

Drittes Kolloquium

Kavitation und Kavitationserosion

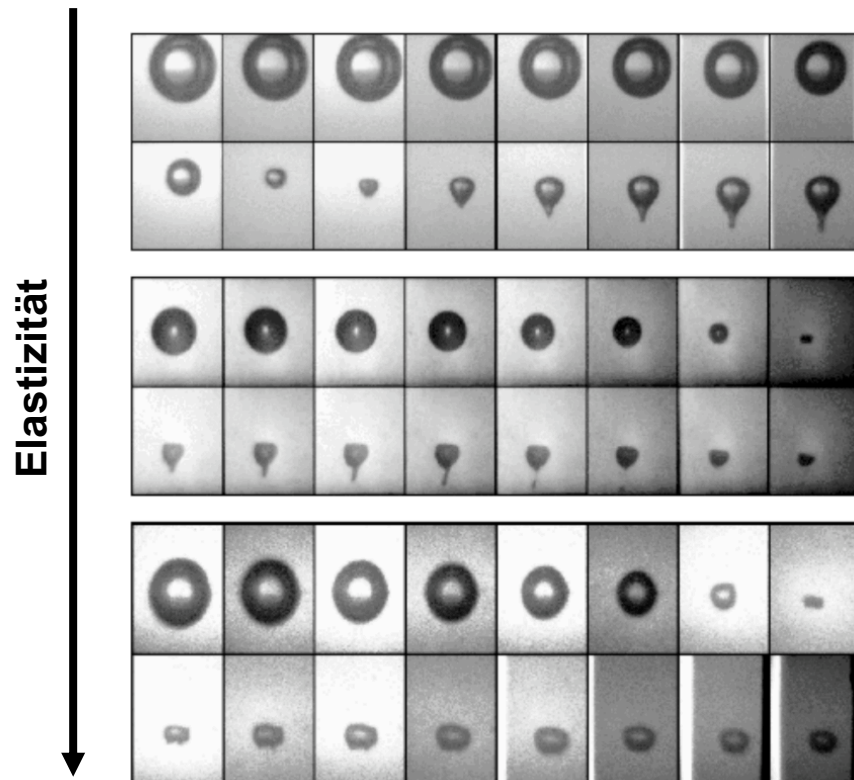
Einfluss rein viskoser Nicht-Newtonscher Fluide auf den Einzelblasenkollaps

Christian Lang, Steffen S. Schmidt, N.A. Adams

Inhalt

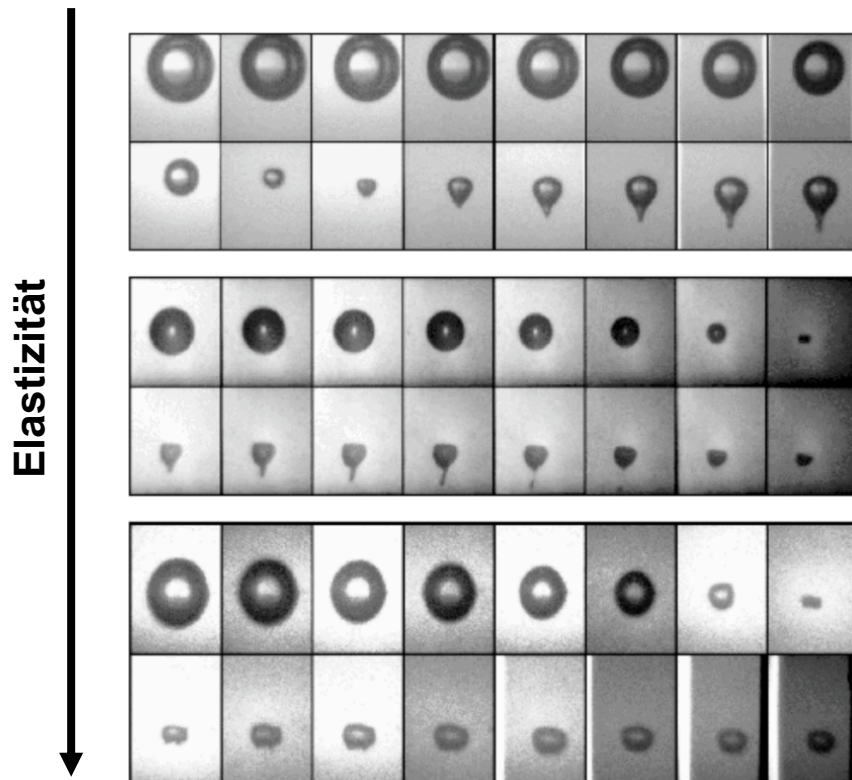
- **Motivation**
- **Einteilung Nicht-Newtonscher Fluide (rein viskose Nicht-Newtonsche Fluide)**
- **Modellierung / Simulation**
- **Ergebnisse – sphärischer Einzelblasenkollaps / asphärischer Einzelblasenkollaps in Wandnähe**
- **Zusammenfassung und Ausblick**

Motivation – Beeinflussung des Kavitationsverhaltens



(Brujan and Williams, 2005)

Motivation – Beeinflussung des Kavitationsverhaltens



(Brujan and Williams, 2005)

Einfluss Nicht-Newtonscher Fluide auf das Kavitationsverhalten in vielen Anwendungsgebieten

Biomechanik / Medizintechnik

(Brujan, 2011)

- Kavitationsvorgänge in Blut (mechanische Herzklappe)
- nichtinvasive Behandlungsmethoden (Lithotripsie, Sonoporation, Sonothrombolyse)
- Diagnostik (Ultraschall-Kontrastmittel)

Hydraulische Maschinen

- Propeller
- geändertes Kavitationsverhalten in Pumpen
- Polymerlösungen (Brujan, 1998, 1999; Brujan, Ikeda and Matsumoto, 2004)

Verbrennungsmotoren

- Reduktion Kavitationserosion in Einspritzsystemen durch Additive

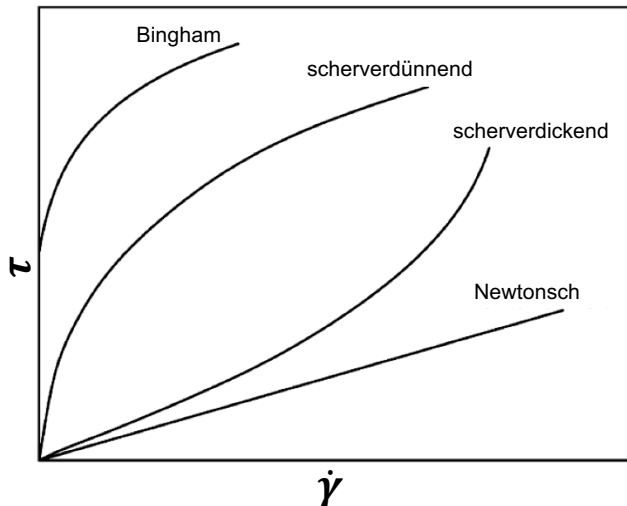
Einteilung Nicht-Newton'scher Fluide

Rein viskose Fluide (generalisierte Newton'sche Fluide)

$$\mu = \mu(\dot{\gamma})$$

$$\tau = \mu(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}$$

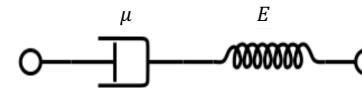
- Spannungen hängen nur von der momentanen Scherrate ab
- scherverdünnendes / scherverdickendes Verhalten



