

Unterschiedliches Verhalten hydraulischer und pneumatischer Energieträger

Citation for published version (APA):

Witt, K. (1971). Unterschiedliches Verhalten hydraulischer und pneumatischer Energieträger. *Oelhydraulik und Pneumatik*, 15(4), 139-142.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1971

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

providing details and we will investigate your claim.

Unterschiedliches Verhalten hydraulischer und pneumatischer Energieträger

Different behavior of hydraulic and pneumatic energy media

Comportement différent de porteurs d'énergie hydraulique et pneumatique



Dipl.-Ing. K. Witt

Ziel der Arbeit

Bei der Berechnung hydraulischer und pneumatischer Anlagen ist es für den Konstrukteur wichtig zu wissen, daß sich die beiden Energieträger sehr unterschiedlich verhalten. Dieses Verhalten der Energieträger im Betrieb erfordert bei der Planung der Anlagen und der einzelnen Bauelemente andersartige Grundkonzeptionen. In letzter Zeit wurde versucht, Hydraulik und Pneumatik unter einen Sammelbegriff, z. B. Fluidtechnik, zusammenzufassen. Aufgabe der Arbeit ist es jedoch zu zeigen, daß beide Energieträger ein so differenziertes Verhalten aufweisen, daß eine Zusammenfassung beider Gebiete unzumutbar erscheint. Dies ist in der Praxis auch spürbar, denn das unterschiedliche Verhalten der Energieträger ist so gravierend, daß daraus als Folgeerscheinung verschiedene Industriezweige entstanden sind. Für die hier folgende Gegenüberstellung der physikalischen Eigenschaften beider Energieträger wurden Mineralöl (normales Hydrauliköl) und Luft mit idealem Gasverhalten gewählt.

Dichte

Für die Berechnung der Dichte ρ von Mineralölen haben Dow und Fink [1] eine Zustandsgleichung auf Grund durchgeführter Messungen formuliert. Die isotherme Zustandsgleichung für Mineralöle läßt sich wie folgt darstellen:

$$\rho = \rho_0 (1 + a p_{\bar{v}} - b p_{\bar{v}}^2)_t \quad (1)$$

wobei ρ_0 die Dichte bei Atmosphärendruck, $p_{\bar{v}}$ den Überdruck und a und b tem-

peraturabhängige Faktoren für Mineralöle bedeuten. Auf Grund dieser Gleichung und der gegebenen Zahlenwerte [5] wurden Dichtelinien konstanter Temperatur t als Funktion des Druckes p (Bild 1) bestimmt.

Für die isotherme Zustandsänderung der Luft (ideales Gas) gilt die aus der kinematischen Gastheorie [3] bekannte Beziehung:

$$(p \cdot v)_T = \text{konst} \quad \text{oder:} \quad \left(p \frac{1}{\rho} \right)_T = \text{konst} \quad (2)$$

Die Größe T bedeutet die absolute Temperatur und v das spezifische Volumen der Luft.

Kompressionsmodul

Aus der von Dow und Fink angegebenen Zustandsgleichung kann nach der bekannten Beziehung:

$$K_T = -v \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \quad \text{oder:} \quad K_T = \rho \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \quad (3)$$

wie Schlösser [2] gezeigt hat, der isotherme Kompressionsmodul K_T (Bild 2) ermittelt werden.

Der adiabate Kompressionsmodul K_S wird mit dem Faktor des Verhältnisses der spezifischen Wärmen c_p/c_v multipliziert und läßt sich wie folgt darstellen:

$$K_S = (c_p/c_v) \cdot K_T \quad (4)$$

Der isotherme Kompressionsmodul K_T ist für Luft (ideales Gas) gleich dem im Gas wirkenden Druck p (Bild 2):

$$K_T = p \quad (5)$$

Der adiabate Kompressionsmodul K_S ist um das Verhältnis der spezifischen Wär-

men c_p/c_v größer als der isotherme Kompressionsmodul des Gases:

$$K_S = (c_p/c_v) \cdot p \quad (6)$$

Bei Luft besteht im Gegensatz zu Mineralölen keine Temperaturabhängigkeit des Kompressionsmoduls.

