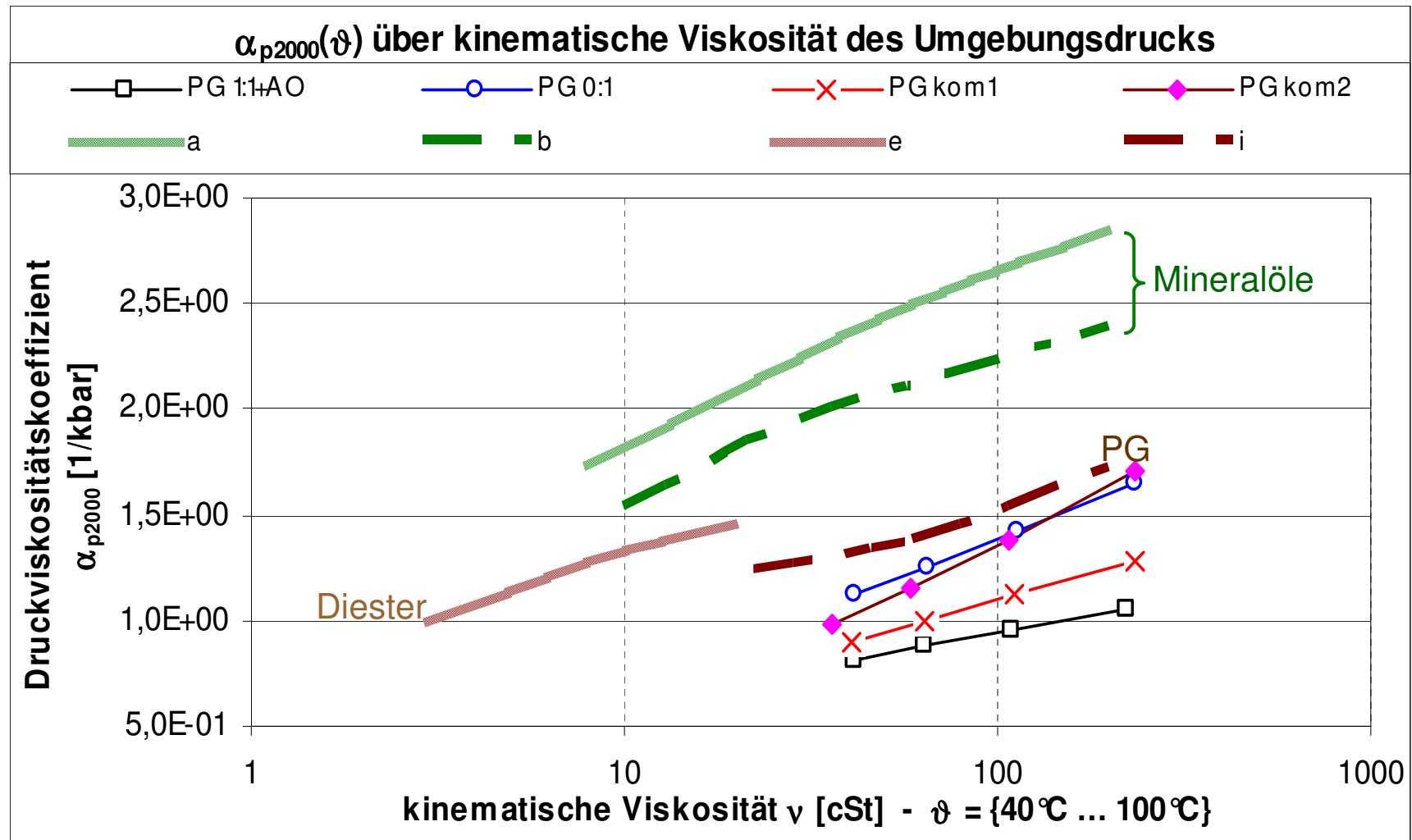
## Überarbeitung

T. Kretschmer  
Folie 32

Bild 3: Druckkoeffizient  $\alpha$  als Funktion der kinematischen Viskosität  $\nu$ , gültig für Druckbereich 0 - 2 000 bar

- a = naphthenbasisches Mineralöl
- b = paraffinbasisches Mineralöl
- e = Diester
- g = Triarylpophosphatester
- h = Fluorkohlenwasserstoff
- i = Polyglykol
- k,l = Silikone

