

## Kennwort: Druck-Viskosität

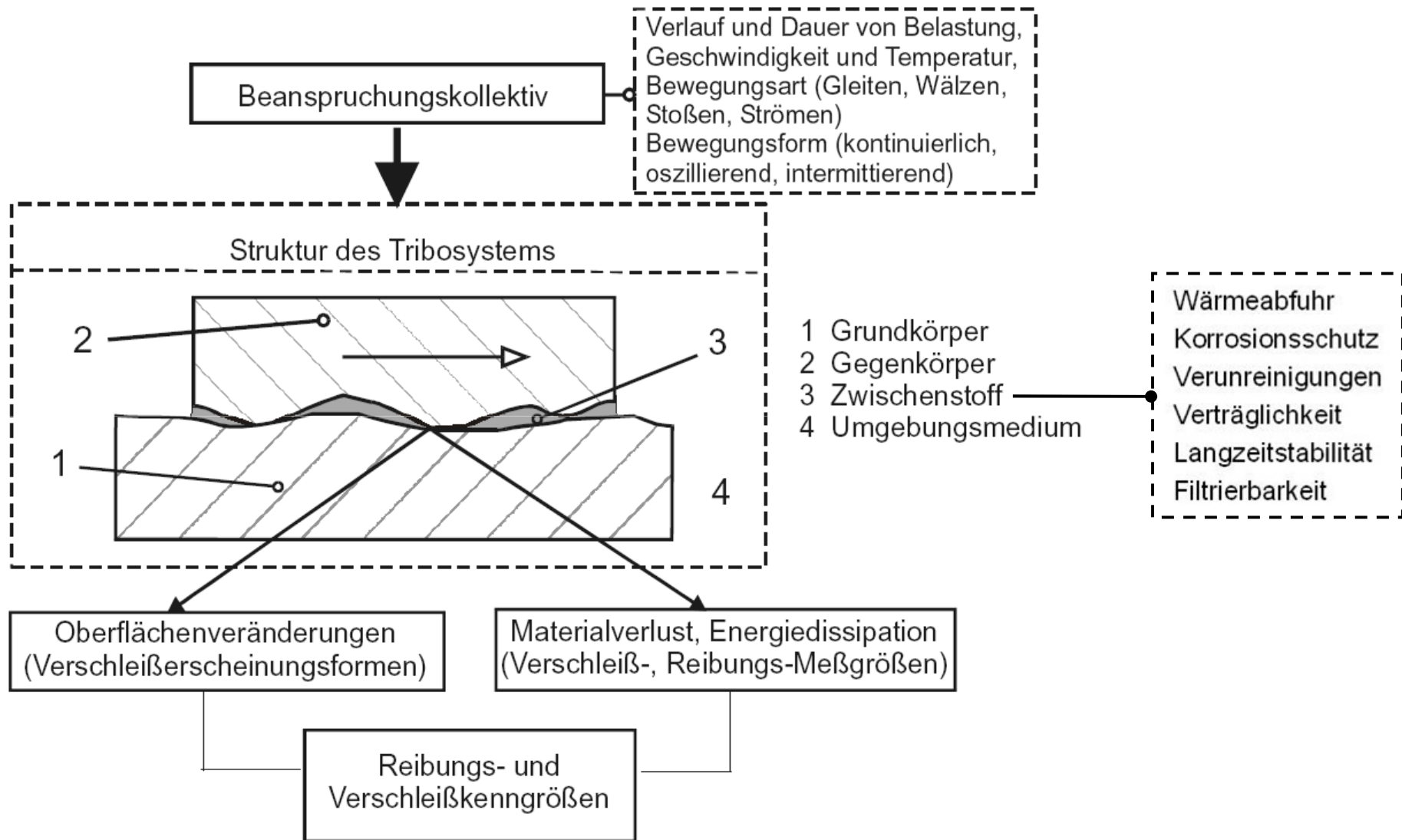
Datum: 10.06.10

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

- Schmierstoffe in WEA (**W**ind**E**nergie**A**nlagen)
  - 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

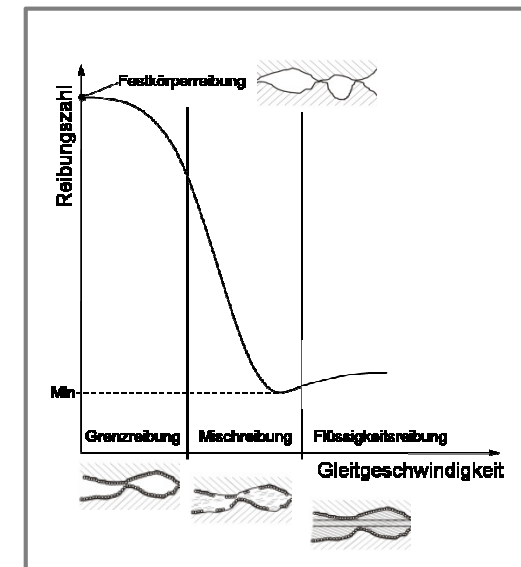
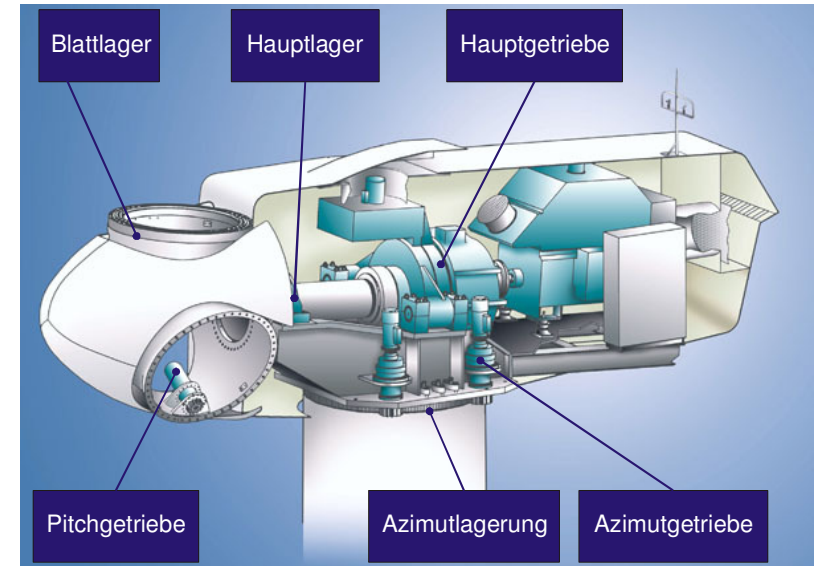
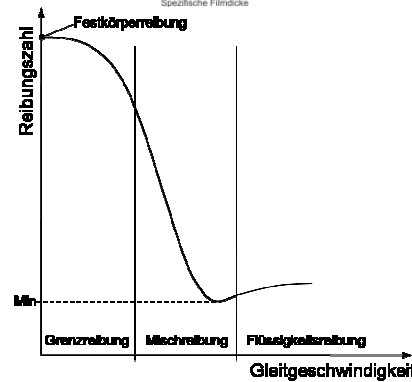
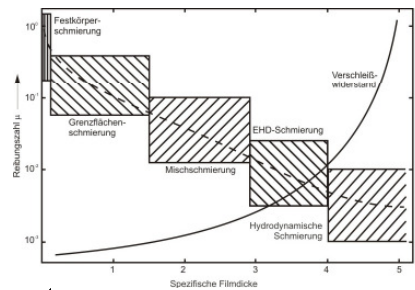
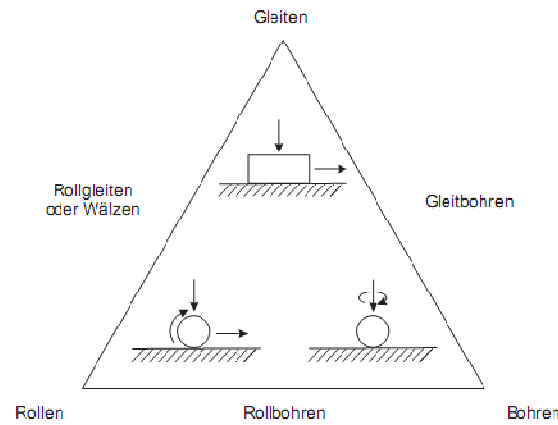


### Bewegungsart/-form

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

### Reibungszustand

- Grenzreibung
- Mischreibung
- Flüssigkeitsreibung



### Zielkonflikt

#### Soll-Zustand

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



#### 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

Quelle: Internet

Produktname	Hersteller	Grundöltyp
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
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

Soll

- Flüssigkeitsreibung
- Mischreibung für ge
- Guten Korrosionssch
- Gleichbleibendes L
- (Scherstabilität, Alte
- Gute Filtrierbarkeit
- Gute **Verträglichke**
- Materialien
- Geringer temperatur
- Hohes **Lasttragver**

nd

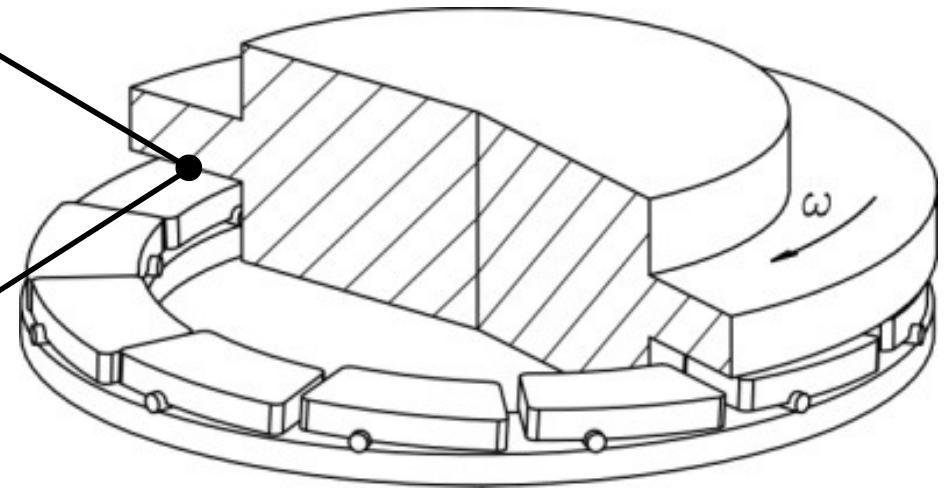
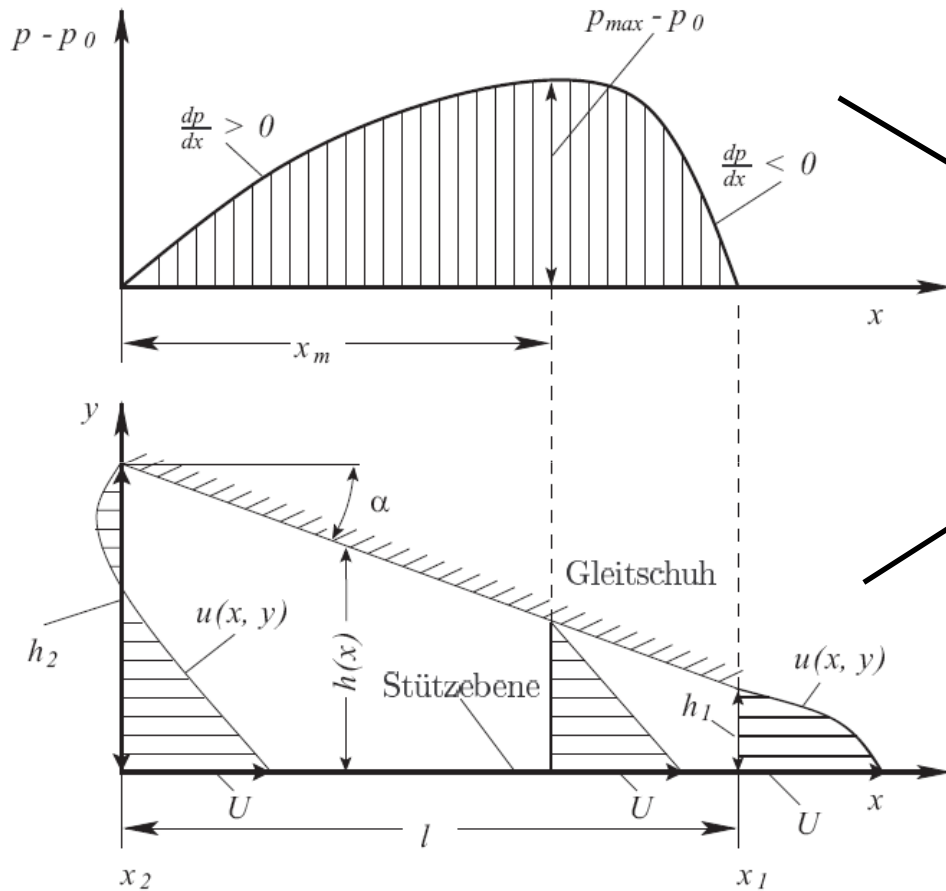
szillierender  
**uslaufvorgängen,**  
tationären  
bar  
ischen Kontakts durch  
hl, **Wassergehalt,**  
stoff, Schmierstoff,  
**erflächenenergie,**

Lösung:

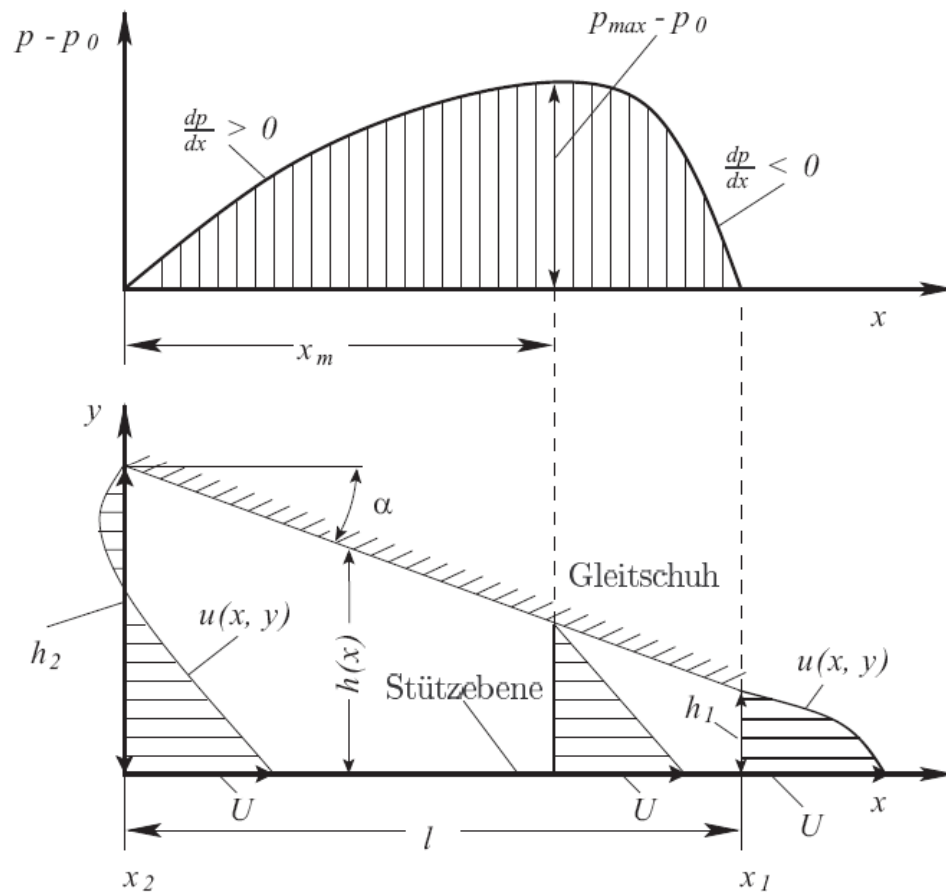
- Ausk
- ausr

erungen

ungen



Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im unendlich breiten konvergenten Schmierpalt



Druck- und Geschwindigkeitsverteilung im unendlich breiten konvergenten Schmier-spalt

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

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

- REYNOLDSS**che Differentialgleichung

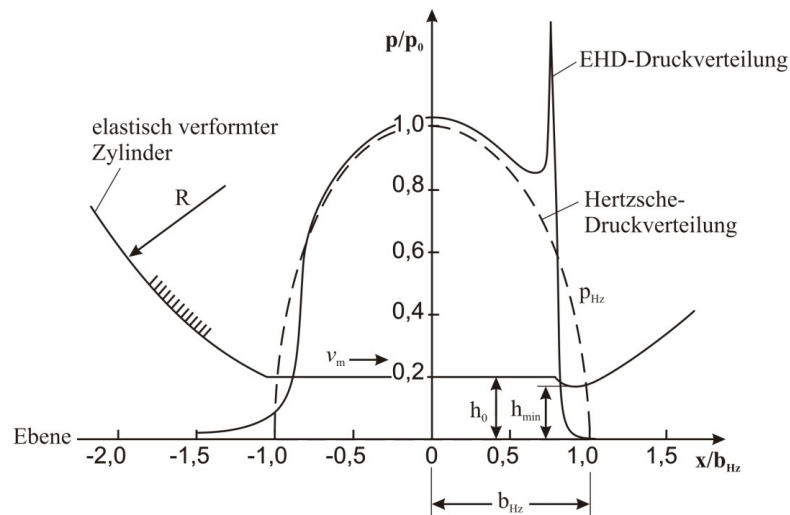
$$\frac{\partial}{\partial x} = \left( \frac{h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 12 \frac{\partial h}{\partial t} + 6U \frac{\partial h}{\partial x} = 0, \text{ für stationären Betrieb}$$

- 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





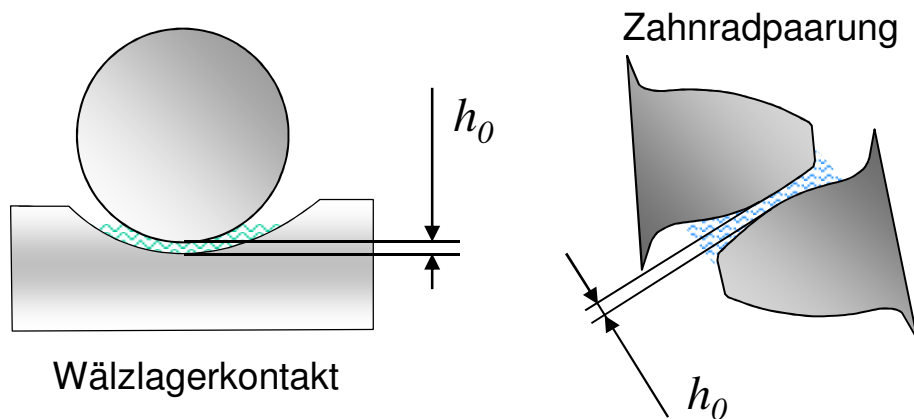
Druckverteilung im EHD – Schmierpalt

- analytische Berechnung der Schmierfilmdicke auf Grundlage der Arbeit von Dowson / Higginson
  - klassische Theorie der **Hydrodynamik**
  - Theorie der **elastischen** Festkörperdeformation

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

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

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

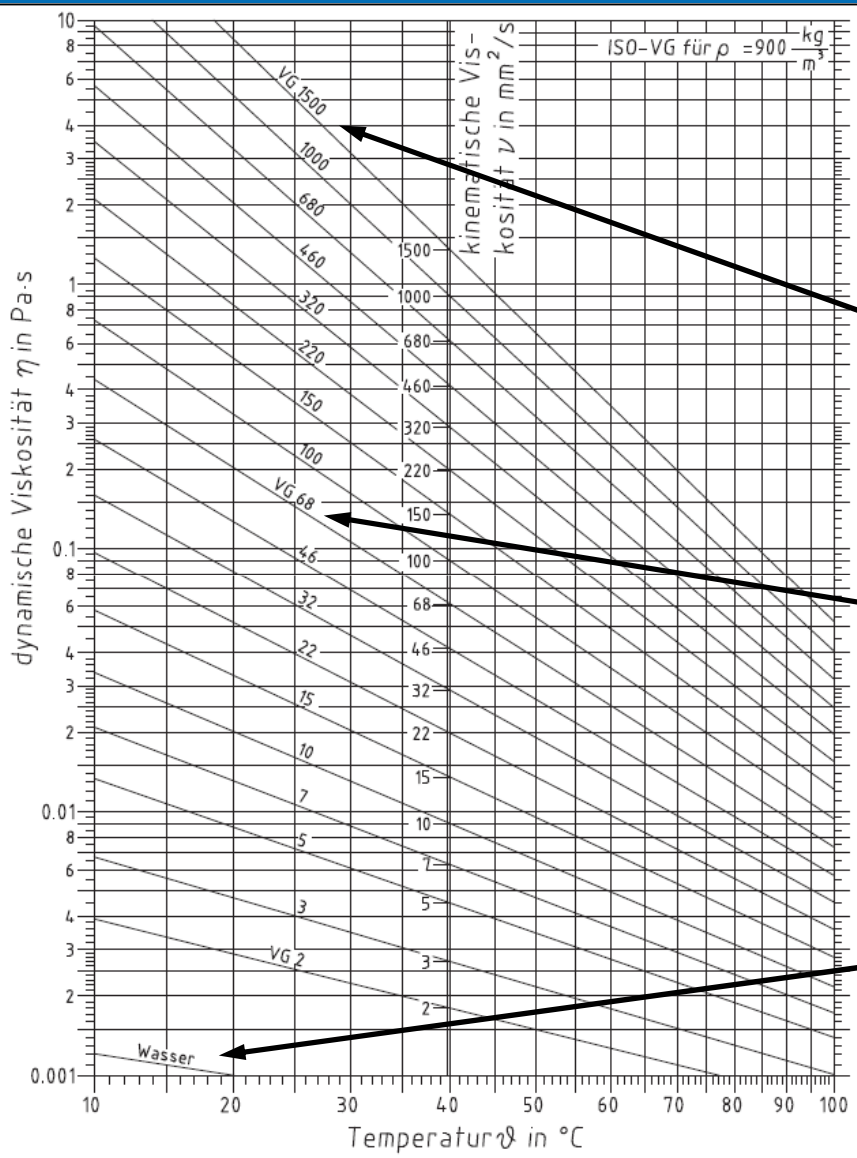


Ziel:

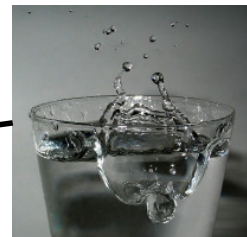
- Berechnung der Schmierfilmhöhe
- Quantifizierung des Schmierungs Zustands

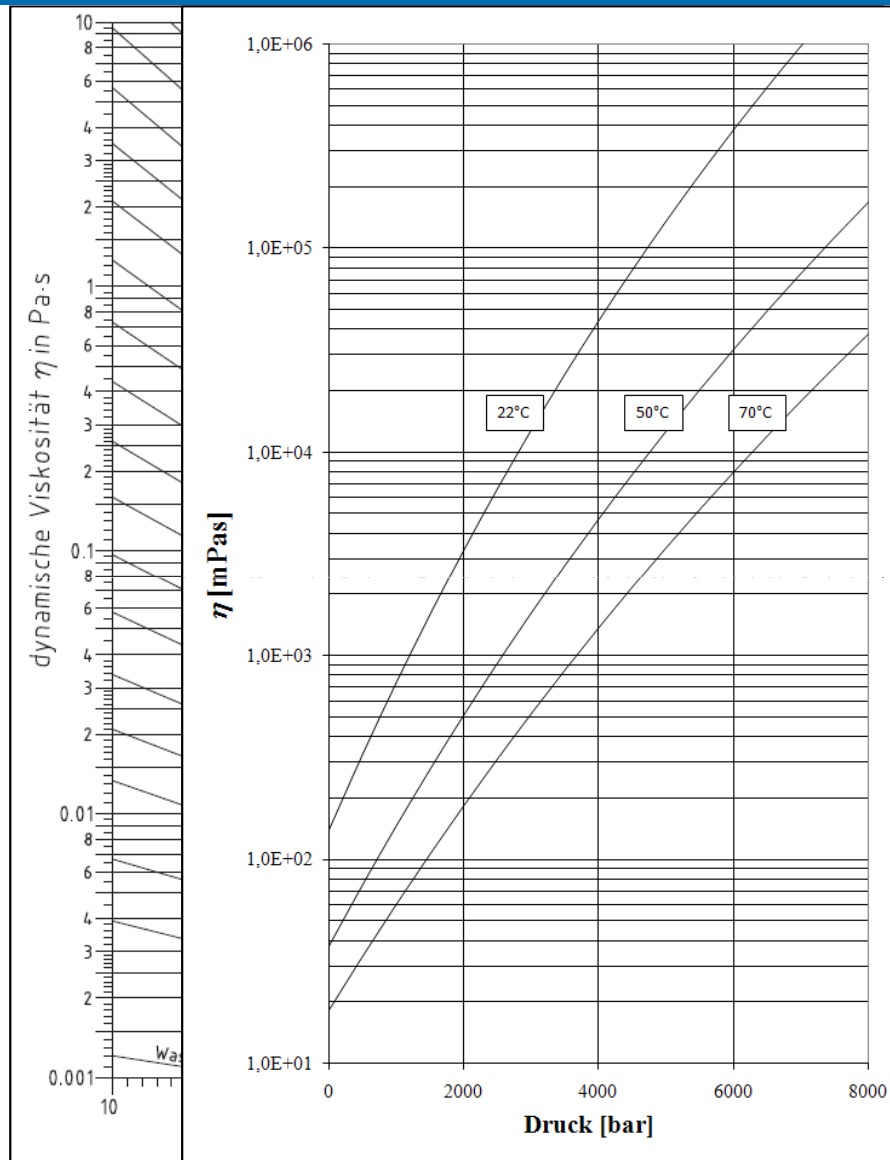
# Grundlagen Schmierfilmbildung

## Schmierstoffparameter

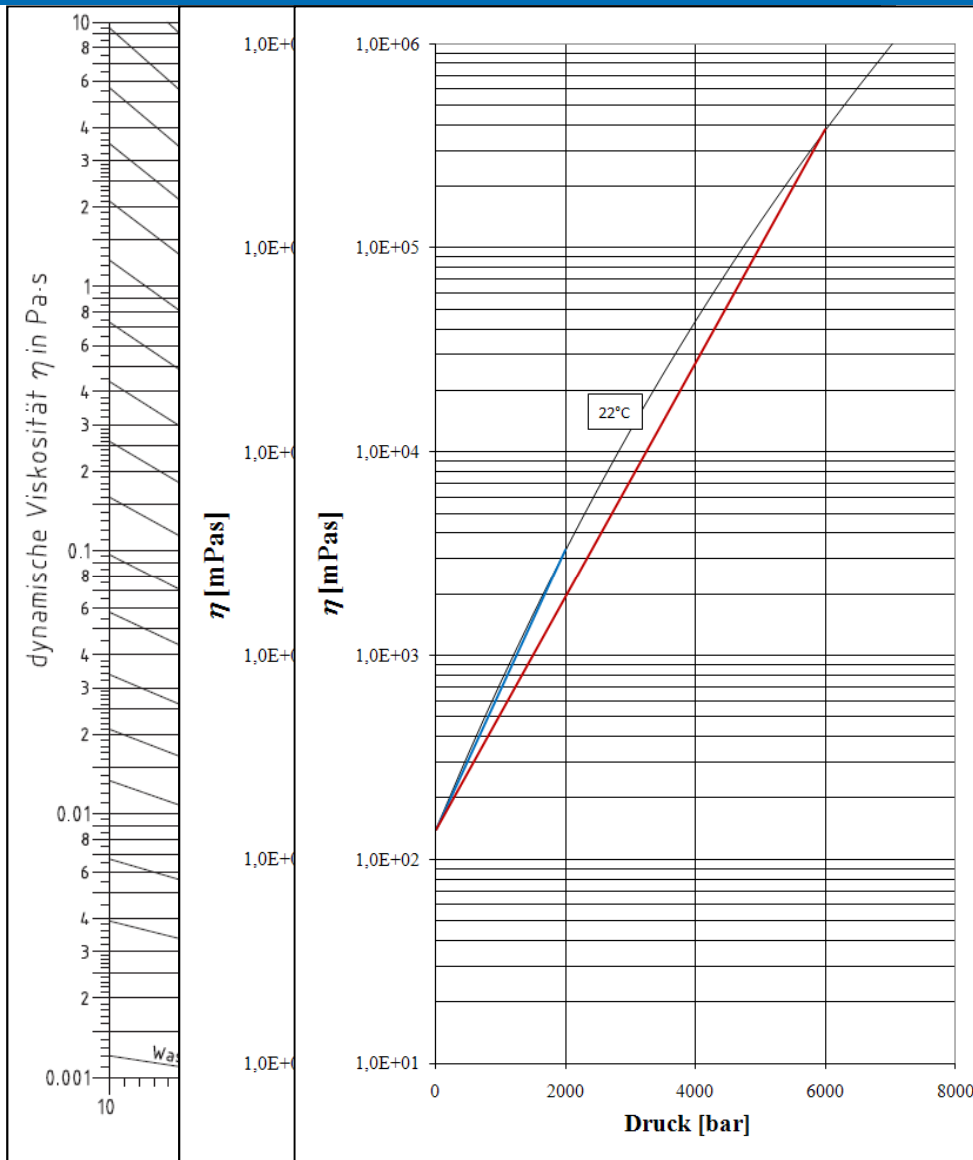


- Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit
  - Viskositätsindex VI-Index (DIN ISO 2909)
  - Viskositäts-Temperatur-Koeffizient  $\alpha_T$  (DIN 51563)