Viskoelastische Fluide

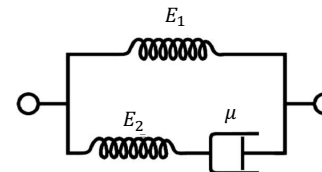
- rheologische Modelle
- objektive Zeitableitungen notwendig
- Historie der Deformation

Maxwell



$$\tau + \frac{\mu}{E} \dot{\tau} = \dot{\gamma}$$

Zener



$$E_2 \tau + \mu \dot{\tau} = E_1 E_2 \gamma + \mu (E_1 + E_2) \dot{\gamma}$$

Ostwald-de Waale Viskositätsmodell (Potenzgesetz)

$$\mu(\dot{\gamma}) = \mu_0 \dot{\gamma}^{n-1}$$

$$\tau = \mu_0 \dot{\gamma}^n$$

$n < 1$	scherverdünnend
$n = 1$	Newtonsches Fluid
$n > 1$	scherverdickend

Berechnung der Scherrate in 3D, kompressibel

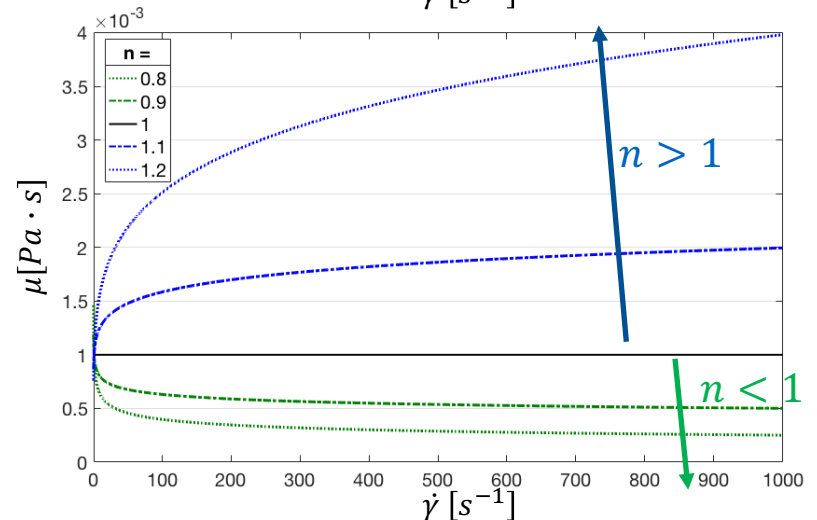
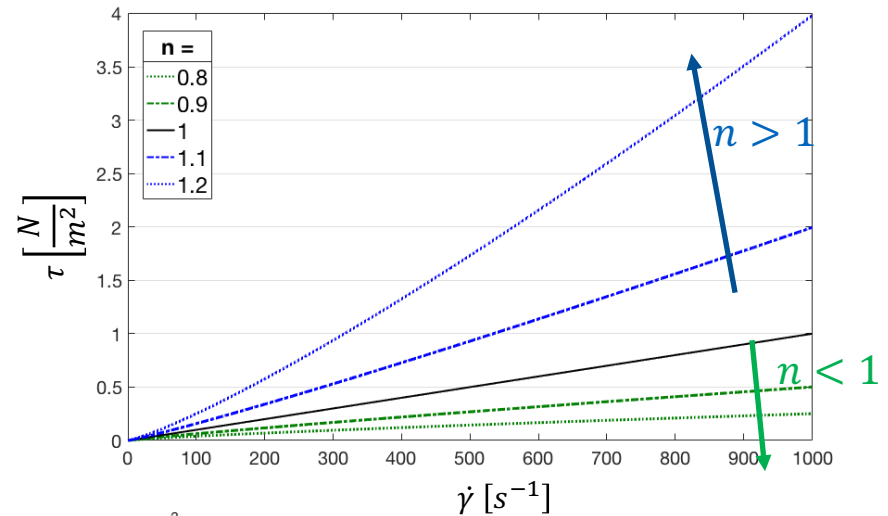
$$\dot{\gamma} = 2 \sqrt{\frac{1}{2} \text{tr}(\underline{\underline{S}})}, \quad \underline{\underline{\tau}} = 2\mu(\dot{\gamma}) \left(\underline{\underline{S}} - \frac{1}{3} \text{tr}(\underline{\underline{S}}) \underline{\underline{I}} \right)$$

- Scherratentensor (symmetrischer Anteil Geschwindigkeitsgradient)

$$\underline{\underline{S}} = \frac{1}{2} (\nabla \underline{u} + \nabla \underline{u}^T) = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

- zweite Invariante (Brujan, 1998)

$$\text{II}(\underline{\underline{S}}) = \frac{1}{2} \left[(\text{tr}(\underline{\underline{S}}))^2 - \text{tr}(\underline{\underline{S}} \cdot \underline{\underline{S}}) \right] = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2 \right]$$

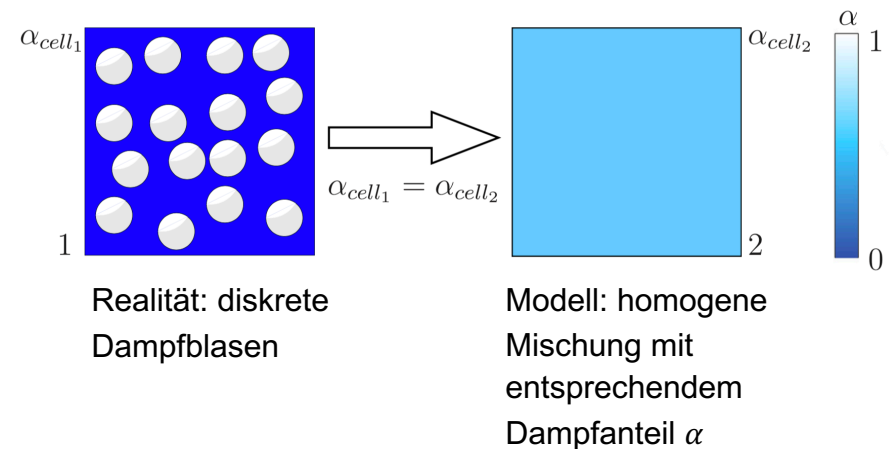


Modellierung / Numerik

CATUM (Cavitation TUM)

- Diskretisierung: Finite Volumen
- Zeitintegration: 4-Schritt-Runge-Kutta
- kompressibel, dichtebasiert
- Turbulenzmodellierung: Implizite Large Eddy Simulation (ILES) (Egerer, 2016; Egerer *et al.*, 2016)
- Stoffgleichung/Thermodynamik: barotrop, konstante Temperatur
- Kavitationsmodellierung: Ein-Fluid Gleichgewichtsmodell (homogenes Mischungsmodell) (Sezal, 2009; Mihatsch, Schmidt and Adams, 2015; Egerer, 2016; Egerer *et al.*, 2016)

Kavitationsmodell – Ein-Fluid Gleichgewichtsmodell (homogenes Mischungsmodell)