### Legende GfT-Arbeitsblatt 1993



# GfT-Arbeitsblatt Nr.3

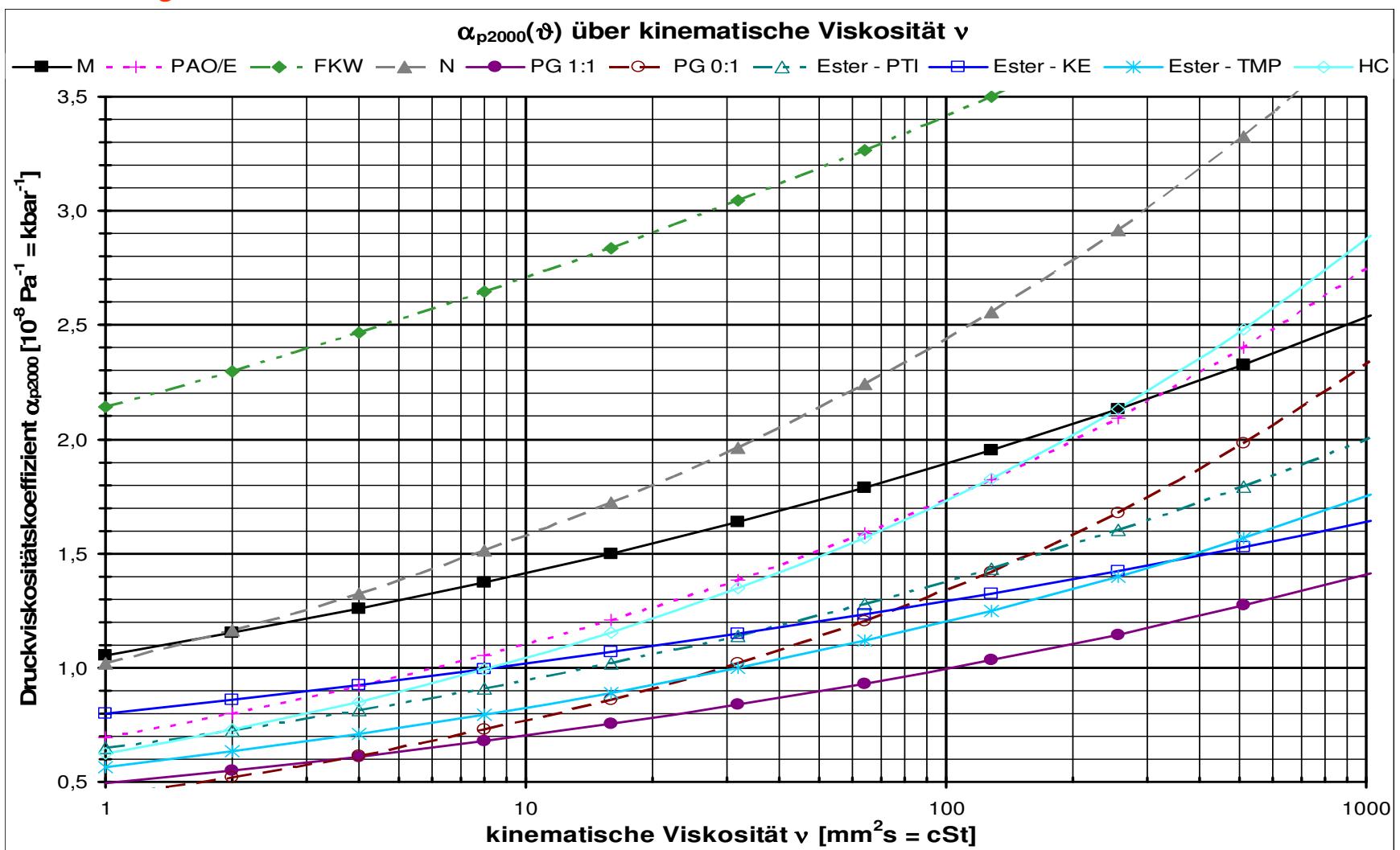
## Überarbeitung

T. Kretschmer  
Folie 33

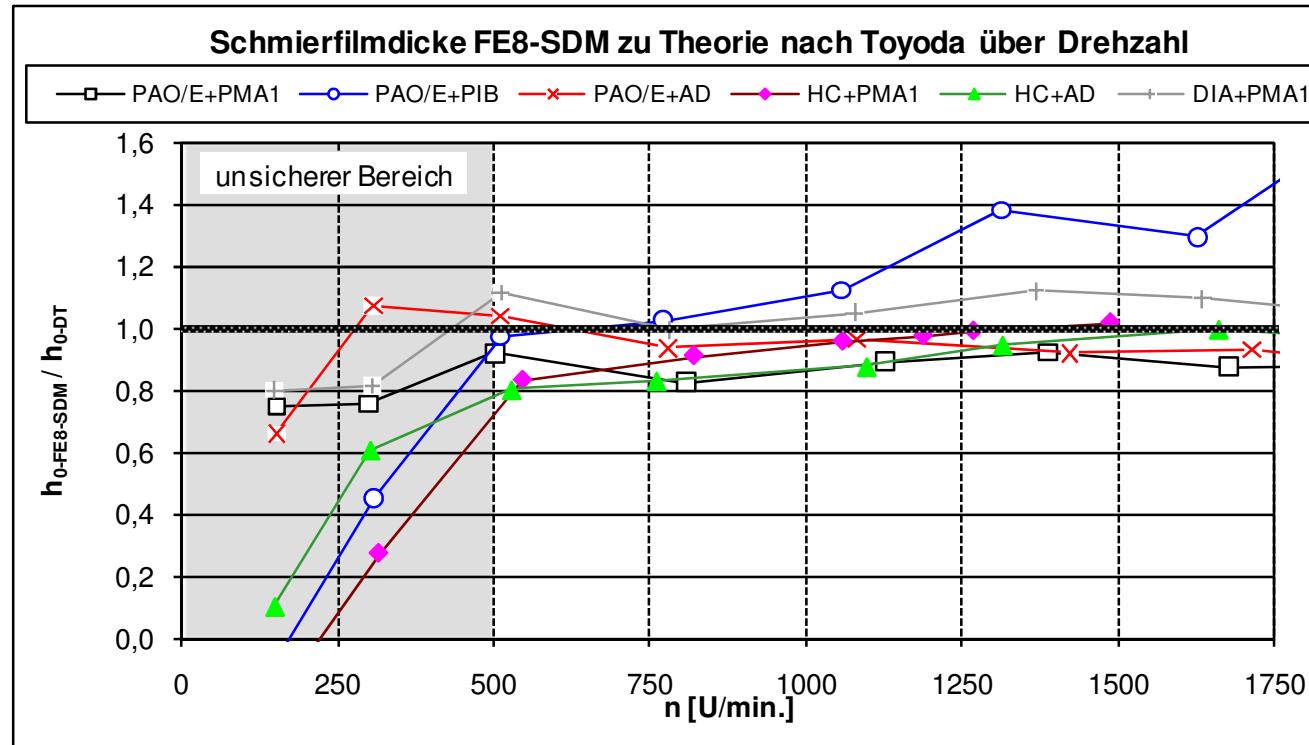
Bild 3: Druckkoeffizient  $\alpha$  als Funktion der kinematischen Viskosität  $v$ , gültig für Druckbereich 0 - 2 000 bar

- a = naphthenbasisches Mineralöl
- b = paraffinbasisches Mineralöl
- e = Diester
- g = Triarylpophosphatester
- h = Fluorkohlenwasserstoff
- i = Polyglykol
- k,l = Silikone