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



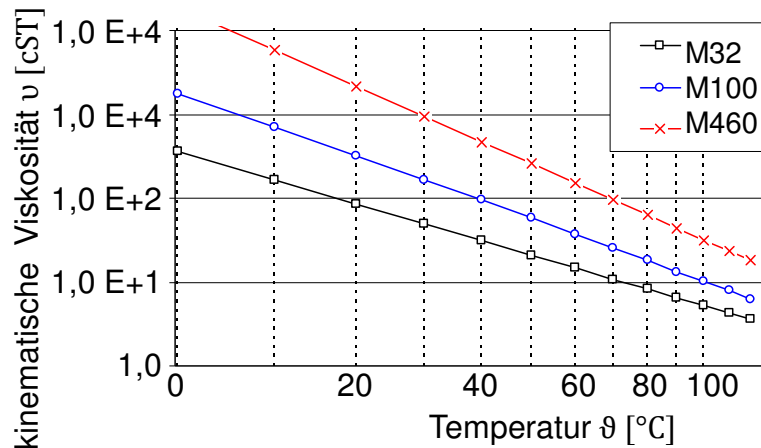
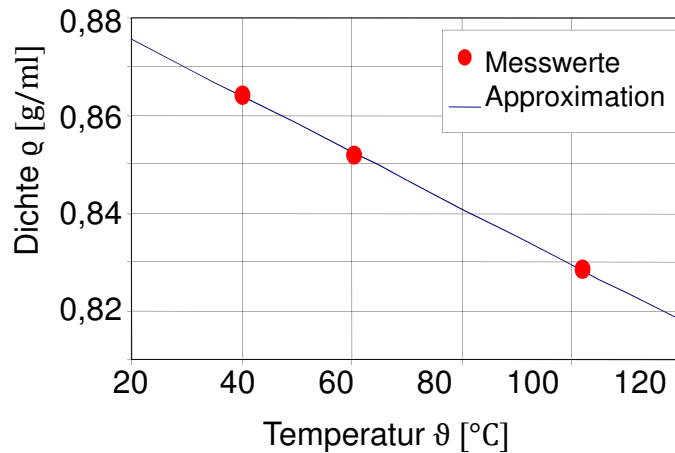
- Viskositäts-Temperatur-Abhängigkeit
  - Viskositätsindex VI-Index (DIN ISO 2909)
  - Viskositäts-Temperatur-Koeffizient  $\alpha_T$  (DIN 51563)
- Viskositäts-Druck-Abhängigkeit
  - Viskositäts-Druck-Koeffizient  $\alpha_p$
- Approximation der Viskositäts-Druck-Abhängigkeit (Sekante am Viskositätsverlauf)

- Barusgleichung:  $\eta(\vartheta, p) = \eta_0 \cdot e^{\alpha_{Barus} \cdot p}$

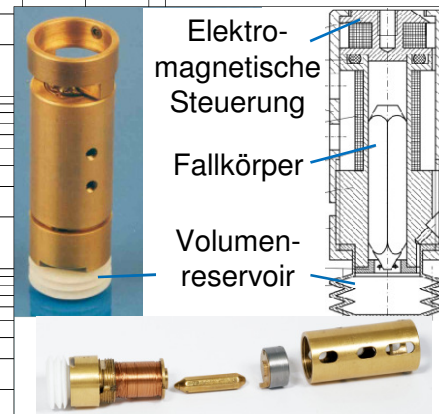
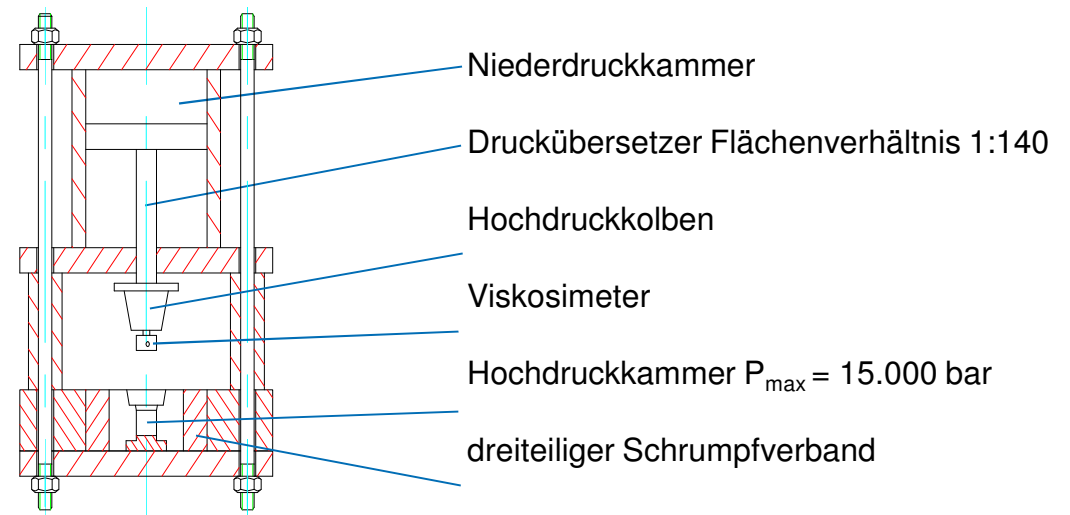
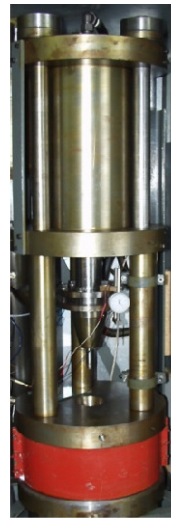
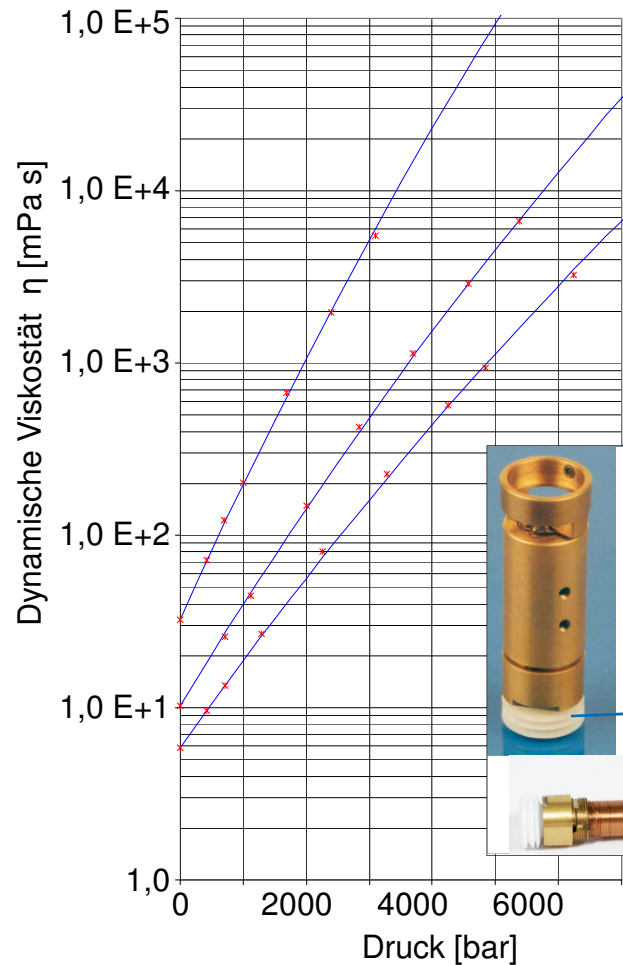
- Modulansatz nach IME:

$$\alpha_{Barus} = \alpha_{Modul(IME)} = \frac{[\ln \eta - \ln \eta_0]}{p - p_0} = \frac{1}{a_1 + a_2 \cdot \vartheta + (b_1 + b_2 \cdot \vartheta)p}$$

- genaue Vorhersage der dyn. Viskosität
- exakte Prognose der Schmierfilmhöhe



- 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



- Dynamische Viskosität im Bereich von 0 bis 8000 bar und Temperaturen bis max. 70°C bestimmbar
- Viskositäts-Druck-Koeffizient ( $\alpha_p$ )

### Grundöltypen:

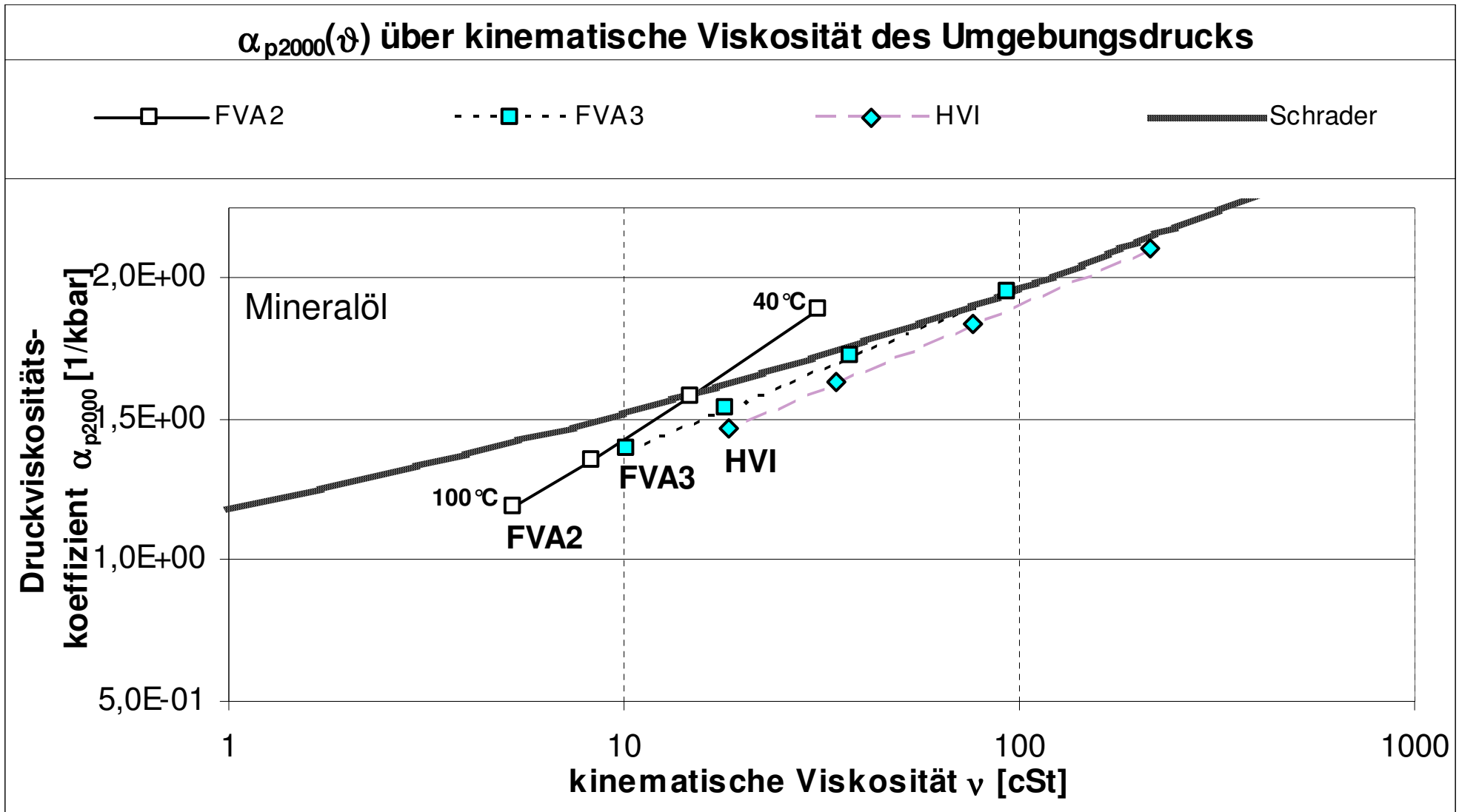
- Mineralöle (M)
- Poly $\alpha$ -olefine (PAO)
- Polyglykole (PG)
- Ester (E)
- Hydrocracks (HC)