Volumetrischer Ausdehnungskoeffizient

Der volumetrische Ausdehnungskoeffizient α_p wird wie folgt angegeben:

$$\alpha_p = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad \text{oder:} \quad \alpha_p = \rho \left(\frac{\partial \left(\frac{1}{\rho} \right)}{\partial T} \right)_p \quad (7)$$

Auf Grund der gegebenen Zustandsgleichung für Mineralöle kann mit Gleichung (7) die Temperatur- und Druckabhängigkeit bestimmt werden (Bild 3).

Für Luft wird der volumetrische Ausdehnungskoeffizient α_p als temperatur- und druckunabhängig mit:

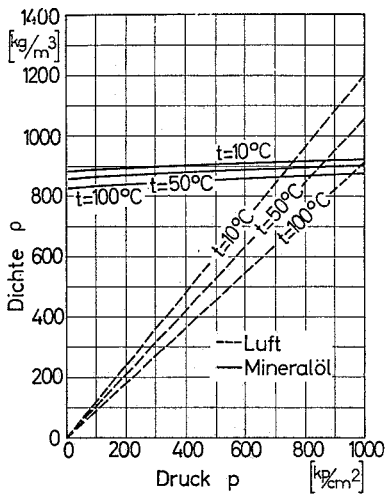
$$\alpha_p = 3,675 \cdot 10^{-3} \text{ [grad}^{-1}\text{]} \quad \text{zwischen } 0^\circ \text{ und } 100^\circ \text{ C angegeben [3].}$$

Spezifische Wärme

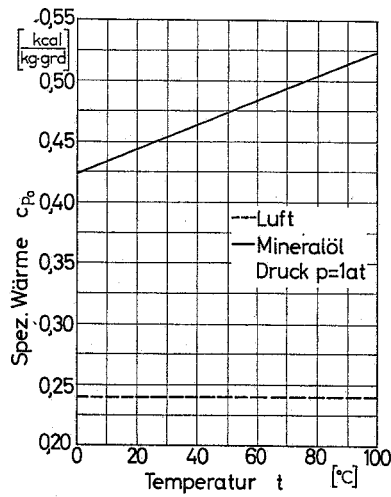
Die spezifische Wärme c_p bei konstantem Druck zeigt nach der Beziehung aus der Thermodynamik:

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T = -T \left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \right)_p \quad (8)$$

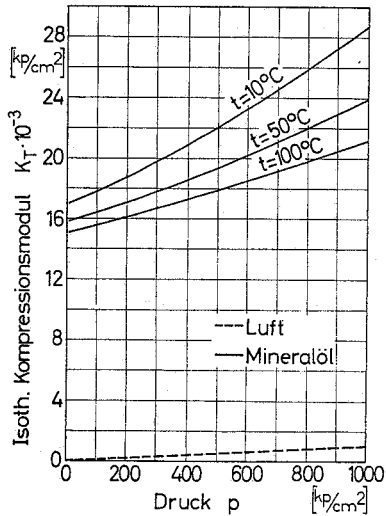
nur eine geringfügige und deshalb vernachlässigbare Druckabhängigkeit. Die Temperaturabhängigkeit der spezifischen Wärme c_p bei Atmosphärendruck (Bild 4) ist aus einer Tabelle [5] entnommen. Bei Luft (ideales Gas) besteht weder eine Temperatur- noch eine Druckabhängigkeit der spezifischen Wärme c_p . Der Wert von c_p wird mit $c_p = 0,24$ angegeben [3].