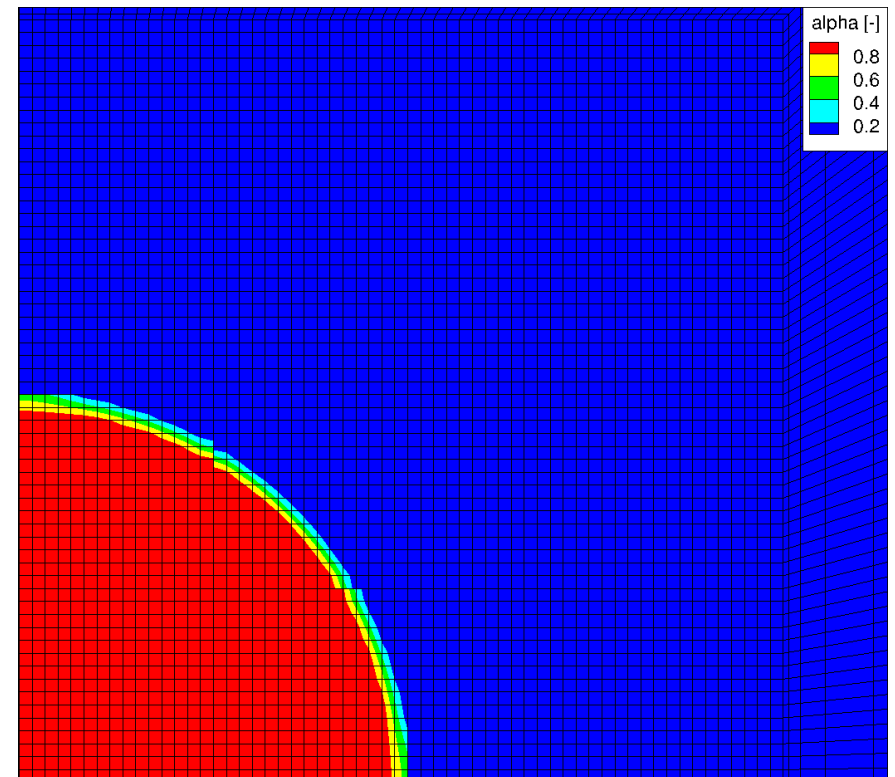


$$\alpha = \frac{\rho - \rho_{l,sat}}{\rho_{d,sat} - \rho_{l,sat}}$$

$$\rho = \alpha \rho_{d,sat} + \rho_{l,sat} (1 - \alpha)$$

Sphärischer Dampfblasenkollaps – Setup

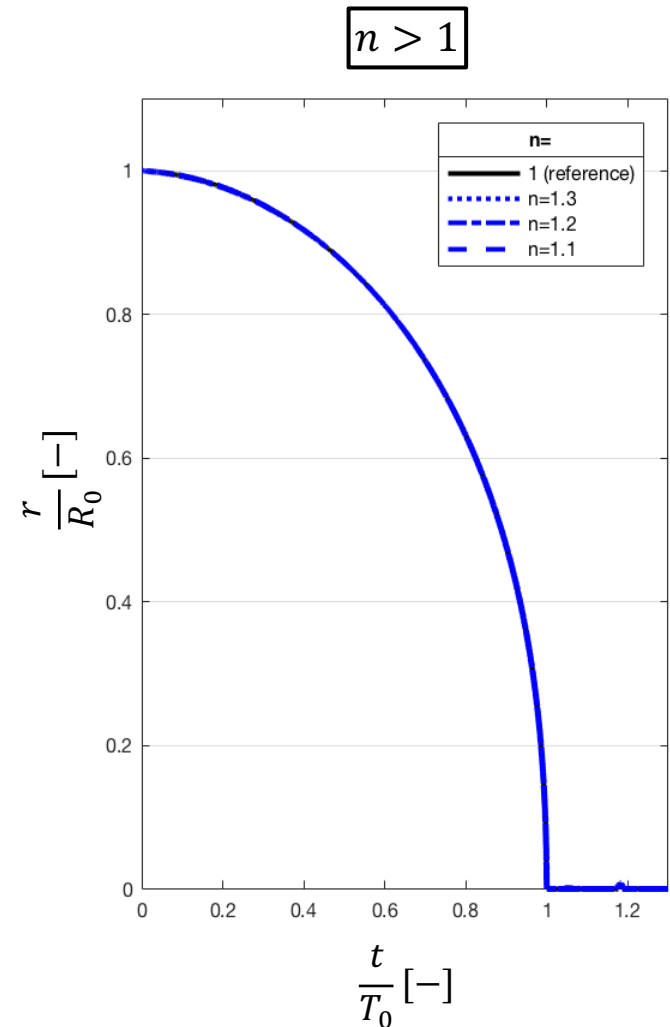
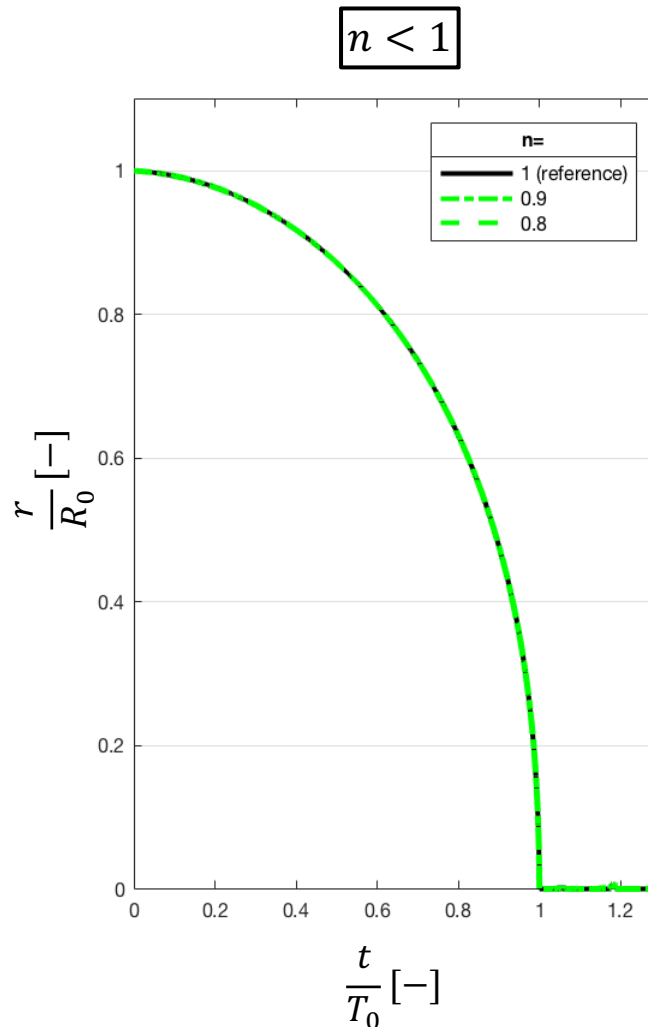
Umgebungsdruck $p_\infty [Pa]$	$\{1 \cdot 10^5, 30 \cdot 10^5\}$
Anfangsradius $R_0 [m]$	$\{1 \cdot 10^{-3}, 1 \cdot 10^{-5}\}$
Parameter $n [-]$ ($\mu = \mu_0 \dot{\gamma}^{n-1}$)	$\{0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3\}$
Auflösung	$30 \frac{\text{Zellen}}{\text{Radius}}$
$\frac{1}{8}$ Blase mit 3 Symmetrieebenen	
Initialisierung mit reinem Dampf	