### Modellschmierstoffe:

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

# Druckabhängige Schmierstoffparameter

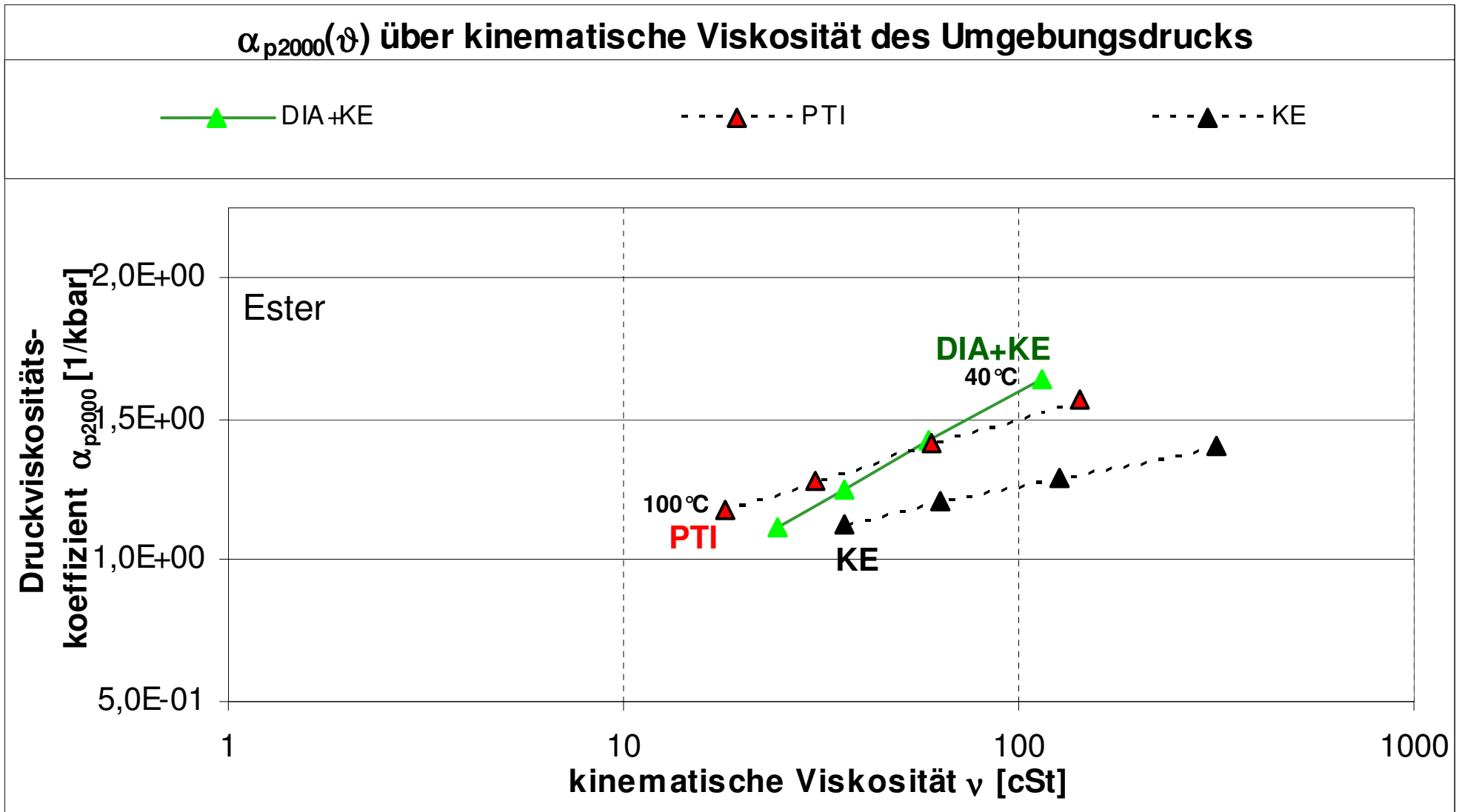
## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000bar}$ Mineralöl





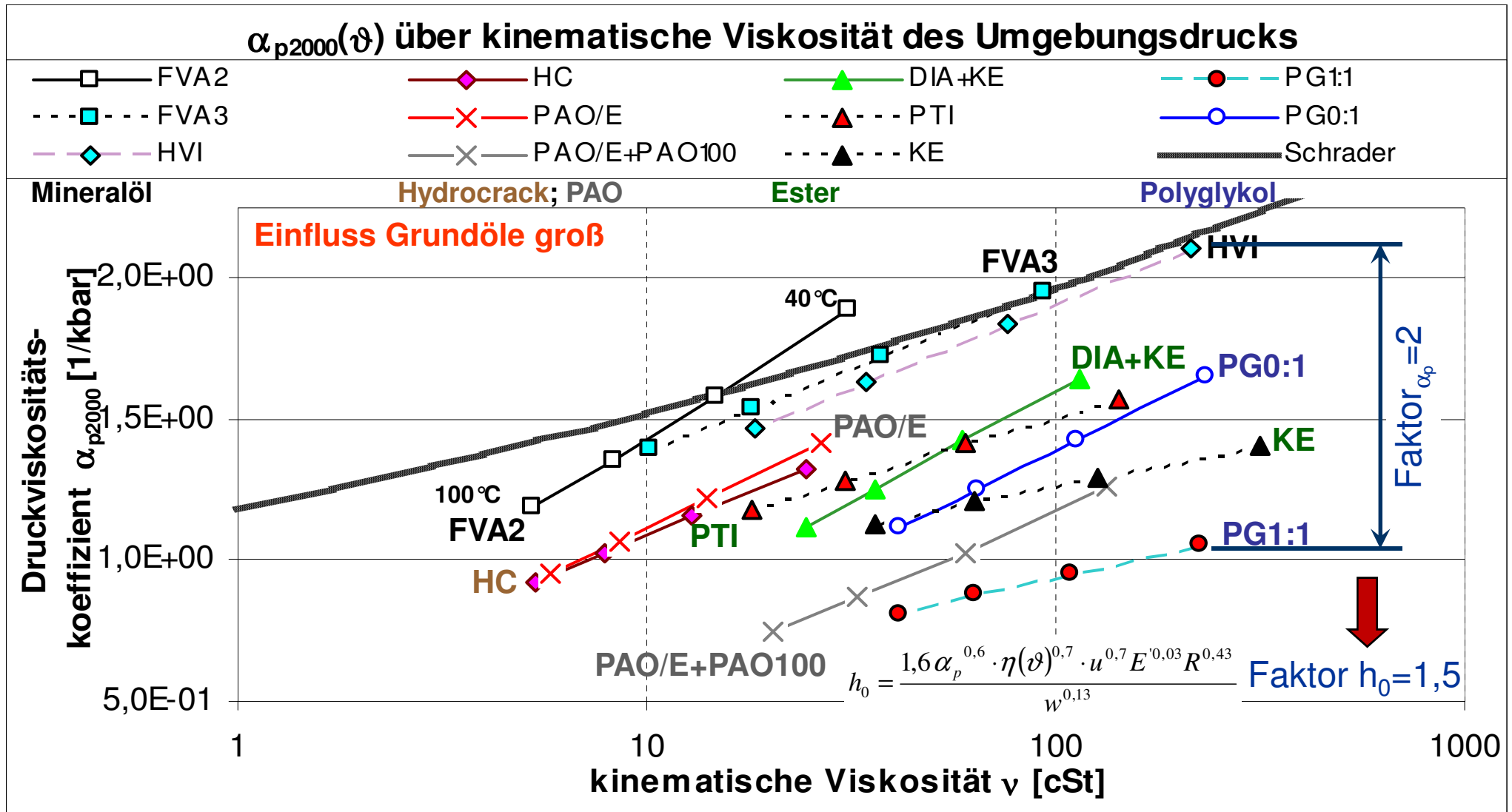
# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000bar}$ Ester



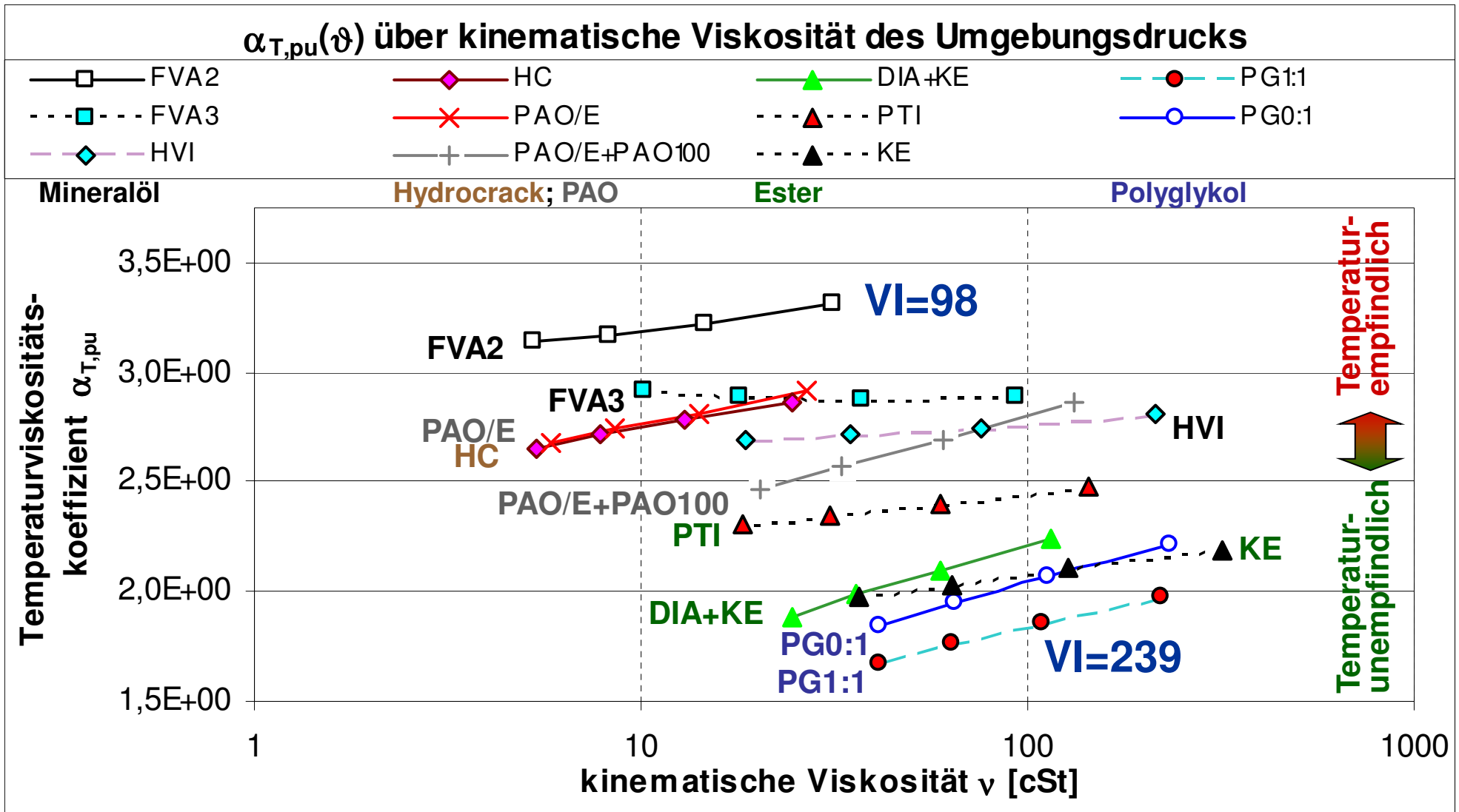
# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000bar}$ Grundöle