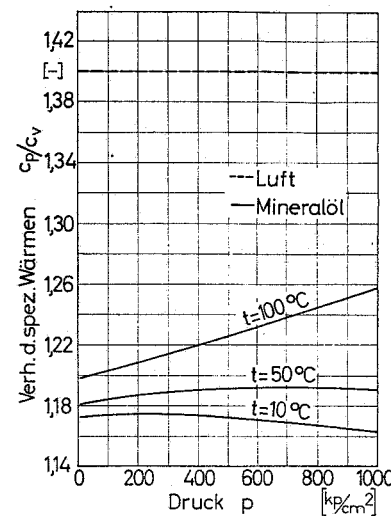
1



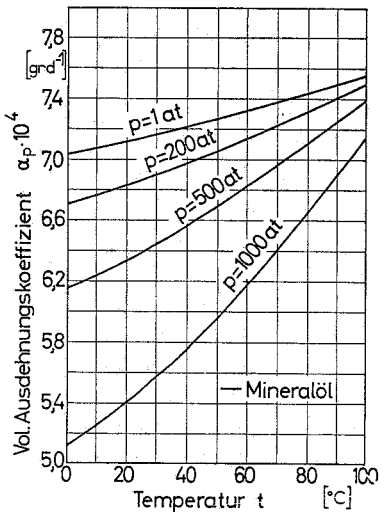
4



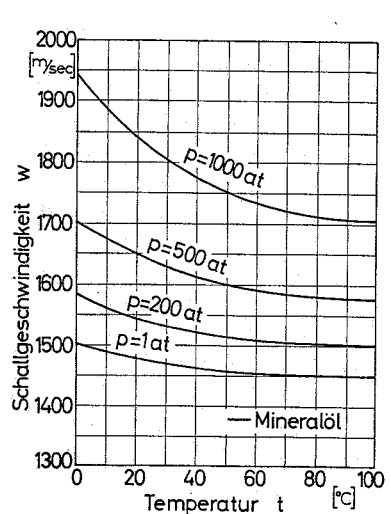
2



5



3



6

1: Verlauf der Dichtelinien konstanter Temperatur von Mineralöl und Luft als Funktion des Druckes – Variation of the specific gravity lines of constant temperature for mineral oil and air with pressure – Courbes de densité à température constante pour l'huile minérale et l'air en fonction de la pression

2: Verlauf des isothermen Kompressionsmoduls eines Mineralöles und Luft als ideales Gas – Variation of the isothermal compression module for a mineral oil and air as ideal gas – Courbe du module de compression isothermique de l'huile minérale et de l'air comme gaz idéal

3: Temperatur- und Druckabhängigkeit des volumetrischen Ausdehnungskoeffizienten eines Mineralöles – Temperature and pressure interdependence of the volumetric coefficient of expansion of mineral oil – Coefficient de dilatation de l'huile minérale en fonction de la température et de la pression

4: Die spezifische Wärme eines Mineralöles und der Luft als Funktion der Temperatur – The thermal capacity of a mineral oil and air versus temperature – La chaleur spécifique d'une huile minérale et de l'air en fonction de la température

5: Druck- und Temperaturabhängigkeit des Verhaltens der spezifischen Wärme eines Mineralöles und von Luft – Pressure and temperature interdependence of the behavior of the thermal capacities of a mineral oil and air – Chaleurs spécifiques d'une huile minérale et de l'air en fonction de la pression et de la température

6: Druck- und Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in einem Mineralöl – Pressure and temperature interdependence of the velocity of sound in a mineral oil – Vitesse du son dans une huile minérale en fonction de la pression et de la température