Sphärischer Dampfblasenkollaps –

$$R_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}, p_\infty = 30 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

- kein Einfluss erkennbar für Scherverdünnung / Scherverdickung
- bei $R_0 = 1 \text{ mm}$ dominieren Trägheitseffekte den Blasen kollaps, viskose Effekte im Verhältnis zu klein um den Blasen kollaps signifikant zu beeinflussen

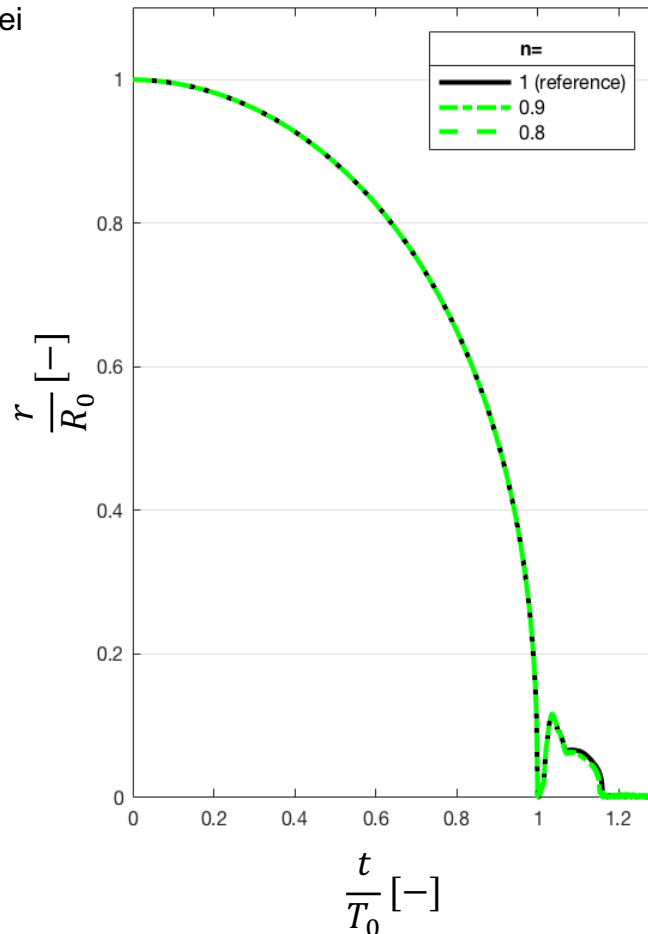


Sphärischer Dampfblasenkollaps –

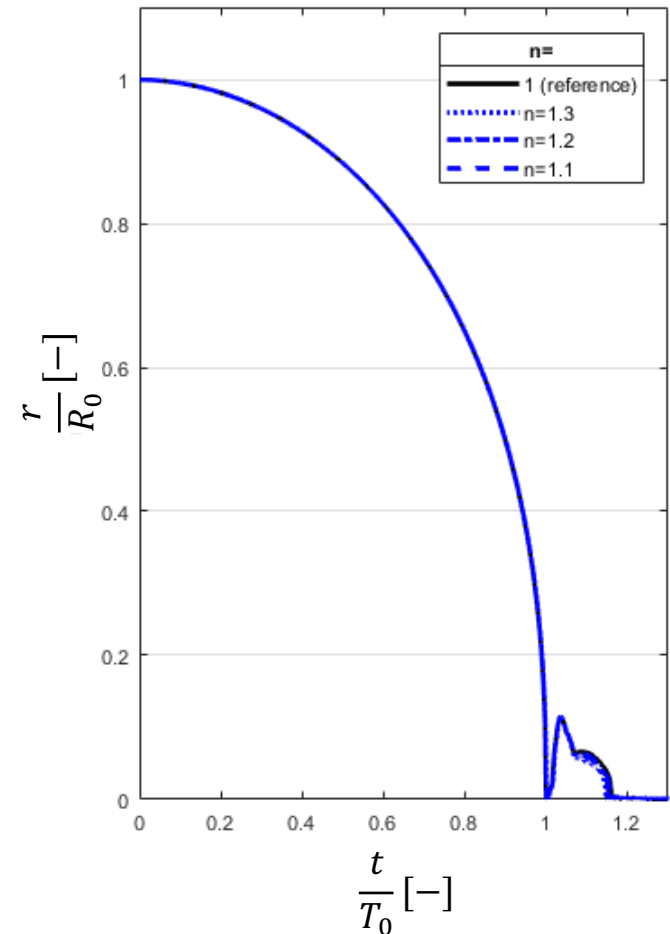
$$R_0 = 1 \cdot 10^{-3} \text{ m}, p_\infty = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

- gleiches Verhalten wie bei Umgebungsdruck $p_\infty = 30 \text{ bar}$
- Trägheitseffekte bestimmen das Blasenkollapsverhalten