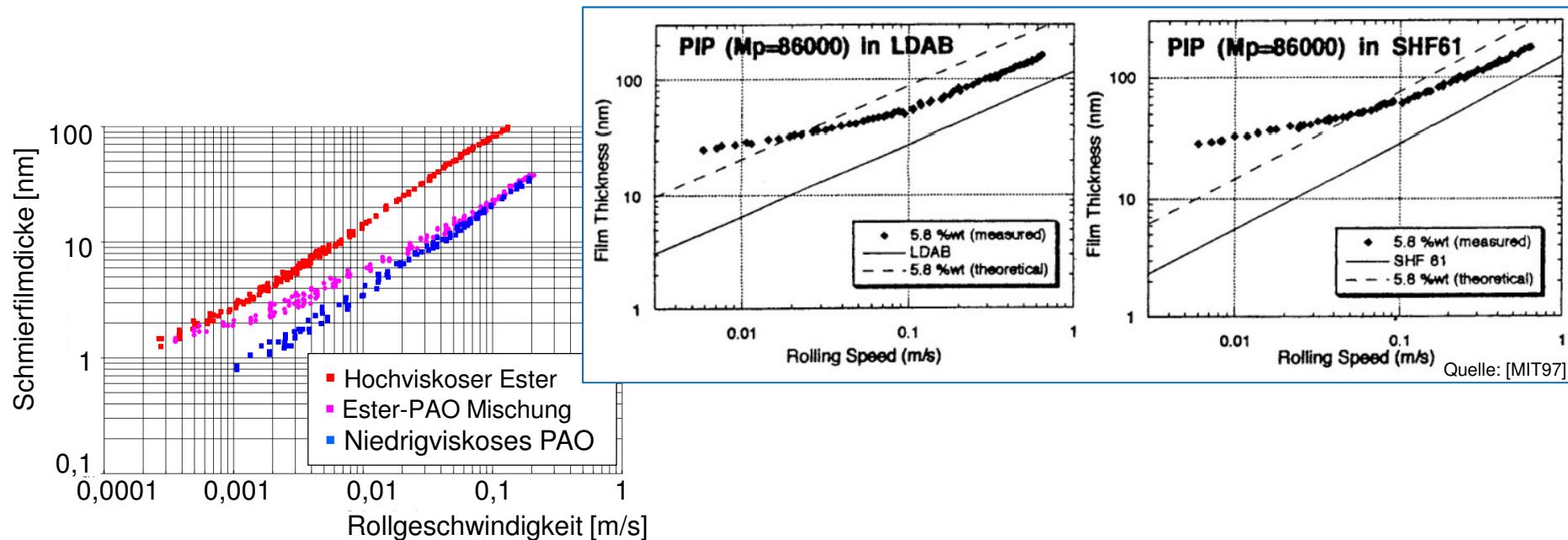
### Legende GfT-Arbeitsblatt 1993



- Wie genau ist die Vorhersage im dünnen Schmierspalt < 0,2 µm?

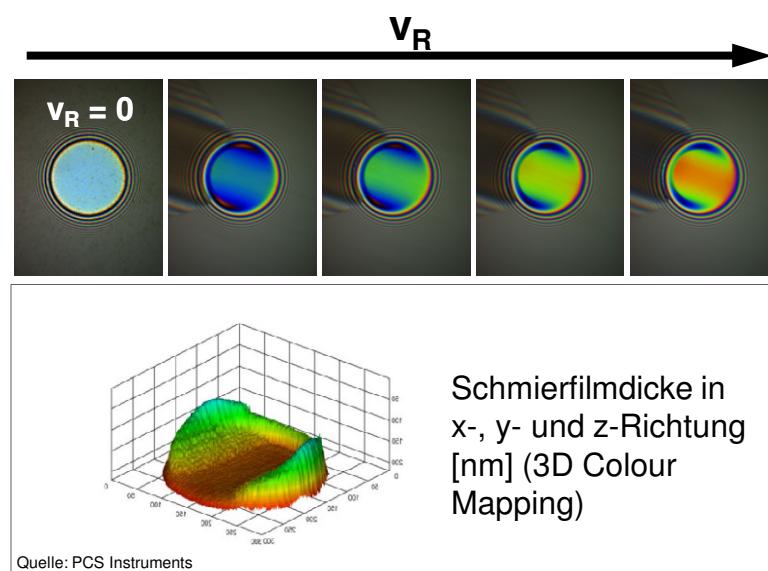


- Wie genau ist die Vorhersage im dünnen Schmierspalt  $< 0,2 \mu\text{m}$ ?
- Bei kleinen Schmierfilmdicken sind Abweichungen zur Prognose bekannt (Grenzschichteffekte gezeigt von Prof. Spikes, ...). Die Einflüsse von Grundöl und Additivierung auf die Schmierfilmbildung und das Reibmoment im Wälzlager sind in diesem Bereich unzureichend erforscht.