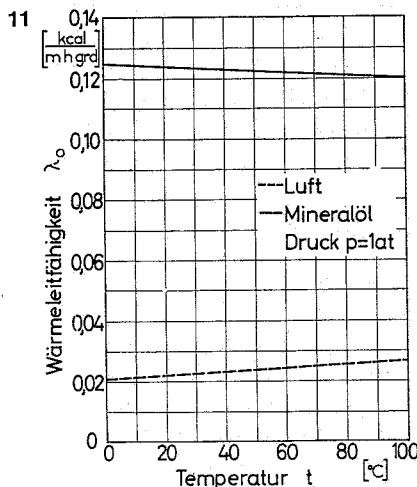
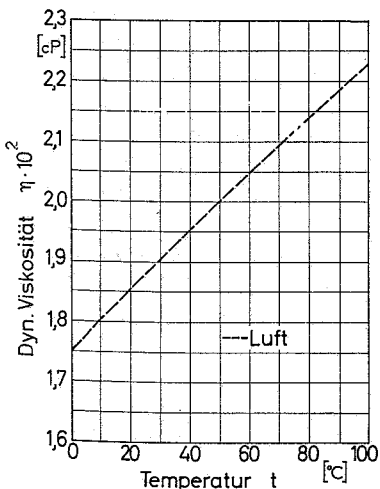
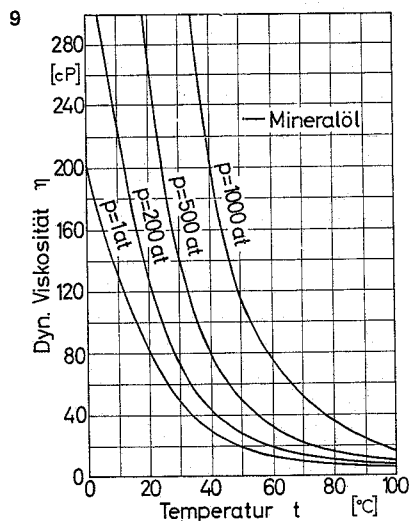
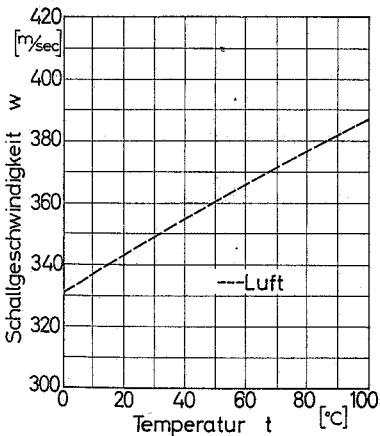
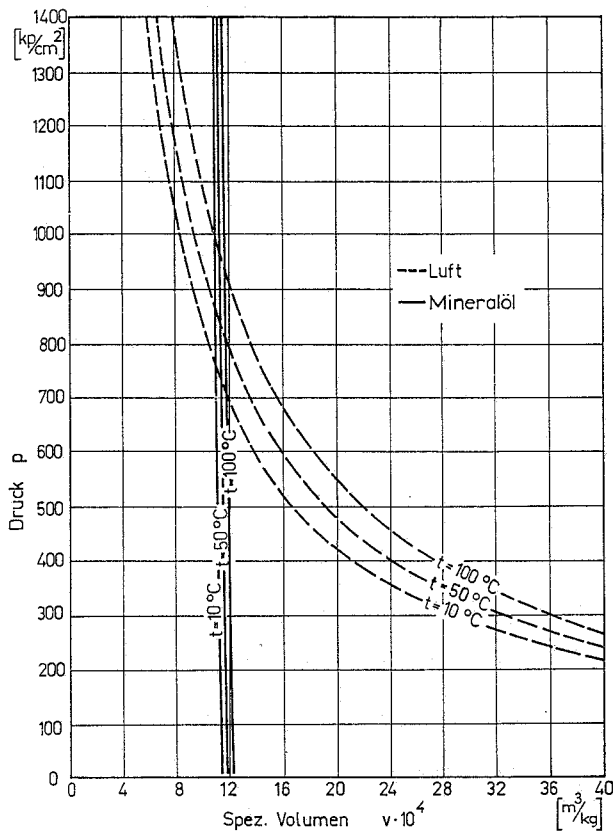
7: Die Temperaturabhängigkeit der Schallgeschwindigkeit in Luft – The temperature interdependence of the velocity of sound in air – Vitesse du son dans l'air en fonction de la température

8: pv-Diagramm eines Mineralöles und von Luft – pv-diagram of a mineral oil and air – Diagramme pv d'une huile minérale et de l'air

9: Das Viskositätsverhalten eines Mineralöles in Abhängigkeit von Druck und Temperatur – Viscosity behavior of a mineral oil versus pressure and temperature – Viscosité d'une huile minérale en fonction de la pression et de la température