$n < 1$



$n > 1$

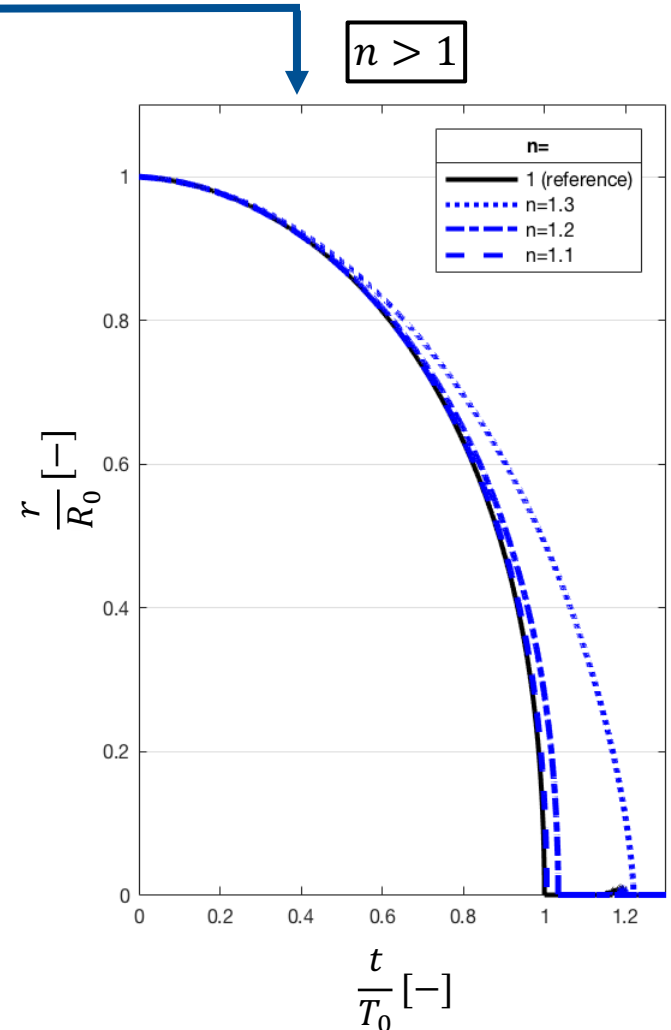
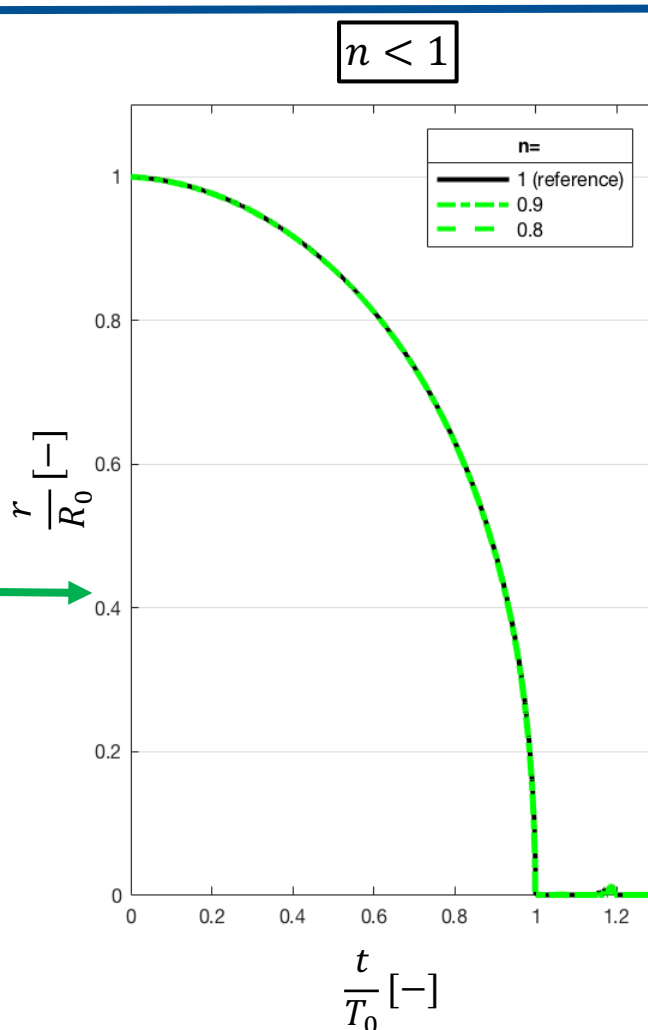


Sphärischer Dampfblasenkollaps –

$$R_0 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}, p_\infty = 30 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

- deutlicher Einfluss scherverdickender Fluide auf den Blasen kollaps
- Scherverdickung verlangsamt den Blasen kollaps / verlängert die Kollapszeit

- für scherverdünnende Fluide ist keine Veränderung im Kollapsverhalten erkennbar



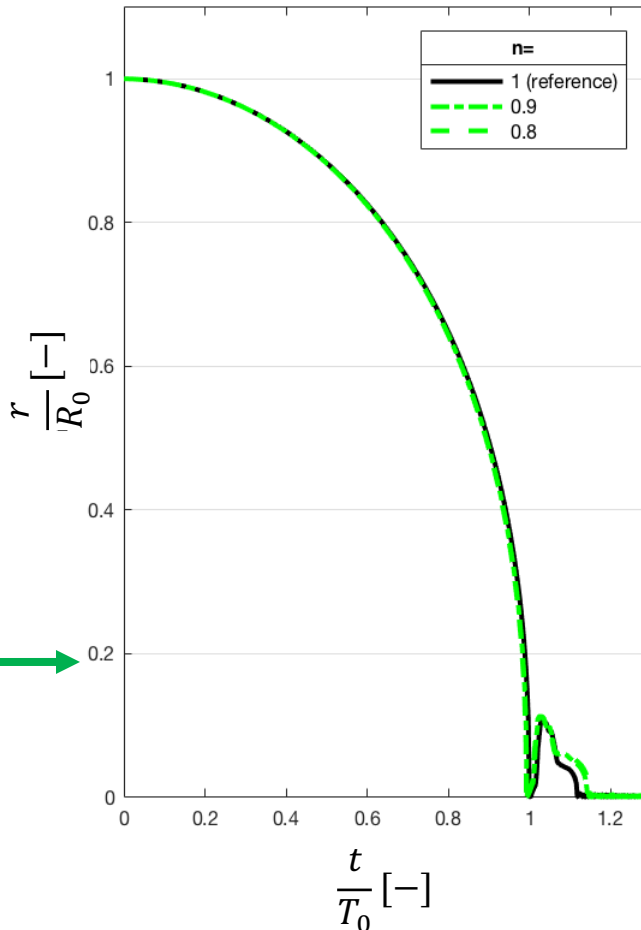
Sphärischer Dampfblasenkollaps –

$$R_0 = 1 \cdot 10^{-5} \text{ m}, p_\infty = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

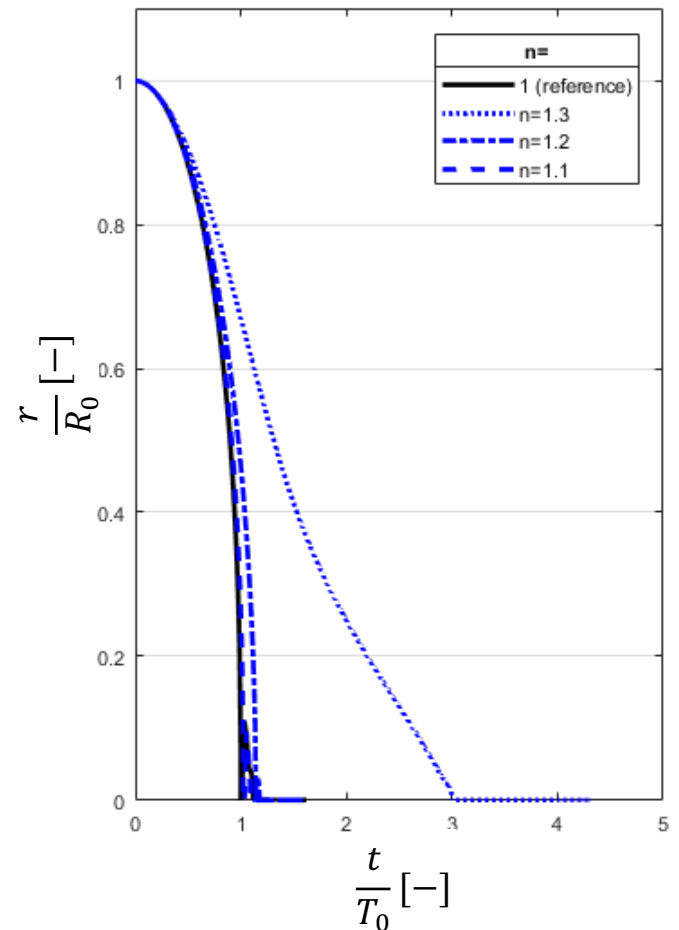
- noch größerer Einfluss scherverdickender Fluide auf den Blasen kollaps
- Scherverdickung verlangsamt den Blasen kollaps / verlängert die Kollapszeit
- für $n = 1.3$ zeigt sich unphysikalisches Verhalten

