

*Technologietag des ERCOFTAC Pilot Center Germany South  
Stuttgart, 30. Sept. 2005*

# **Kavitation, Volumensieden, Ausgasung - Vergleich neuer Modellierungsansätze**

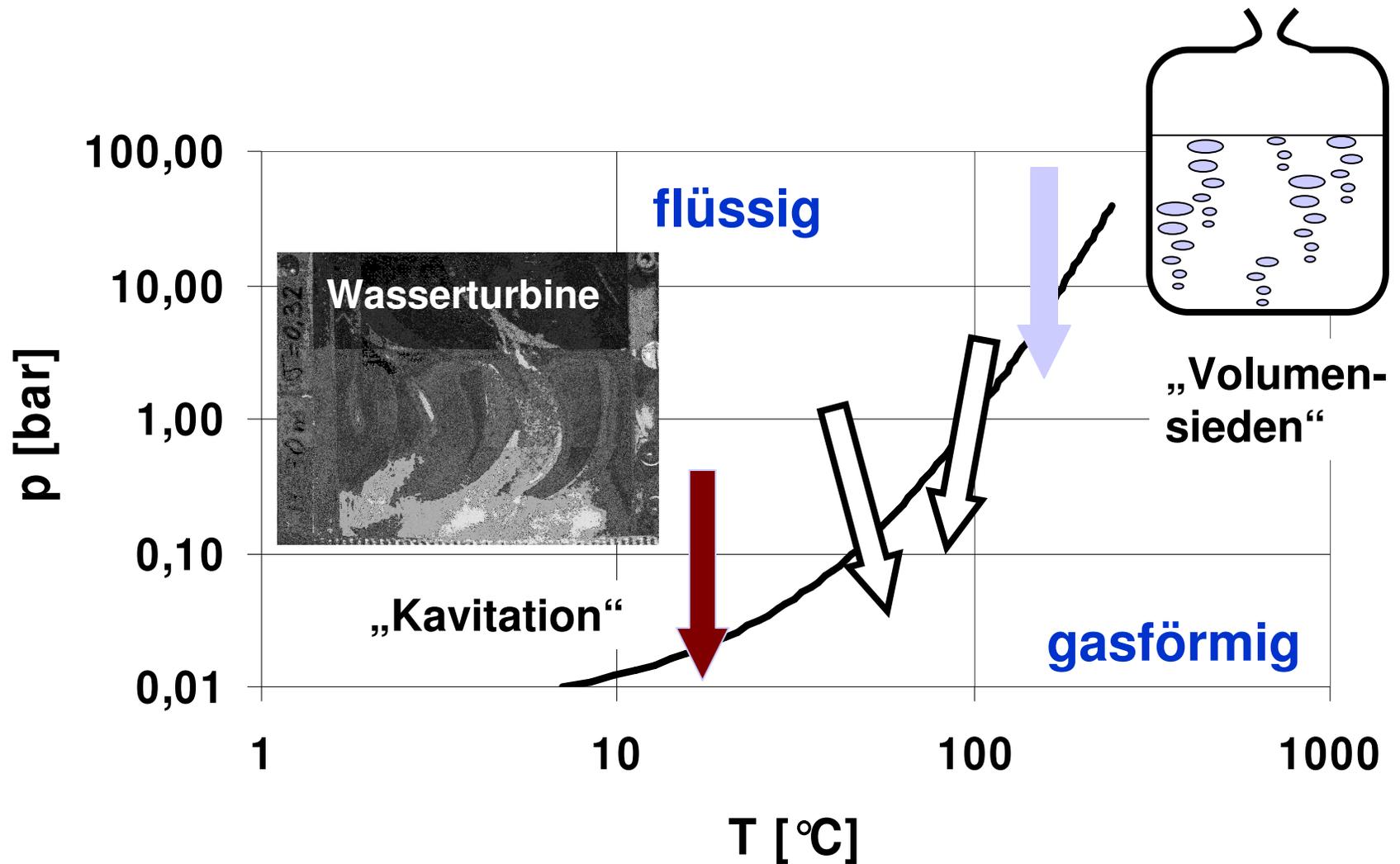
**Eckart Laurien**

*Institut für Kernenergetik und Energiesysteme (IKE)  
Universität Stuttgart*

**Referenzen:** Ohlberg, Giese, Iben, Heusch

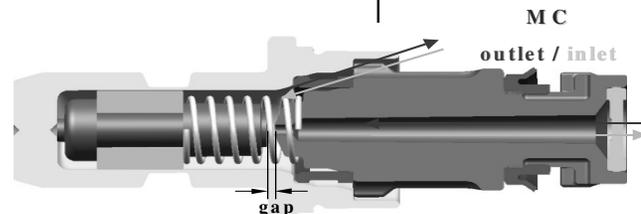
# Begriffe „Kavitation“ und „Volumensieden“