10: Das druckunabhängige Viskositätsverhalten von Luft in Abhängigkeit der Temperatur – The pressure-independent viscosity behavior of air versus temperature – Viscosité de l'air indépendante de la pression en fonction de la température

11: Die Temperaturabhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck von Mineralöl und Luft – Thermal conductivity at atmospheric pressure for mineral oil and air versus temperature – Conductibilité thermique pour une pression atmosphérique d'huile minérale et de l'air en fonction de la température



Verhältnis der spezifischen Wärmen

Mit Hilfe thermodynamischer Beziehungen läßt sich das Verhältnis der spezifischen Wärmen c_p/c_v in folgender Weise darstellen:

$$\frac{c_p}{c_v} = \frac{\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \cdot \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s}{\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v} \text{ oder } \frac{c_p}{c_v} = \frac{\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s}{\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T} \quad (9)$$

Es zeigt sich eine deutliche Temperatur- und Druckabhängigkeit von c_p/c_v für Mineralöle (**Bild 5**). Diese Abhängigkeit beeinflusst den adiabaten Kompressionsmodul K_s und damit auch das Verhalten der Schallgeschwindigkeit w in Mineralölen.

Im Gegensatz zu Mineralölen stellt sich bei Luft (ideales Gas) für alle Drücke und Temperaturen ein konstanter Wert von $c_p/c_v = 1,4$ ein.

Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit w in einem Mineralöl wird durch die Temperatur- und Druckabhängigkeit des adiabaten Druck-Dichte-Quotienten $(\partial p/\partial \rho)_s$ ebenfalls beeinflusst (**Bild 6**).

Die Schallgeschwindigkeit in Mineralölen ist eine Funktion des Druckes und der Temperatur.

$$w = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} \quad (10)$$

Die Schallgeschwindigkeit ist in Gasen (Luft) unabhängig vom Druck und somit nur eine Funktion der Temperatur (**Bild 7**). Folgende Gleichung hebt für Gase das druckunabhängige Verhalten deutlich hervor:

$$w = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (11)$$

pv-Diagramm

Eine Gegenüberstellung der beiden Energieträger im pv-Diagramm zeigt eindrucksvoll das unterschiedliche Kompressionsverhalten in hydraulischen und pneumatischen Systemen (**Bild 8**). – Stellt man z. B. die notwendigen isothermen Verdichtungsarbeiten L_t einander gegenüber (**Tabelle 1**), so zeigt sich sehr deutlich, daß daraus konstruktive Konsequenzen entstehen müssen:

$$L_t = - \int p \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T dp \quad (12)$$

t = 50 °C	$L_{t, p=1-100 \text{ at}}$	$L_{t, p=1-200 \text{ at}}$
Mineralöl	1157,1 mkp	2318,5 mkp
Luft	36813,7 mkp	42354,7 mkp
$L_{t, \text{Luft}}/L_{t, \text{öl}}$	31,82	18,27