- kleiner Einfluss scherverdünnender Fluide (Kollapszeit wird geringfügig verkürzt)

$n < 1$

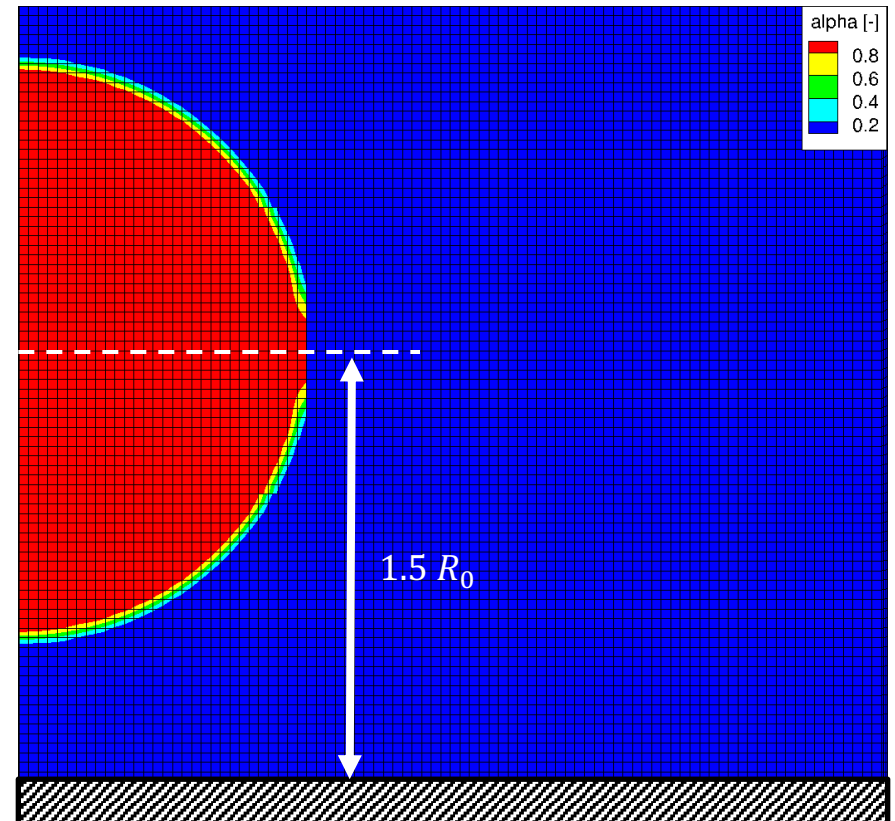


$n > 1$



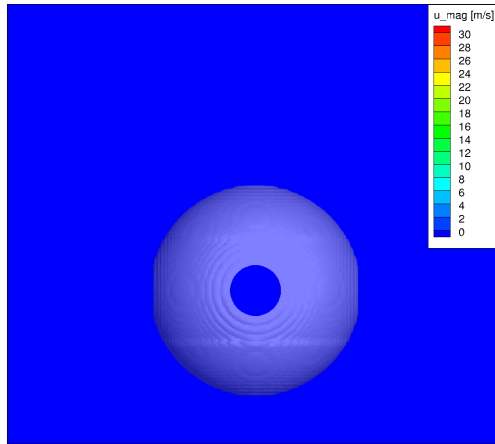
Asphärischer Blasen kollaps in der Nähe einer festen Wand – Setup (vorläufige Ergebnisse für grobes Gitter)

Umgebungsdruck $p_\infty [Pa]$	$\{30 \cdot 10^5\}$
Anfangsradius $R_0 [m]$	$\{1 \cdot 10^{-5}\}$
Parameter $n [-]$ ($\mu = \mu_0 \dot{\gamma}^{n-1}$)	$\{1, 1.3\}$
Auflösung	$30 \frac{\text{Zellen}}{\text{Radius}}$
$\frac{1}{4}$ Blase mit 2 Symmetrieebenen	
Initialisierung mit reinem Dampf	

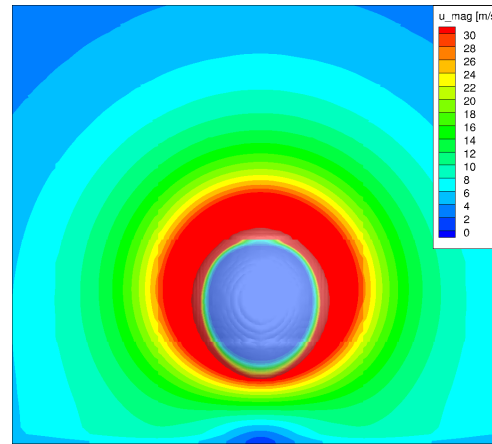


Vorläufige Ergebnisse asphärischer Blasen kollaps – Einfluss eines scherverdickenden Fluids (Vergleich von $n = 1$ und $n = 1.3$)

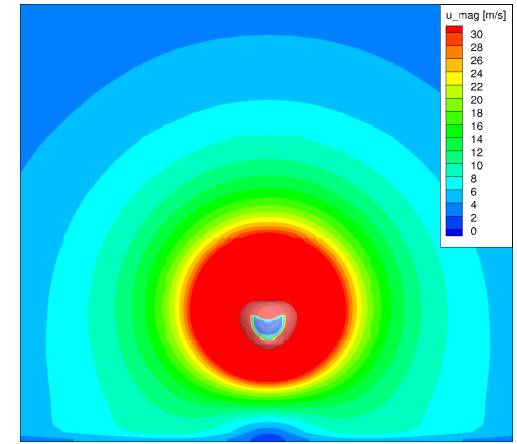
$n = 1$



$t = 0 \text{ s}$

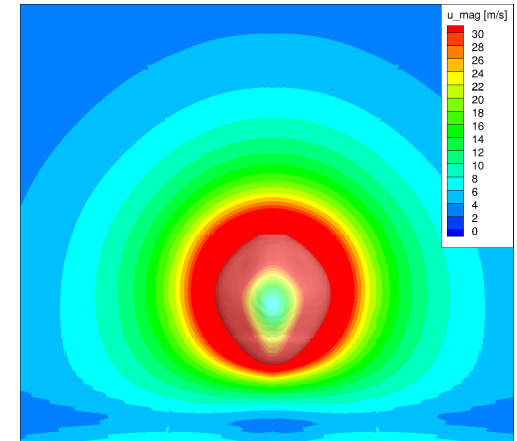
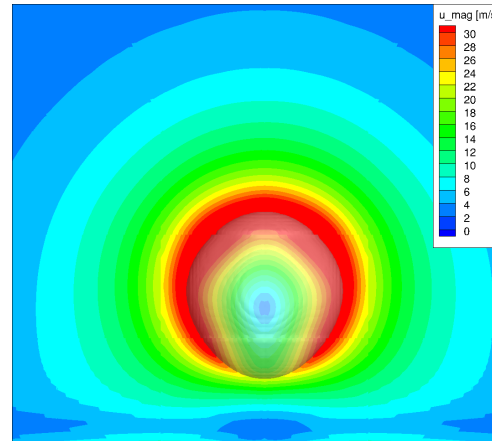
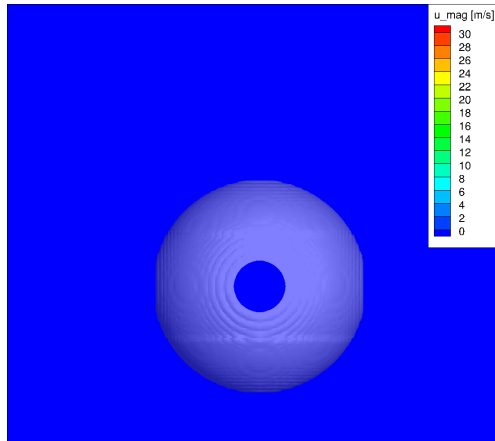