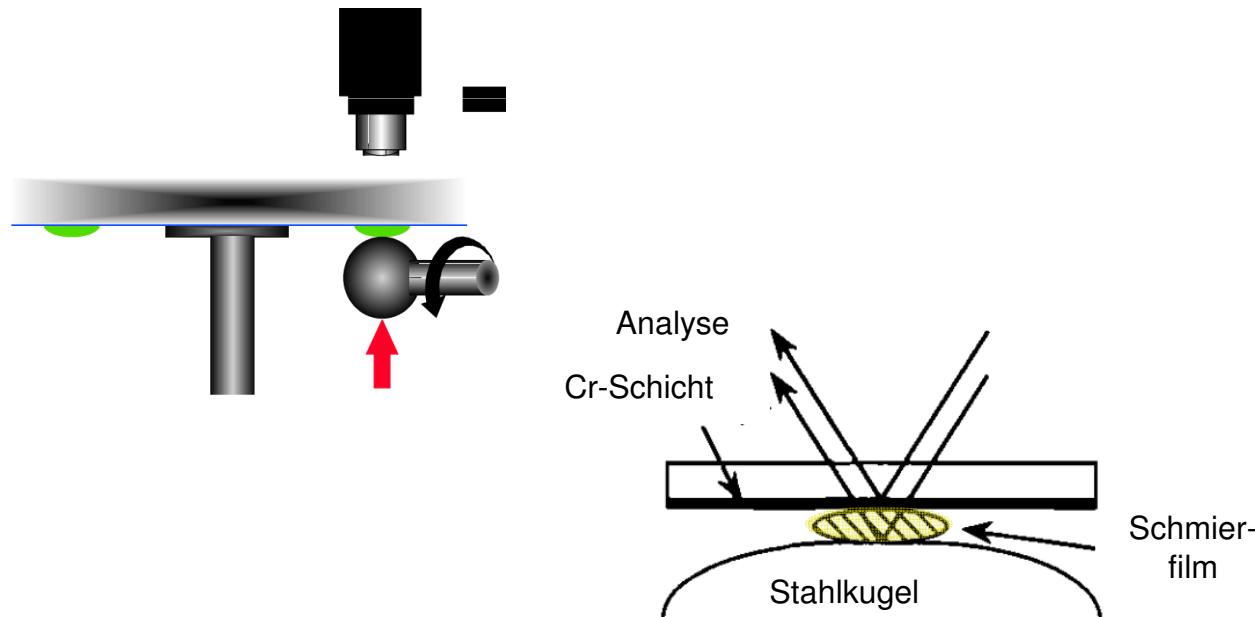
Quelle: [MIT97]

- Wie genau ist die Vorhersage im dünnen Schmierspalt  $< 0,2 \mu\text{m}$ ?
- Bei kleinen Schmierfilmdicken sind Abweichungen zur Prognose bekannt (Grenzschichteffekte gezeigt von Prof. Spikes, ...). Die Einflüsse von Grundöl und Additivierung auf die Schmierfilmbildung und das Reibmoment im Wälzlager sind in diesem Bereich unzureichend erforscht.
  - FVA580: Untersuchungsschwerpunkt sehr dünner Schmierfilme  $< 0,2 \mu\text{m}$
  - Analysen am EHL-Tribometer der Firma PCS-Instruments (Prof. Spikes)