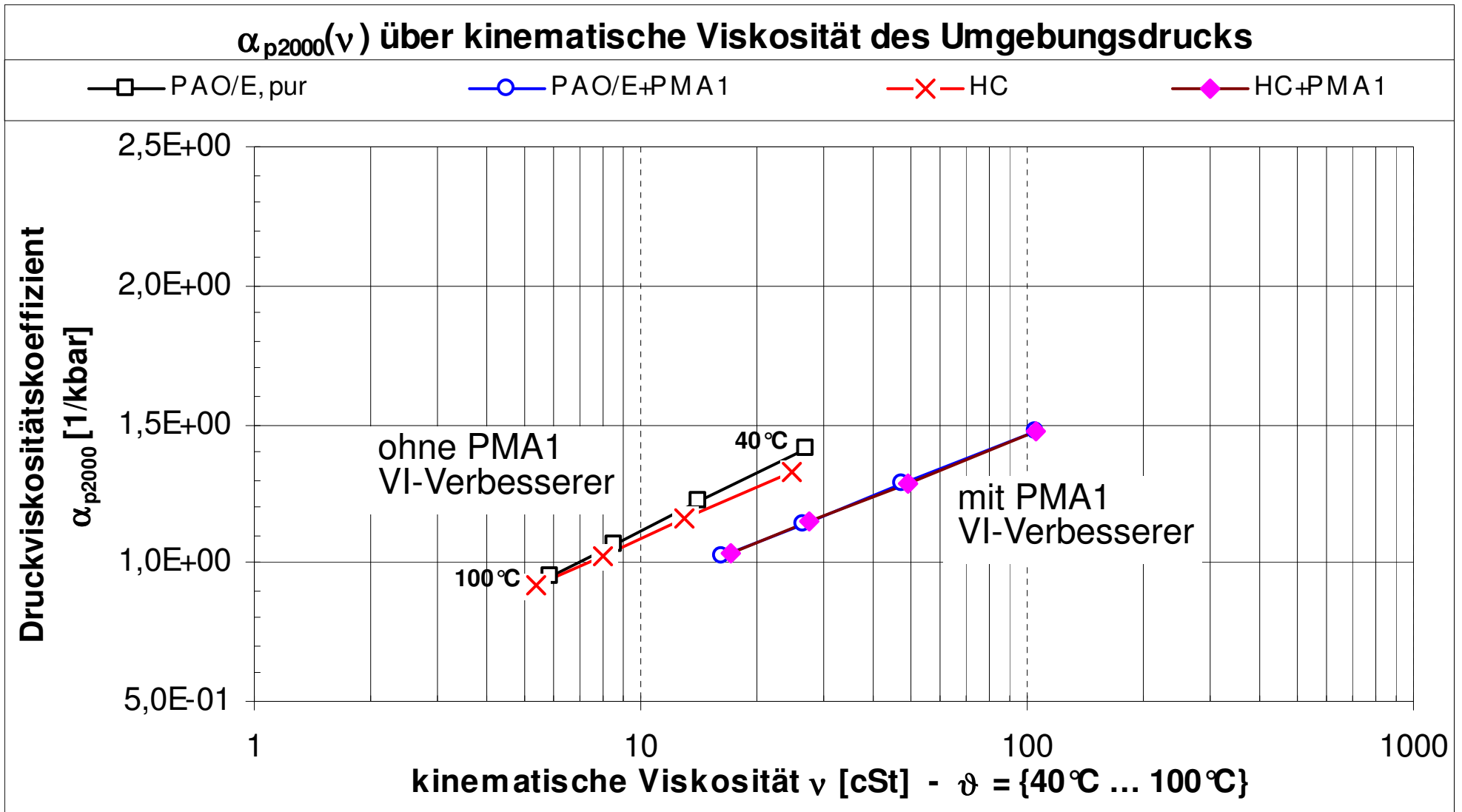
# Druckabhängige Schmierstoffparameter

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



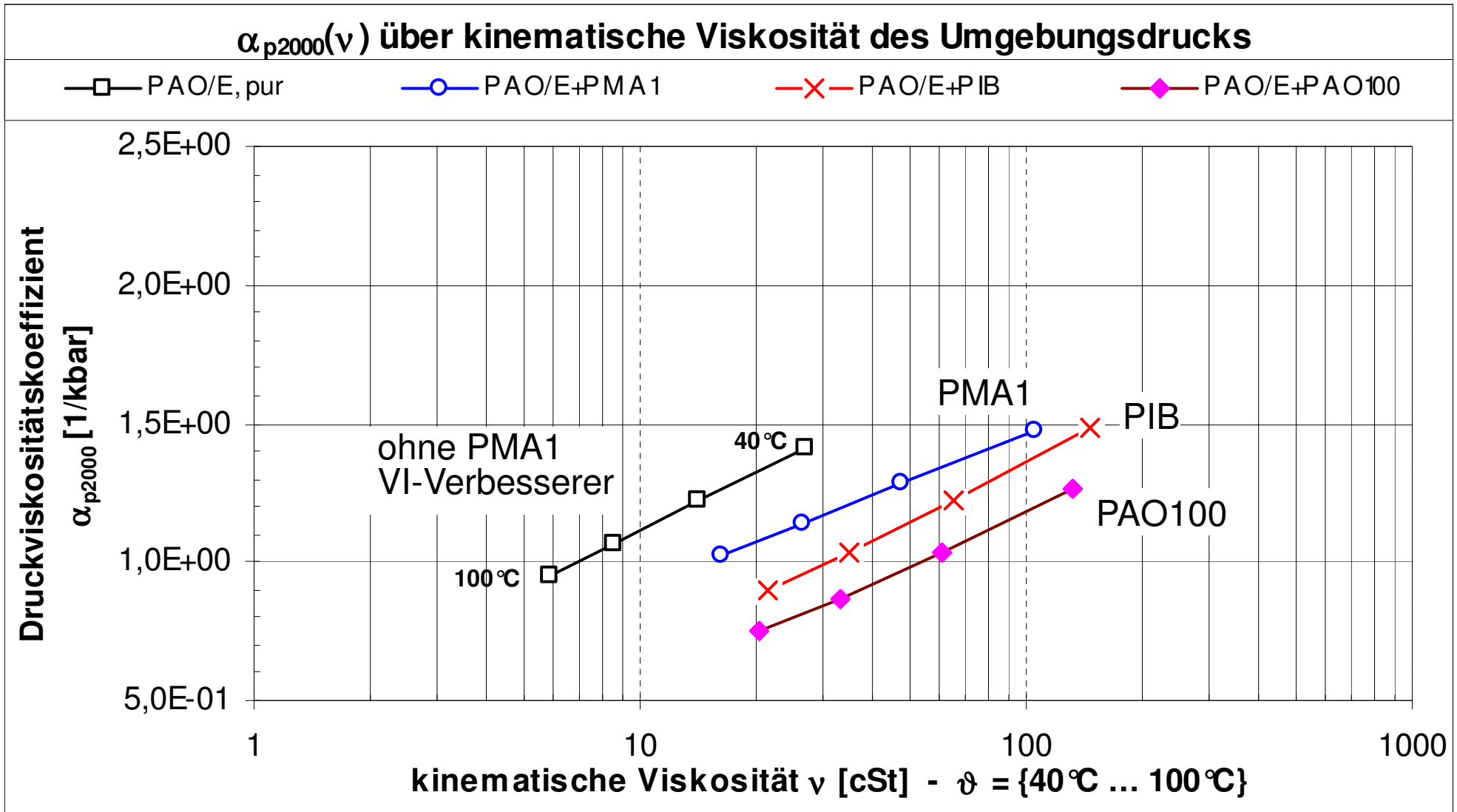
# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000bar}$ VI-Verbesserer



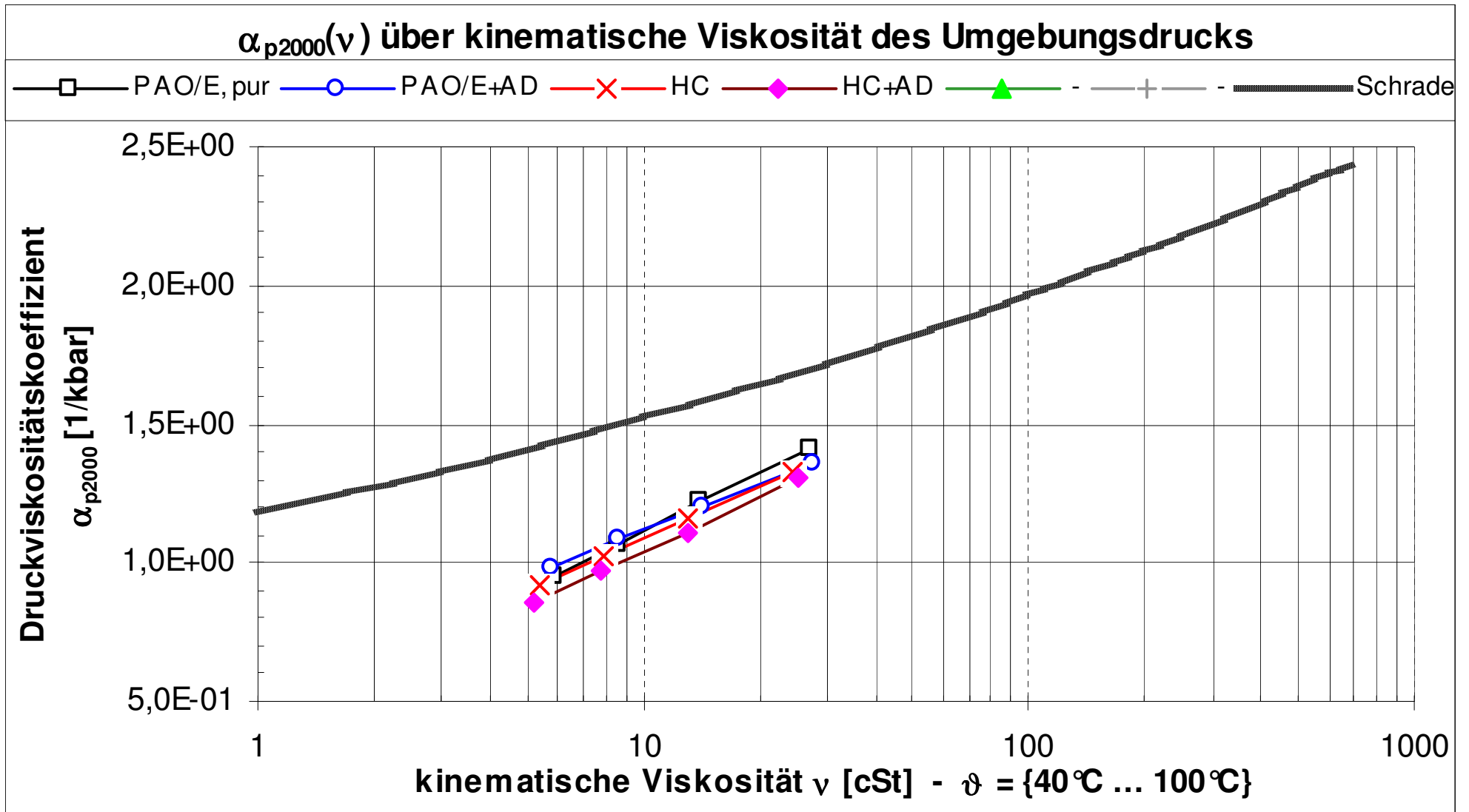
# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000bar}$ VI-Verbesserer



# Druckabhängige Schmierstoffparameter

## Viskositäts-Druck-Koeffizient $\alpha_{p2000bar}$ EP/AW-Additiv



### Zwischenbilanz:

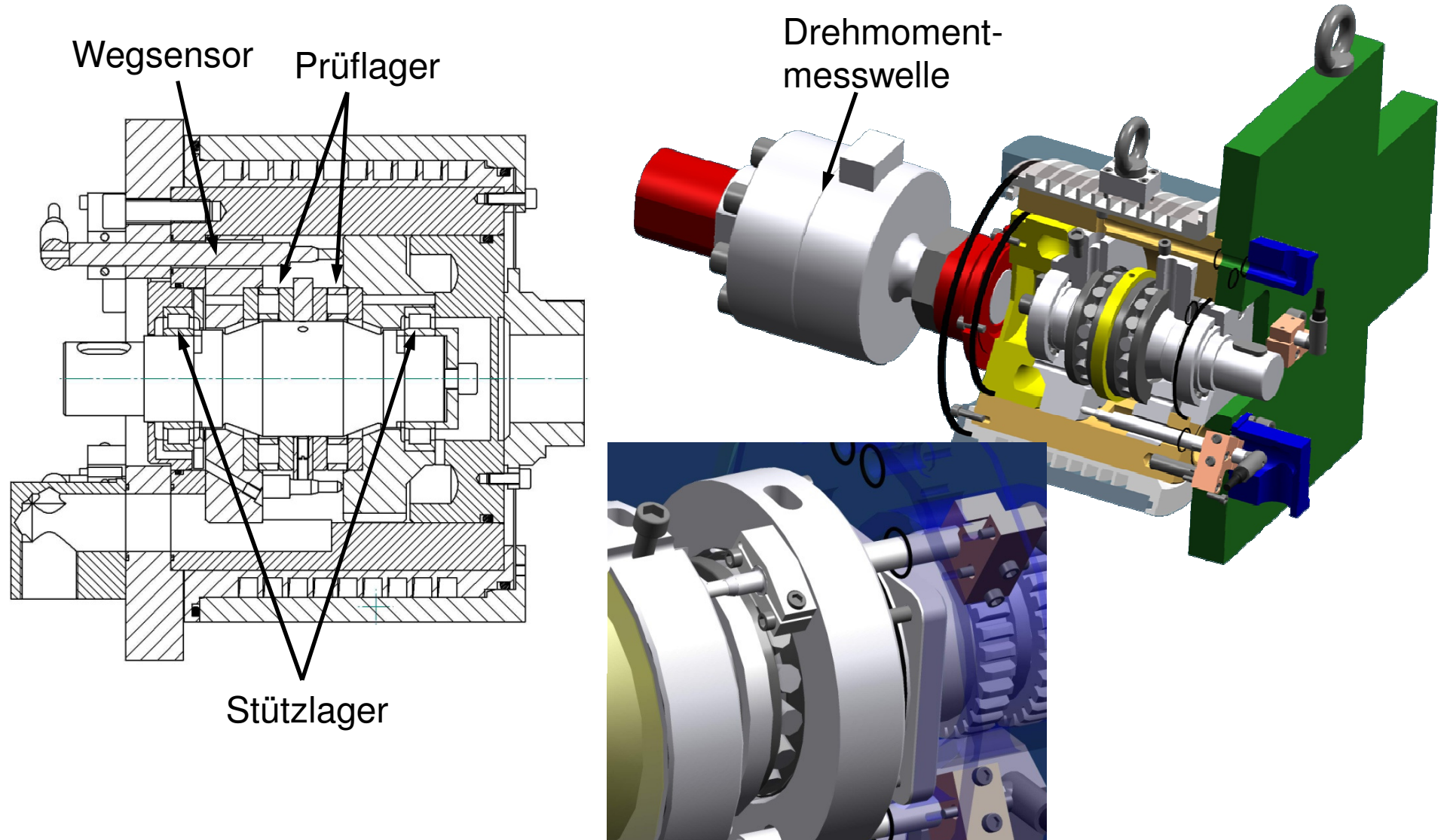
- Viskosität der Öle ist stark von Temperatur und Druck abhängig
- Viskosität-Druck-Koeffizient der Öle ist stark vom Grundöl abhängig
- Viskosität-Druck-Koeffizient der Öle ist vom zugesetzten VI-Verbesserer abhängig
- Viskosität-Druck-Koeffizient ist kaum vom zugesetzten EP/AW-Additiv abhängig

- Schmierstoffe in WEA (**W**ind**E**nergie**A**nlagen) ✓
  - 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