$t = 1.44 \cdot 10^{-7} \text{ s}$



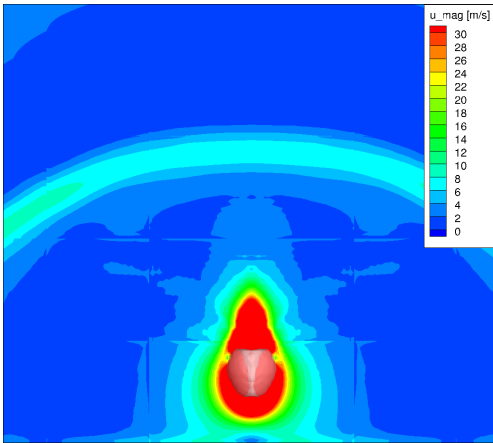
$t = 1.8 \cdot 10^{-7} \text{ s}$

$n = 1.3$

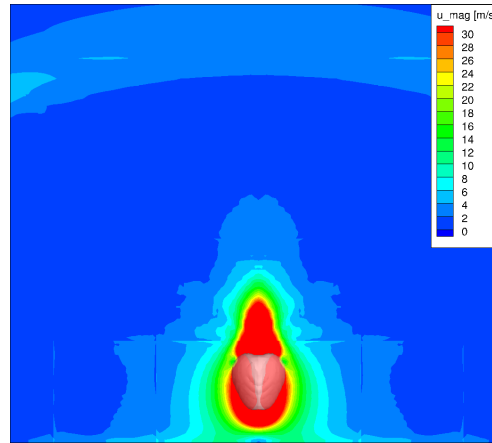


Vorläufige Ergebnisse asphärischer Blasenkolllaps – Einfluss eines scherververdickenden Fluids (Vergleich von $n = 1$ und $n = 1.3$)

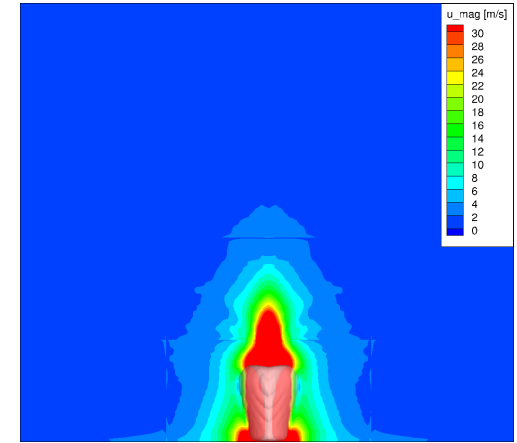
$n = 1$



$t = 2.08 \cdot 10^{-7} s$

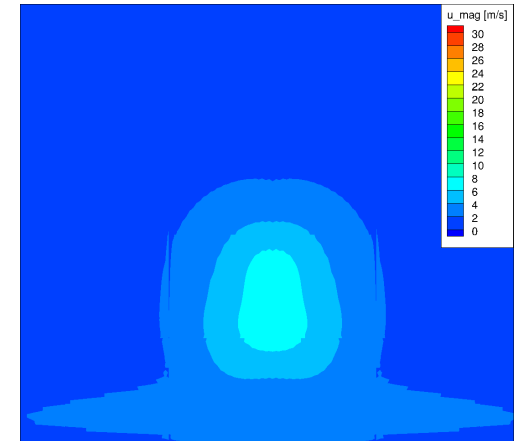
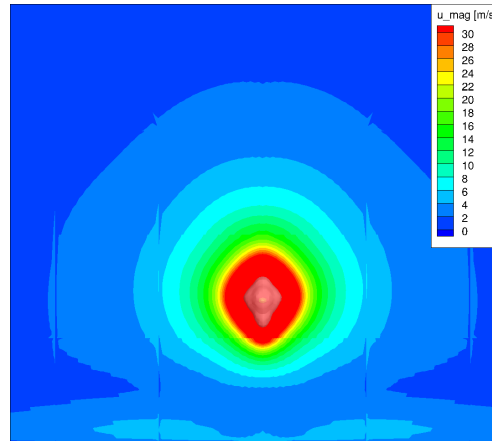
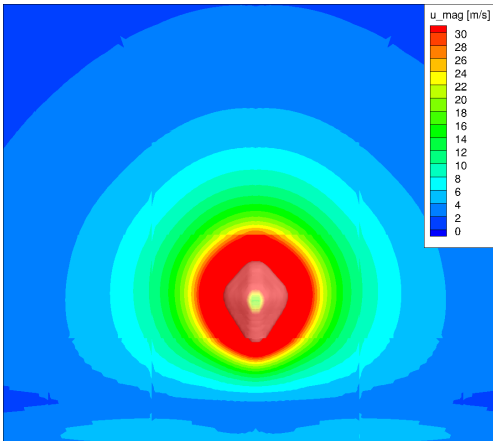


$t = 2.16 \cdot 10^{-7} s$



$t = 2.48 \cdot 10^{-7} s$

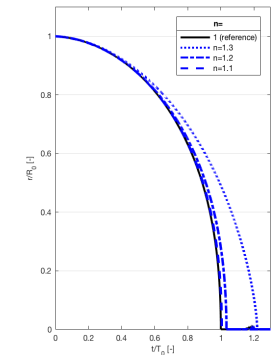
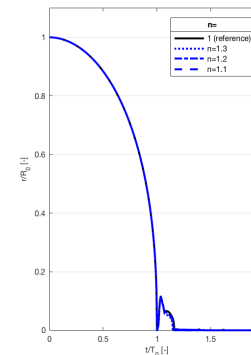
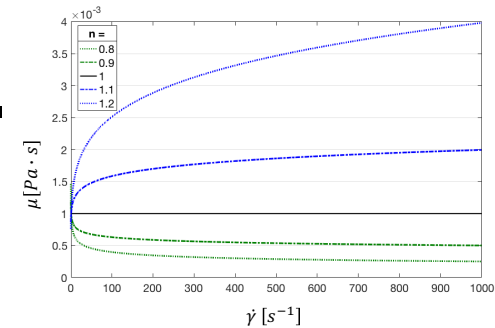
$n = 1.3$



Zusammenfassung und Ausblick

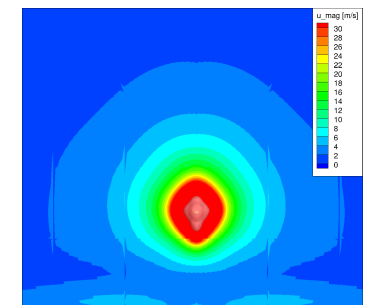
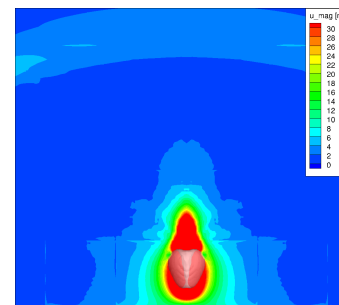
Bisherige Erkenntnisse