Tabelle 1: Isotherme Verdichtungsarbeiten bei Mineralöl und Luft

Bezeichnungen

Größe	Bedeutung	Dimension
α_p	Volumetrischer Ausdehnungskoeffizient	$[\theta^{-1}]$
ρ_0	Dichte eines Mineralöles bei Atmosphärendruck und Temperatur t	$[\text{FL}^{-4} \text{T}^2]$
ρ	Dichte eines Mineralöles bei Überdruck $p_{\bar{u}}$ und Temperatur t	$[\text{FL}^{-4} \text{T}^2]$
η	Dynamische Viskosität	$[\text{FL}^{-2} \text{T}]$
λ_0	Wärmeleitfähigkeit bei Atmosphärendruck	$[\text{FT}^{-1} \theta^{-1}]$
λ	Wärmeleitfähigkeit bei Druck p	$[\text{FT}^{-1} \theta^{-1}]$
a	Temperaturabhängiger Faktor der Zustandsgleichung für Mineralöle	$[\text{F}^{-1} \text{L}^2]$
b	Temperaturabhängiger Faktor der Zustandsgleichung für Mineralöle	$[\text{F}^{-2} \text{L}^4]$
c_{p0}	Spezifische Wärme bei Atmosphärendruck	$[\text{L}^2 \text{T}^{-2} \theta^{-1}]$
c_p	Spezifische Wärme bei konstantem Druck	$[\text{L}^2 \text{T}^{-2} \theta^{-1}]$
c_v	Spezifische Wärme bei konstantem Volumen	$[\text{L}^2 \text{T}^{-2} \theta^{-1}]$
K_S	Adiabater Kompressionsmodul	$[\text{F L}^{-2}]$
K_T	Isothermer Kompressionsmodul	$[\text{F L}^{-2}]$
L_t	Isotherme Verdichtungsarbeit	$[\text{FL}]$
p	Absoluter Druck	$[\text{FL}^{-2}]$
$p_{\bar{u}}$	Überdruck über den Atmosphärendruck	$[\text{FL}^{-2}]$
t	Temperatur	$[\theta]$
T	Absolute Temperatur	$[\theta]$
v	Spezifisches Volumen	$[\text{F}^{-1} \text{L}^4 \text{T}^{-2}]$
w	Schallgeschwindigkeit	$[\text{LT}^{-1}]$

Dynamische Viskosität

Das Verhalten der dynamischen Viskosität η eines Mineralöles wird sehr von Temperatur und Druck beeinflusst (Bild 9). Kuss [4] zeigt, daß nicht nur der Temperatureinfluß, sondern auch der Einfluß des Druckes bei der Bestimmung der Viskosität zu berücksichtigen ist. Der Temperatureinfluß ist ab etwa 80° C nur noch geringfügig, dagegen macht sich im Bereich niedriger Temperaturen ein erheblicher Einfluß der Temperatur bemerkbar. Bei Temperaturen > 80° C ist bei mäßigen Drücken nur noch der Einfluß des Druckes zu berücksichtigen (Bild 9). Auf Grund der kinetischen Gastheorie [3] ist für Gase, die dynamische Viskosität η vom Druck unabhängig; es zeigt sich lediglich eine Zunahme der Viskosität bei steigender Temperatur [5] (Bild 10). Damit unterscheiden sich Gase grundsätzlich von Flüssigkeiten.

Wärmeleitfähigkeit

Die Wärmeleitfähigkeit λ_0 bei Atmosphärendruck ist bei Mineralölen und Luft nur sehr geringfügig von der Temperatur ab. Die Wärmeleitfähigkeit λ von Flüssigkeiten nimmt nach Bridgman [6] bei einem Druck von 1000 atü und einer Temperatur $t = 30^\circ \text{C}$ um den Faktor 1,09 und bei $t = 70^\circ \text{C}$ um den Faktor 1,125 gegenüber dem Wert λ_0 bei Atmosphärendruck zu. Nach der kinetischen Gastheorie [3] ergibt sich, daß die Wärmeleitfähigkeit λ und die Viskosität η eines Gases einander proportional und somit vom Druck unabhängig sind.

Zusammenfassung

Die Unterschiede zeigen sehr deutlich, daß beide Energieträger bei ihrer Beurteilung im Hinblick auf sich ergebende Konsequenzen gesondert betrachtet werden

müssen. Das Verhältnis des isothermen Kompressionsmoduls Mineralöl/Luft beträgt etwa 40:1, das des volumetrischen Ausdehnungskoeffizienten Mineralöl/Luft etwa 1:5 und das der dynamischen Viskosität Mineralöl/Luft etwa 1000:1. Akustische Signale pflanzen sich in einem hydraulischen Energieträger etwa dreimal so schnell fort wie in einem pneumatischen Energieträger. Das Verhältnis der spezifischen Wärme bei konstantem Druck von Mineralöl/Luft ergibt sich überschlägig mit 2:1 und das der Wärmeleitfähigkeit von Mineralöl/Luft zu etwa 6:1. Vergleicht man die Verdichtungsarbeiten von Mineralöl/Luft, so verhalten sie sich bei einer Kompression von 1 kp/cm² auf 100 kp/cm² längs einer Isothermen mit 50° C wie 1:31,8. Das zeigt, daß beim Einsatz pneumatischer Energieträger Fragen der zulässigen Maximalbelastungen bei Bauteilen und der zulässigen Sicherheit von größter Bedeutung sind.