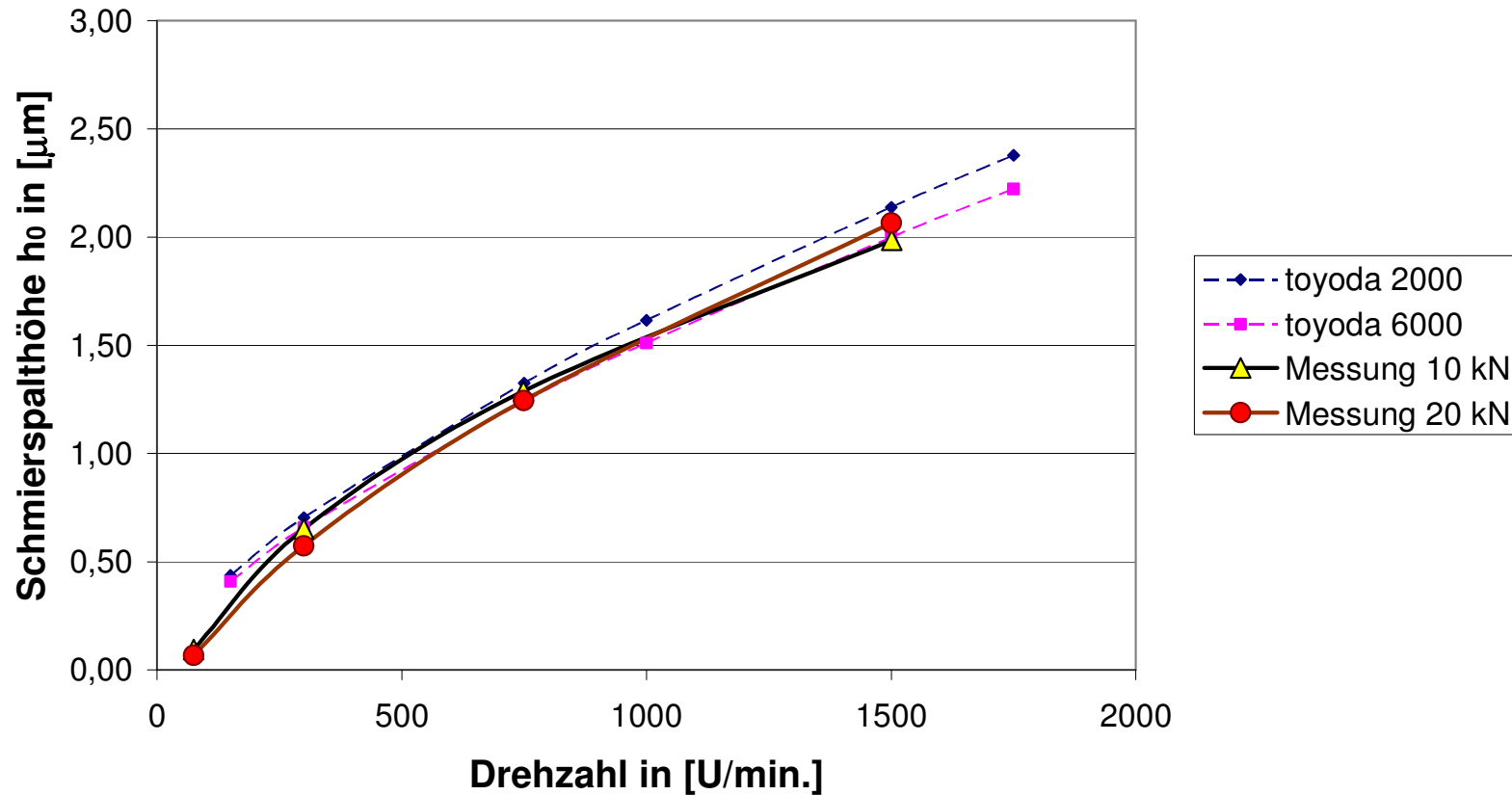
T. Kretschmer  
Folie 25



# Experimentelle Schmierfilmhöhe

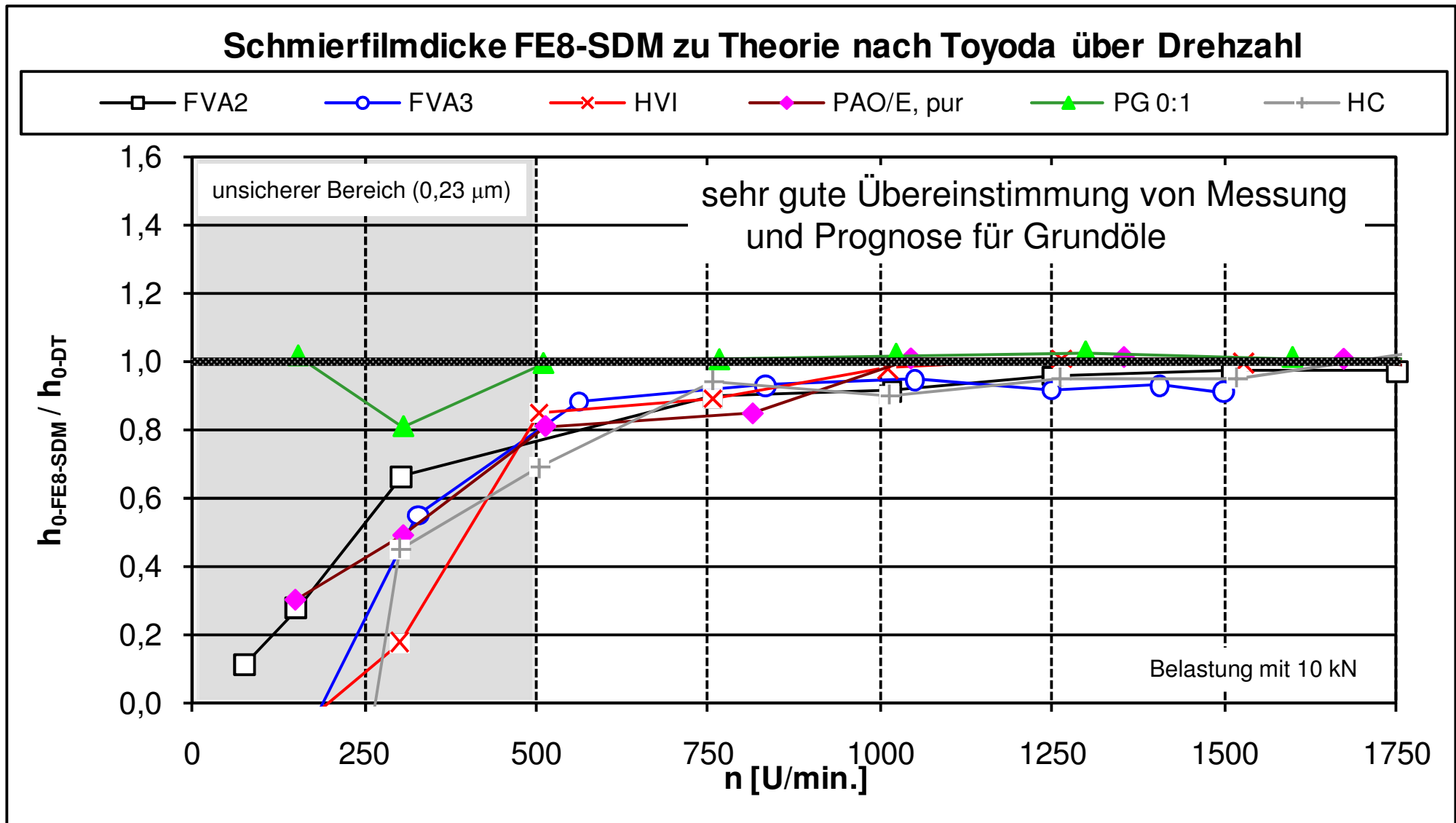
## Gegenüberstellung experimentell – theoretisch FVA3

T. Kretschmer  
Folie 26



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

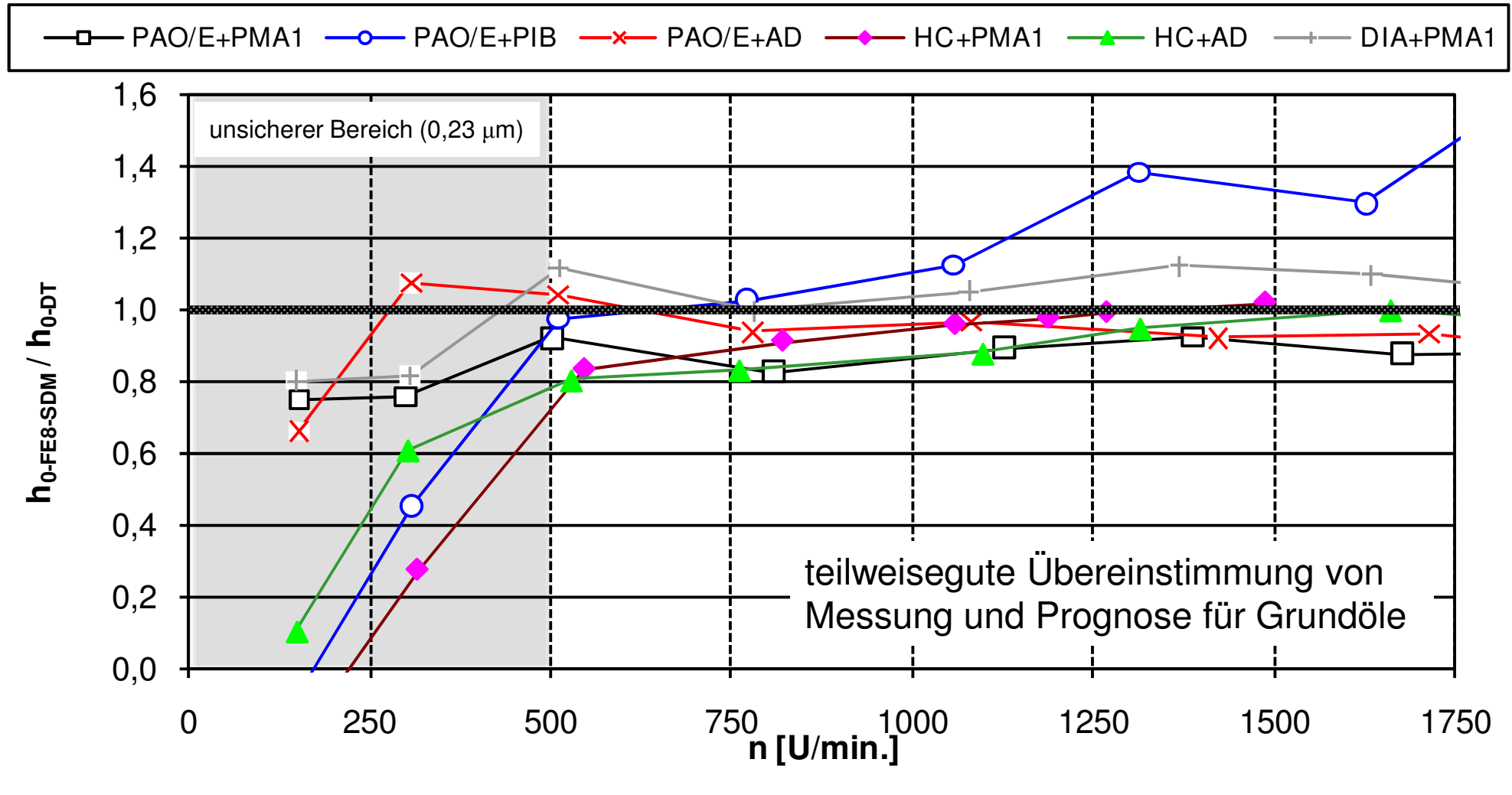
# Experimentelle Schmierfilmhöhe Gegenüberstellung experimentell – theoretisch Grundöle



# Experimentelle Schmierfilmdicke

## Gegenüberstellung experimentell – theoretisch Additive

### Schmierfilmdicke FE8-SDM zu Theorie nach Toyota 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

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 = Triarylphosphatester
- h = Fluorkohlenwasserstoff
- i = Polyglykol
- k, l = Silikone

### Legende GfT-Arbeitsblatt 1993

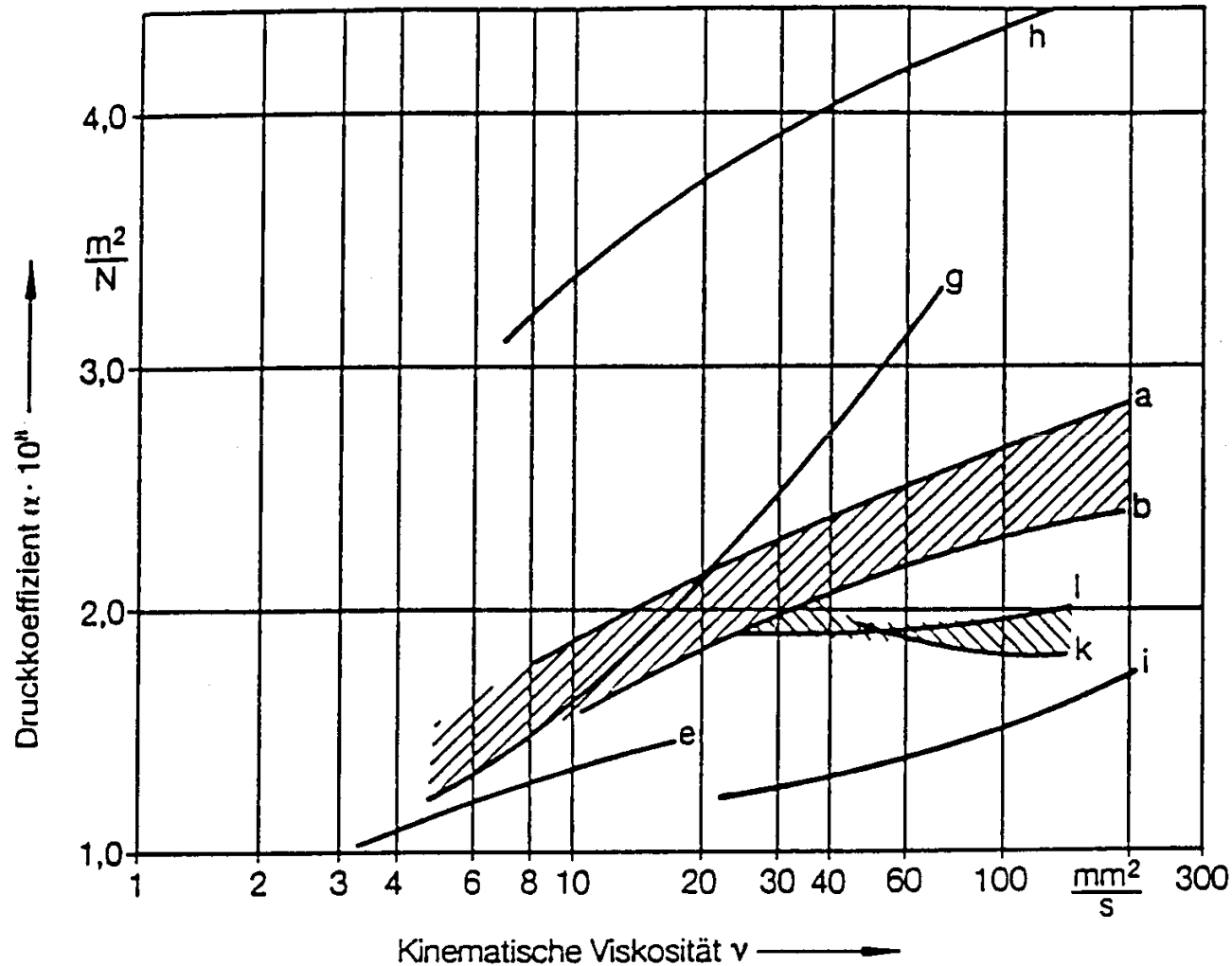


Bild 3: Druckkoeffizient  $\alpha$  als Funktion der kinematischen Viskosität  $\nu$ , gültig für Druckbereich 0 - 2 000 bar