- Implementierung des Ostwald – de Waale Viskositätsmodells in den kompressiblen LES-Löser CATUM
- Einfluss von scherverdünnenden / scherverdickenden Flüssigkeiten auf den sphärischen Dampfblasenkollaps
 - scherverdickender Effekt nur bei Dampfblasen bis zu einer bestimmten Initialgröße von Bedeutung
 - Effekt der Scherverdünnung für den sphärischen Fall geringfügig
 - bei kleinerem Druck, größerer scherverdickender Effekt
- starker Einfluss der Nicht-Newtonschen Fluide auf den Blasen kollaps in Wandnähe
 - Unterdrückung des Liquid-Jets bei starker Scherverdickung



$n = 1$

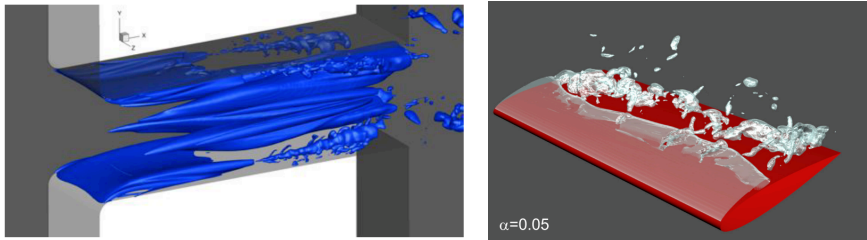
$n = 1.3$



Zusammenfassung und Ausblick

Simulation weiterer Konfigurationen

- **Sphärischer / assphärischer Dampfblasenkollaps**
 - Simulationen mit höherer Auflösung ($100 \frac{\text{Zellen}}{\text{Radius}}$)
 - genauere Untersuchung Kollaps in Wandnähe (auch für scherverdünnende Fluide Effekt vorhanden \Rightarrow Verstärkung der Intensität?)
 - weitere Anfangsbedingungen (Variation von p_∞, R_0)
 - Untersuchung Kollapsdruck als Quantifizierung der potentiellen Schädigung
- **Kavitation in Scherschichten und komplexeren Geometrien**



Implementierung weiterer Viskositätsmodelle

- **andere rein viskose Modelle**

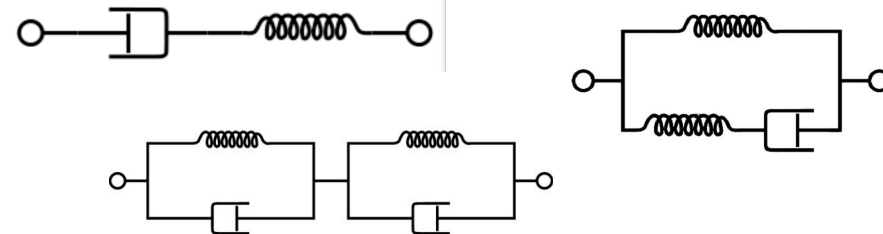
$$\frac{\mu(\dot{\gamma}) - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = [1 + (\dot{\gamma}\lambda)^a]^{\frac{n-1}{a}}$$

Carreau-Yasuda

$$\frac{\mu(\dot{\gamma}) - \mu_\infty}{\mu_0 - \mu_\infty} = \frac{1}{1 + (\dot{\gamma}\lambda)^n}$$

Cross

- **viskoelastische Modelle (zeitabhängig)**



- rheologische Modelle, Elastizität
- objektive Raten

$$\overset{\nabla}{\tau}_{ij} = \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (\mathbf{u}_k \tau_{ij}) - (\tau_{ik} \frac{\partial \mathbf{u}_j}{\partial x_k} + \tau_{kj} \frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_k}).$$

- zusätzliche Transportgleichungen
- Maxwell, Upper Convected Maxwell, Oldroyd-B, PTT,...
- Historie der Deformation

Drittes Kolloquium

Kavitation und Kavitationserosion

Einfluss rein viskoser Nicht-Newtonscher Fluide auf den Einzelblasenkollaps

Brujan, E. A. (1998) 'Bubble dynamics in a compressible shear-thinning liquid', *Fluid Dynamics Research*, 23(5), pp. 291–318

Brujan, E. A. (1999) 'A first-order model for bubble dynamics in a compressible viscoelastic liquid', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 84(1), pp. 83–103

Brujan, E. A. (2011) *Cavitation in Non-Newtonian Fluids*.

Brujan, E. A., Ikeda, T. and Matsumoto, Y. (2004) 'Dynamics of ultrasound-induced cavitation bubbles in non-Newtonian liquids and near a rigid boundary', *Physics of Fluids*, 16(7), pp. 2402–2410

Brujan, E. and Williams, P. R. (2005) 'Bubble dynamics and cavitation in non-Newtonian liquids', *Rheology Reviews*, 2005, pp. 147–172

Dhinakaran, S. *et al.* (2013) 'Steady flow of power-law fluids in a 1:3 planar sudden expansion', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Elsevier B.V., 198, pp. 48–58

Egerer, C. P. *et al.* (2016) 'Efficient implicit LES method for the simulation of turbulent cavitating flows', *Journal of Computational Physics*. Elsevier Inc., 316, pp. 453–469

Egerer, C. P. (2016) 'Large-Eddy Simulation of Turbulent Cavitating Flows', p. 145.

Franc (2005) *Fundamentals of Cavitation*. Springer.

Jawadi, A., Boutyour, H. and Cadou, J. M. (2013) 'Asymptotic numerical method for steady flow of power-law fluids', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Elsevier B.V., 202, pp. 22–31

Manica, R. and De Bortoli, A. L. (2004) 'Simulation of sudden expansion flows for power-law fluids', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 121(1), pp. 35–40

Mendu, S. S. and Das, P. K. (2012) 'Flow of power-law fluids in a cavity driven by the motion of two facing lids - A simulation by lattice Boltzmann method', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. Elsevier B.V., 175–176, pp. 10–24

Mihatsch, M. S., Schmidt, S. J. and Adams, N. A. (2015) 'Cavitation erosion prediction based on analysis of flow dynamics and impact load spectra', *Physics of Fluids*, 27(10)

Oliveira, P. J., Pinho, F. T. and Pinto, G. A. (1998) 'Numerical simulation of non-linear elastic flows with a general collocated finite-volume method', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 79(1), pp. 1–43

Sezal, I. H. (2009) 'Compressible Dynamics of Cavitating 3-D Multi-Phase Flows'.

Ternik, P., Marn, J. and Žunič, Z. (2006) 'Non-Newtonian fluid flow through a planar symmetric expansion: Shear-thickening fluids', *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 135(2–3), pp. 136–148

Yang, W.-J. and Yeh, H.-C. (1966) 'Theoretical study of bubble dynamics in purely viscous fluids', *AIChE Journal*, 12(5), pp. 931–937