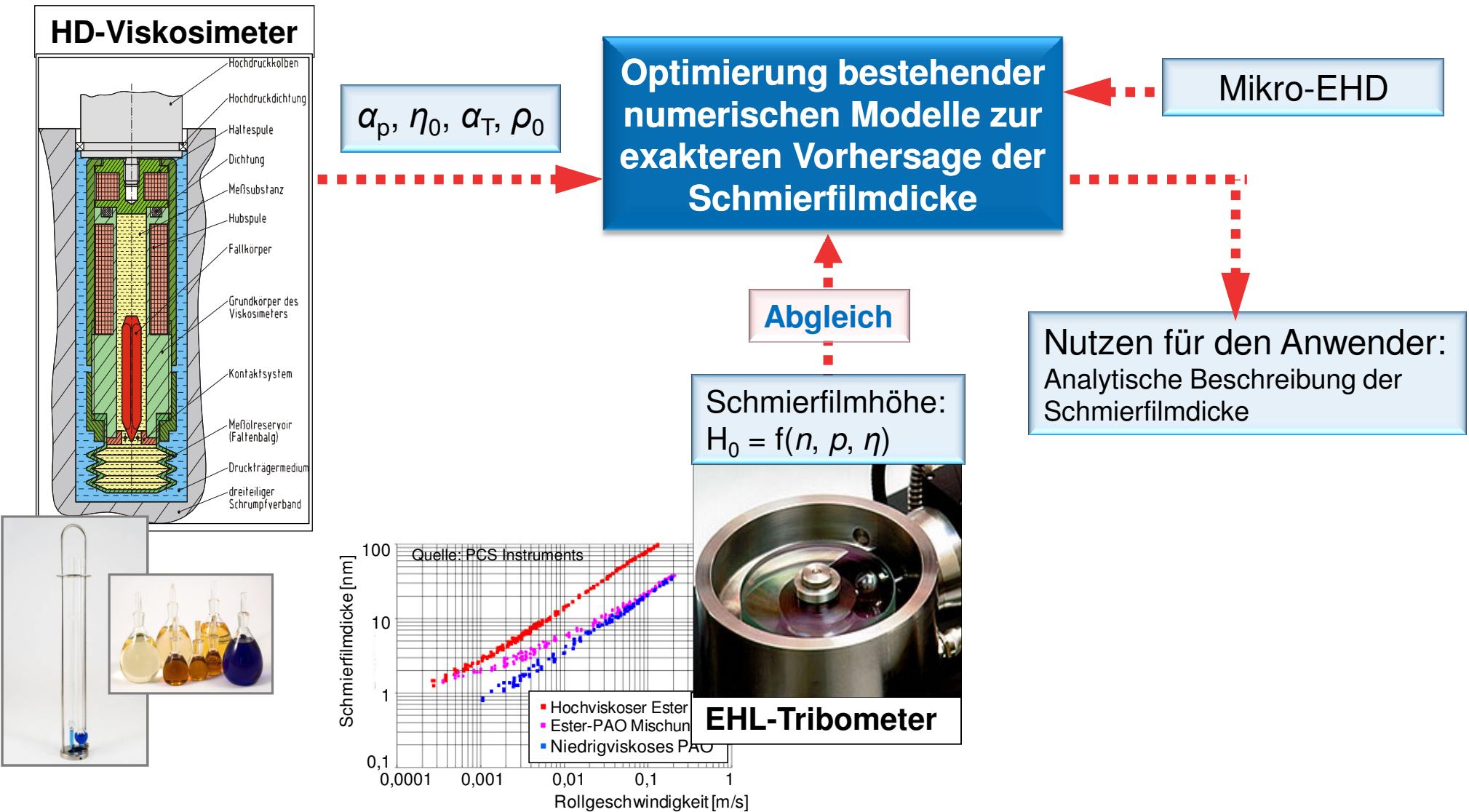


### Messprinzip: Interferometrie

- Vergleich von zwei reflektierten Lichtstrahlen: einer wird auf Chromschicht, der andere auf Stahlkugel reflektiert und anschließend detektiert
- anhand der Entfernung der Lichtstrahlen kann die Höhe des Schmierfilms ermittelt werden



Quelle: PCS Instruments



### Zusammenfassung:

- Zielkonflikt im tribologischen Kontakt durch verschiedener Schmierstoffe gelöst (abgeschwächt)
- Schmierstoffparameter zur Beurteilung des Schmierungszustands ( $\lambda$  und  $\kappa$ )
  - Viskositätsindex (VI), Viskositäts-Temperatur-Koeffizient  $\alpha_T$
  - Viskositäts-Druck-Koeffizient  $\alpha_p$
- Untersuchungsergebnisse zum Viskositäts-Druck-Koeffizienten
  - Grundöltyp hat starken Einfluss
  - VI-Verbesserer (PMA, PIB) hat starken Einfluss
  - EP/AW-Additiv (Anglamol 2000) hat kaum Einfluss
- Gegenüberstellung von Prüfstands- und Berechnungsergebnisse zur Ermittlung der Schmierfilmhöhe
  - Kein deutlicher Unterschied der Schmierfilmhöhe bei Belastung mit 10 und 20 kN
  - Guten Vorhersagegenauigkeit der Schmierfilmhöhe nach Dowson/Toyoda
    - Für verschiedene Grundöltypen
    - VI-Verbesserer PMA und EP/AW-Additiv
    - Im Bereich von Schmierfilmhöhen  $> 0,2 \mu\text{m}$
    - Ermittelte Schmierfilmhöhe für PIB versetztes Öl ist größer als berechnet (hohe Sicherheit)
- Berücksichtigung der Forschungsergebnisse bei der Überarbeitung des GfT-Arbeitsblattes
- Ausblick
  - Überprüfung der Vorhersagegenauigkeit der Schmierfilmdicke im Bereich  $< 0,2 \mu\text{m}$

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Dipl.-Ing. Torsten Kretschmer  
Telefon: +49(0)241 80-95640  
Telefax: +49(0)241 80-92256  
E-mail: [kretschmer@ime.rwth-aachen.de](mailto:kretschmer@ime.rwth-aachen.de)