Literaturverzeichnis:

- [1] Dow, R. B. und C. E. Fink: Computation of some physical properties of lubrication oils at high pressures. Journal of Applied Physics, Mai 1940, S. 353.
- [2] Schlösser, W. M. J. und H. A. Verduyn: Folgerungen aus einer Zustandsgleichung für Mineralöle. Ölhydraulik und Pneumatik 4 (1960), Nr. 2.
- [3] Gerthsen, C.: Physik, Kapitel I (Grundzüge der kinetischen Gastheorie; Innere Reibung von Flüssigkeiten; Schallwellen). Kapitel II (Temperatur und Wärmemenge; kinetische Theorie der Wärme; Wärmeleitung und Diffusion), 8. Auflage. Springer-Verlag 1964.
- [4] Kuss, E.: The Viscosities of 50 lubricating oils under pressure up to 2000 atmospheres. Report No. 17 on Sponsored Research (Germany), Department of Scientific and Industrial Research, London/England 1951.
- [5] Dobbels Taschenbuch I für den Maschinenbau: Zahlentafeln, kennzeichnende Stoffwerte für die Wärmeübertragung, 12. Auflage 1961.
- [6] Bridgman in Kowalczyk, L. S.: Thermal conductivity and its variability with temperature and pressure. ASME Transactions Vol. 77, 1956, pp. 1021. ■

Gespräch bei Firma Westinghouse, Hannover:

Dieser „Begriff“ ist gelegentlich zu hören, manchmal auch „Feld-, Wald- und Wiesen-Pneumatik“ genannt. Er liest sich etwas „shocking“ hier auf den Seiten der „o + p“, aber wir wollen ihn einmal gelten lassen, denn er taucht en passant in einem der Grundlagengespräche auf, die – wir berichteten schon mehrfach über solche – seitens der Verlagsgeschäftsführung und der jeweiligen Chefredaktionen mit der Spitze in bestimmten Industriefirmen geführt werden. Vor kurzem saßen und diskutierten zusammen in Hannover bei Westinghouse die Herren Lind (Geschäftsführer), Dr. Hilgert, Mitglied des Ständigen Technisch-Wissenschaftlichen Beirats „o + p“, Bartschat (Leiter Geschäftsbereich Steuerungstechnik), Lappe und Koch von Westinghouse und aus dem Hause Krausskopf die Herren Bremer und Hauck (Geschäftsführung), Dr. Strauch (Chefredakteur „o + p“), Ing. Nentwig (Chefredakteur „st“).

Die Westinghouse Air Brake Comp. war 1869 von George Westinghouse, dessen Vorfahren aus Westfalen stammten, in der Nähe von Pittsburgh in den USA gegründet worden. 1884 folgte die deutsche Westinghouse-Gesellschaft in Hannover. Hier wurden zunächst Geräte für Eisenbahnbremsen und später auch für Nutzfahrzeuggremsen entwickelt und gebaut.

Mit dem Namen Westinghouse verbanden sich lange landläufige Vorstellungen von Bremsen. Hier mag es vielleicht so etwas wie eine verzerrte Optik geben, denn Westinghouse ist bezüglich seiner gesamten Produktion differenzierter, als mancher vermuten mag.

George Westinghouse hat nicht nur die Druckluftbremse für Schienenfahrzeuge erfunden und sie ab 1910 auch für Lastkraftwagen erweitert, sondern hat auch bahnbrechendes auf dem Gebiet der damals noch jungen Elektrotechnik geleistet (insgesamt 361 Patente). Die Westinghouse ELECTRIC Comp. gehört zu den angesehensten Elektrofirma der Welt. In Bremsgeräten für Nutzfahrzeuge ist die deutsche Westinghouse heute der größte Hersteller in Europa.