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

### Legende GfT-Arbeitsblatt 1993

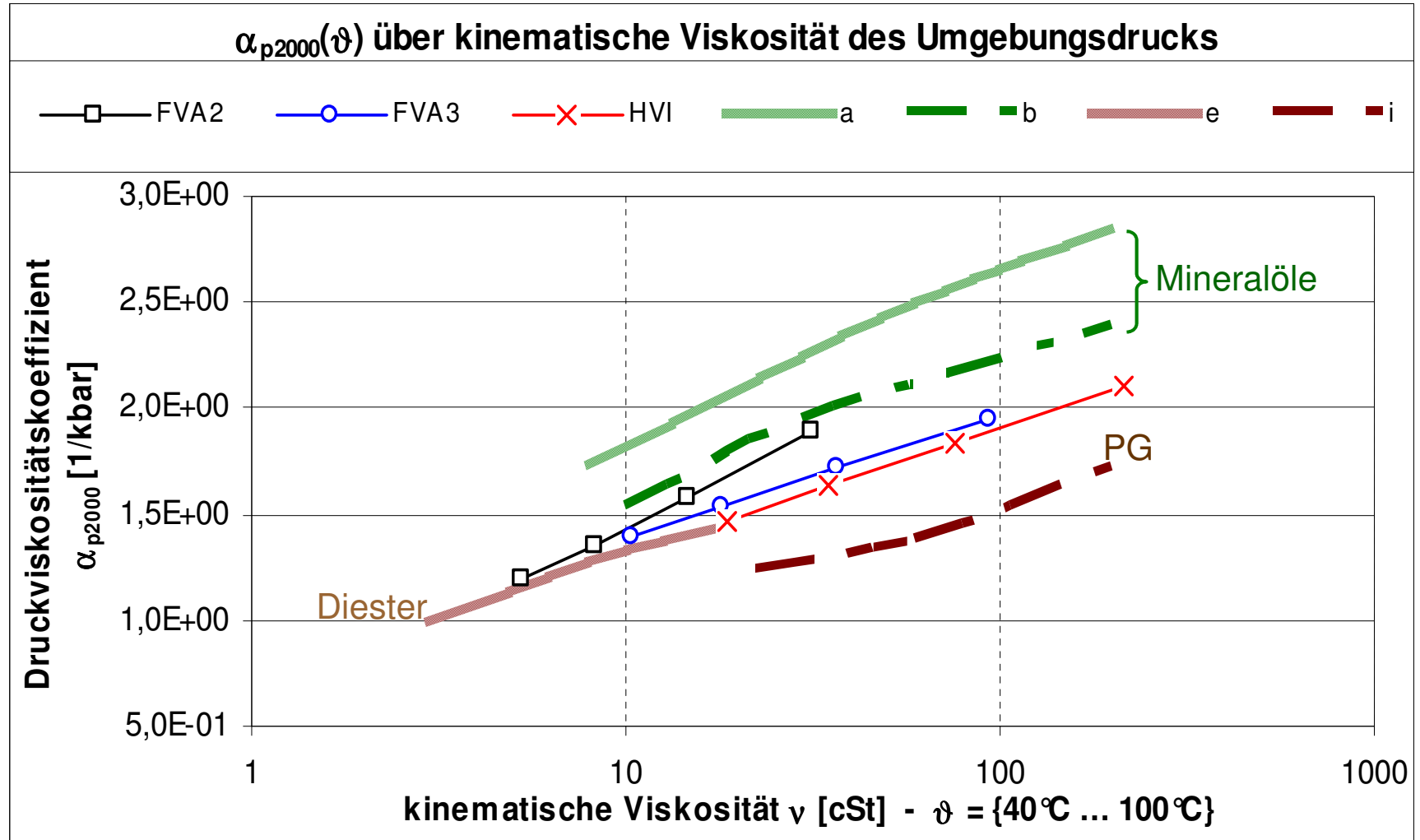


Bild 3: Druckkoeffizient  $\alpha$  als Funktion der kinematischen Viskosität  $\nu$ , gültig für Druckbereich 0 - 2 000 bar

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

### Legende GfT-Arbeitsblatt 1993

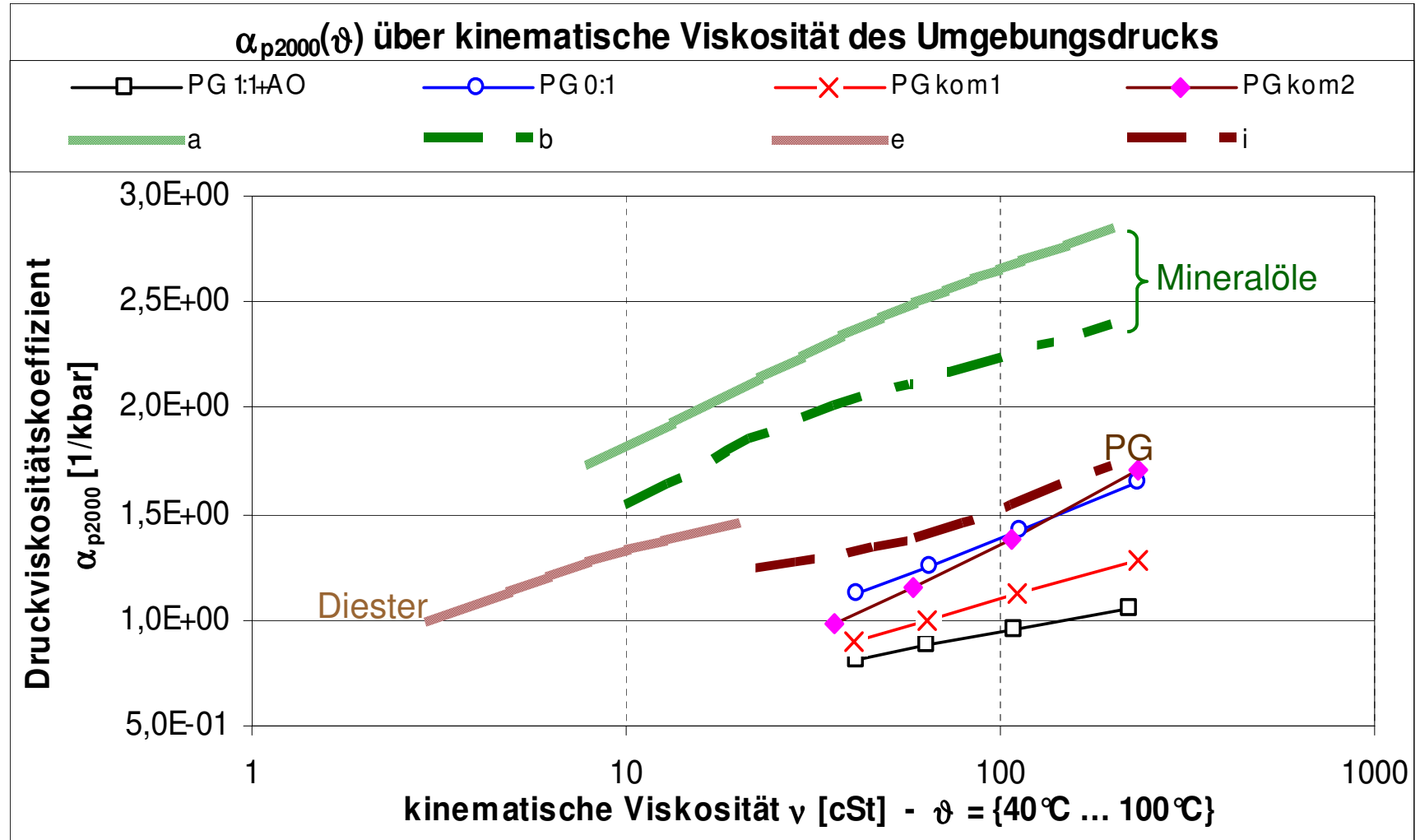
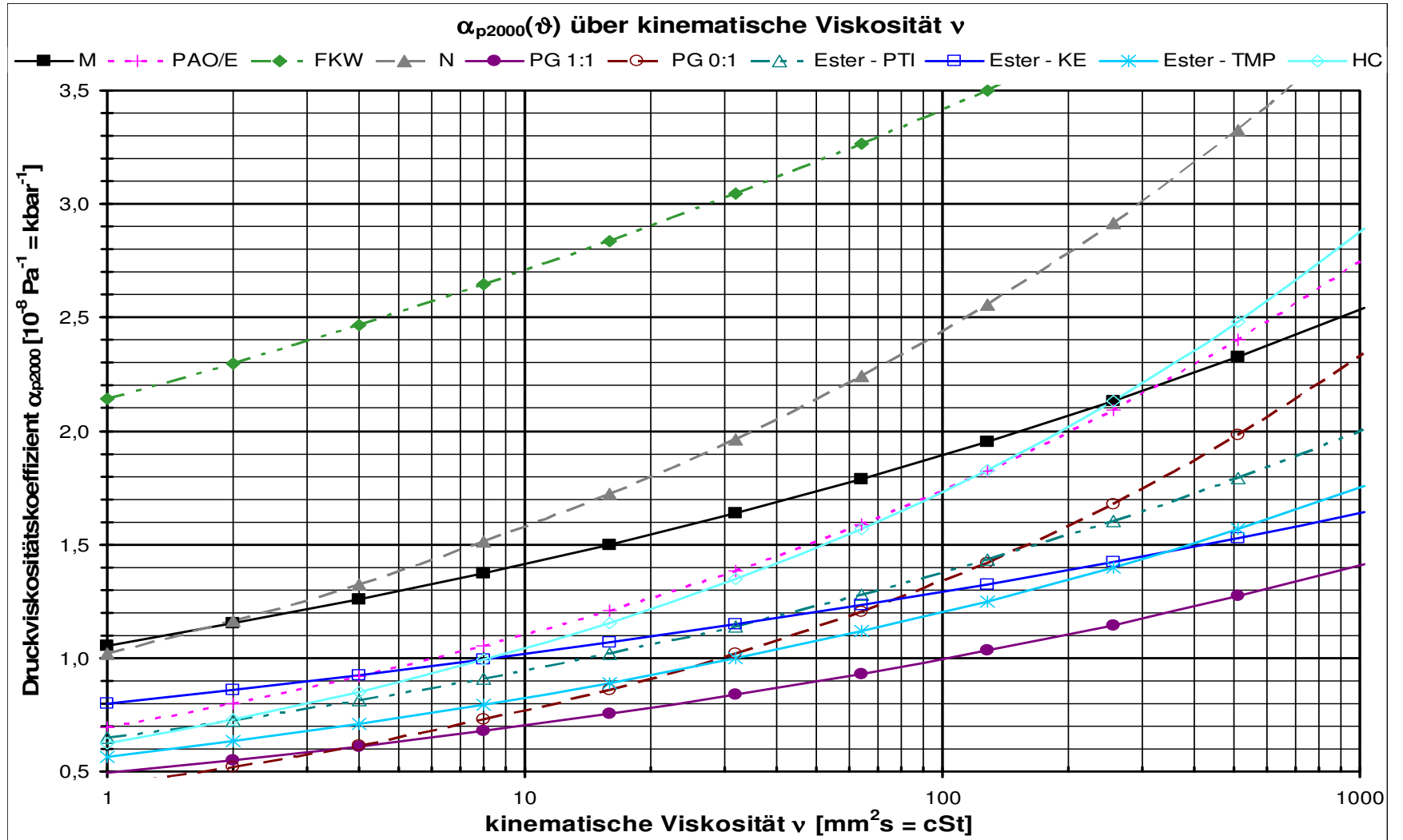




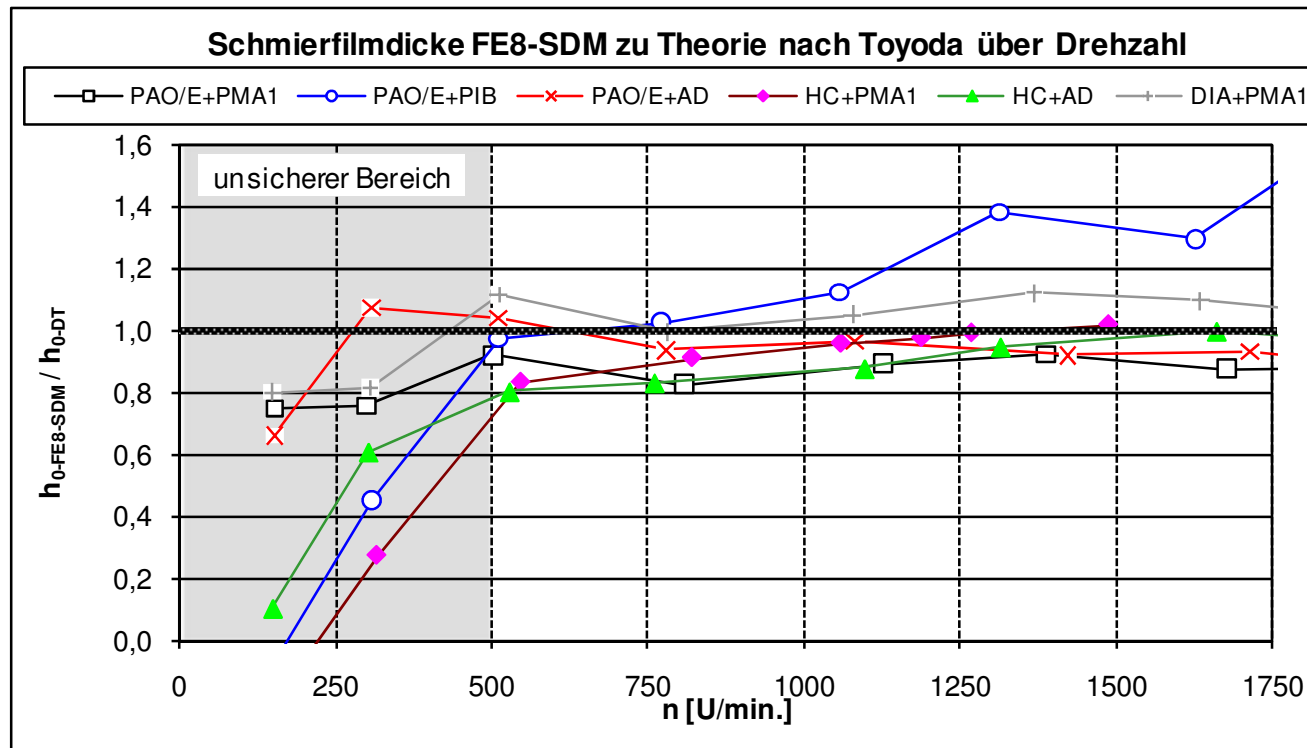
Bild 3: Druckkoeffizient  $\alpha$  als Funktion der kinematischen Viskosität  $\nu$ , gültig für Druckbereich 0 - 2 000 bar

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

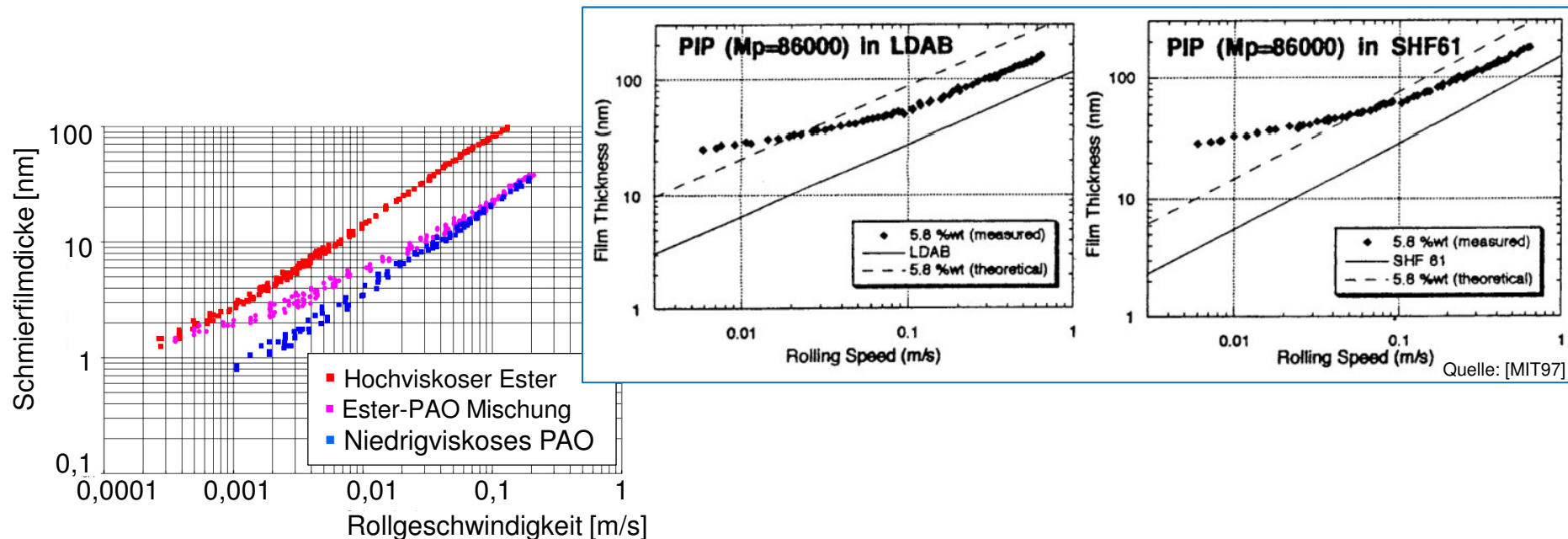
### Legende GfT-Arbeitsblatt 1993



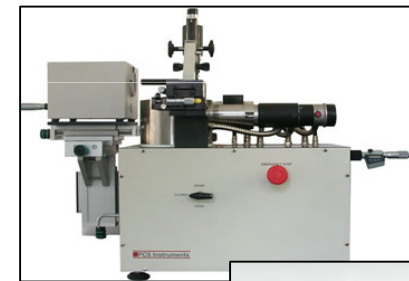
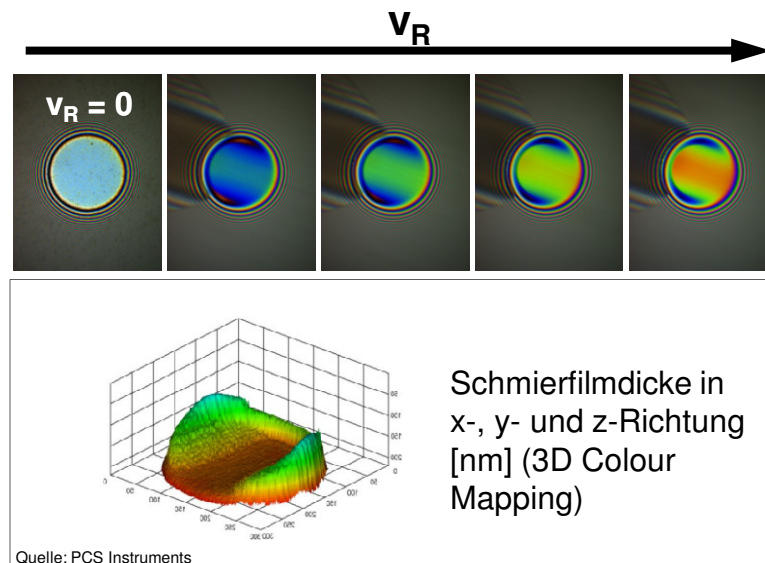
- Wie genau ist die Vorhersage im dünnen Schmierpalt  $< 0,2 \mu\text{m}$ ?



- Wie genau ist die Vorhersage im dünnen Schmierpalt  $< 0,2 \mu\text{m}$ ?
- 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.



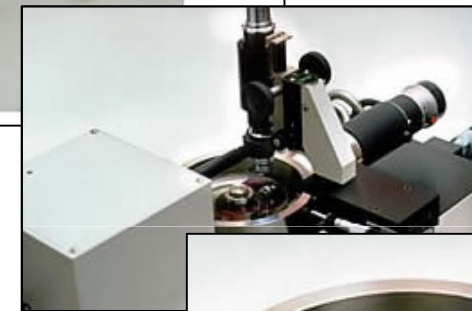
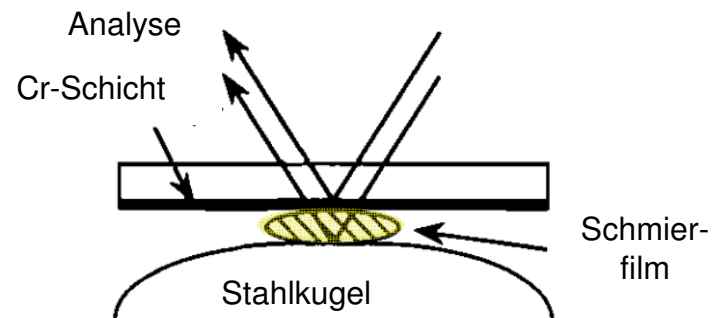
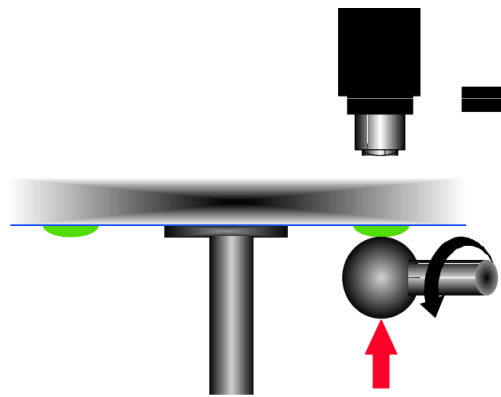
- Wie genau ist die Vorhersage im dünnen Schmierpalt  $< 0,2 \mu\text{m}$ ?
- Bei kleinen Schmierfilmdicken sind Abweichungen zur Prognose bekannt (Grenzschichteffekte gezeigt von Prof. Spikes, ...). Die Einflüsse von Grundöl und Additivierung auf die Schmierfilmbildung und das Reibmoment im Wälzlager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



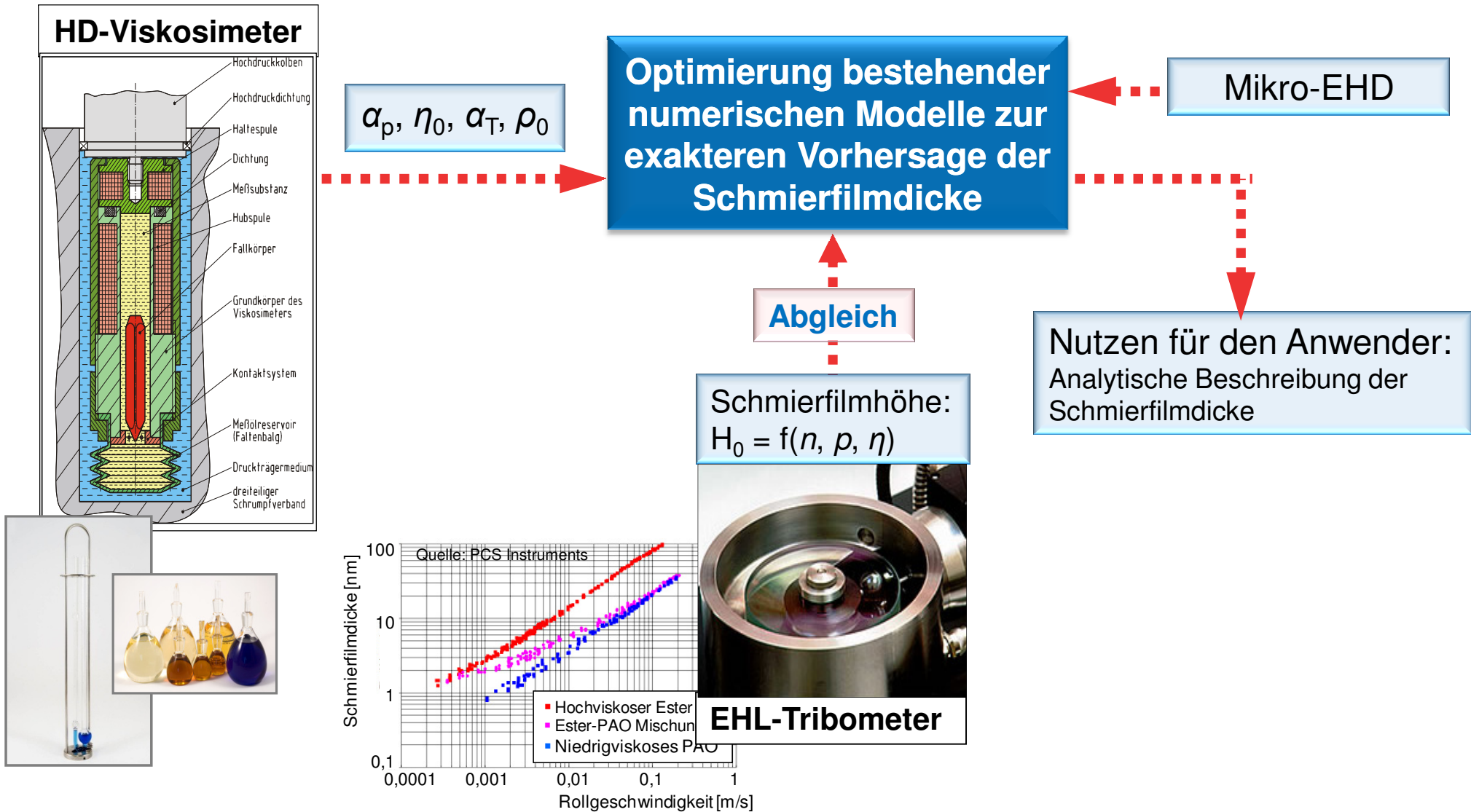
Quelle: PCS Instruments

## 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 Schmierungs Zustands ( $\lambda$  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 Grundölytypen
    - 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)