hier: Wasser



# Beispiele Technischer Strömungen mit Kavitation, Volumensieden, Ausgasung

Bezeichnung	Anwendung	flüssige Phase	gasförmige Phase
Kavitation	Wasserturbinen, Pumpen, Schiffbau	Wasser	Wasserdampf und Luft
Thermische Kavitation	 Transport siedender Flüssigkeit	Wasser	Wasserdampf
Aufschäumen, Flashing, Geysir	Druckspeicher, Kernkraftwerk-Leck	Wasser, entgast	Wasserdampf
Kavitation	Kfz Diesel-Einspritzsysteme	Kohlenwasserstoffe	Kohlenwasserstoffe
Ausgasung	Kfz Bremssysteme	Hydraulan	Luft



# Physikalische Mechanismen der Kavitation

## Übersicht und Modellvarianten



# Zwei-Fluid Modell für Zweiphasenströmungen

## Grundgleichungen

### Impulsgleichungen

$$\rho_{k0} \left\{ \frac{\partial(\alpha_k \bar{u}_m^k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{u}^k \bar{u}_m^k) \right\} = - \frac{\partial(\alpha_k \bar{p}^k)}{\partial x_m} + \nabla \cdot \left[ \alpha_k (\bar{\tau}^k + \bar{\tau}^{2\phi,k}) \right] \\ + \bar{u}_m^k \Gamma_k + M_{m,k} + \alpha_k \rho_{k0} \beta_k (\bar{T}^k - T_o) g_m$$

### Energiegleichungen

$$\rho_{k0} \left\{ \frac{\partial(\alpha_k e_{tot}^{2\phi,k})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{u}^k e_{tot}^{2\phi,k}) \right\} = \nabla \cdot \left[ \alpha_k (\bar{q}^k + \bar{q}^{2\phi,k}) \right] + \bar{e}_{tot}^k \Gamma_k + E_k$$

### Kontinuitätsgleichungen

$$\rho_{k0} \left\{ \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{u}^k) \right\} = \Gamma_k \quad ; \quad k = L, G$$



E

BW

RG

KB

BI

# CFD-Modellierungsansätze, Voraussetzungen

**Zwei(Mehr)-Fluid Formulierung (= Euler-Euler Modell)**  
Kontinuumsmechanik, Gleichungen für gemittelte Zustandsgrößen

**Simulation kavitierender Strömungen**  
hier: ohne Akustik, ohne Wand-Wechselwirkung

**Modelle in „multi-purpose“ CFD-Codes implementierbar  
oder bereits implementiert (CFX, Fluent etc.)**



# Modelle für das Blasenwachstum

## Auswahl entsprechend der Wachstumsmechanismen

E

BW

RG

KB

BI

**dynamisch bestimmt**  
(Rayleigh-Plesset Modell)



niedrige Temperatur  
geringe Dampf-Dichte

**thermisch bestimmt**  
(Ranz-Marshall Wärmeübergang)



hohe Temperatur  
große Dichte des Dampfes

**Kontinuitätsgleichungen**

$$\rho_{k0} \left\{ \frac{\partial \alpha_k}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \vec{u}^k) \right\} = \Gamma_k ; \quad k = L, G$$

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{\rho_V - \rho}{\rho_l}}$$

**Rayleigh-Plesset Gleichung**  
(vereinfacht)



# Rayleigh-Plesset Kavitationsmodell, 2D-Beispiel

E

BW

RG

KB

BI



Abbildung 1: Schichtkavitation an einem NACA 65-021 Tragflügel



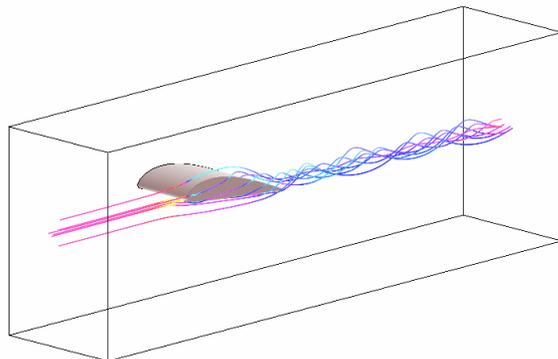
# Rayleigh-Plesset Kavitationsmodell

## 3D-Beispiel

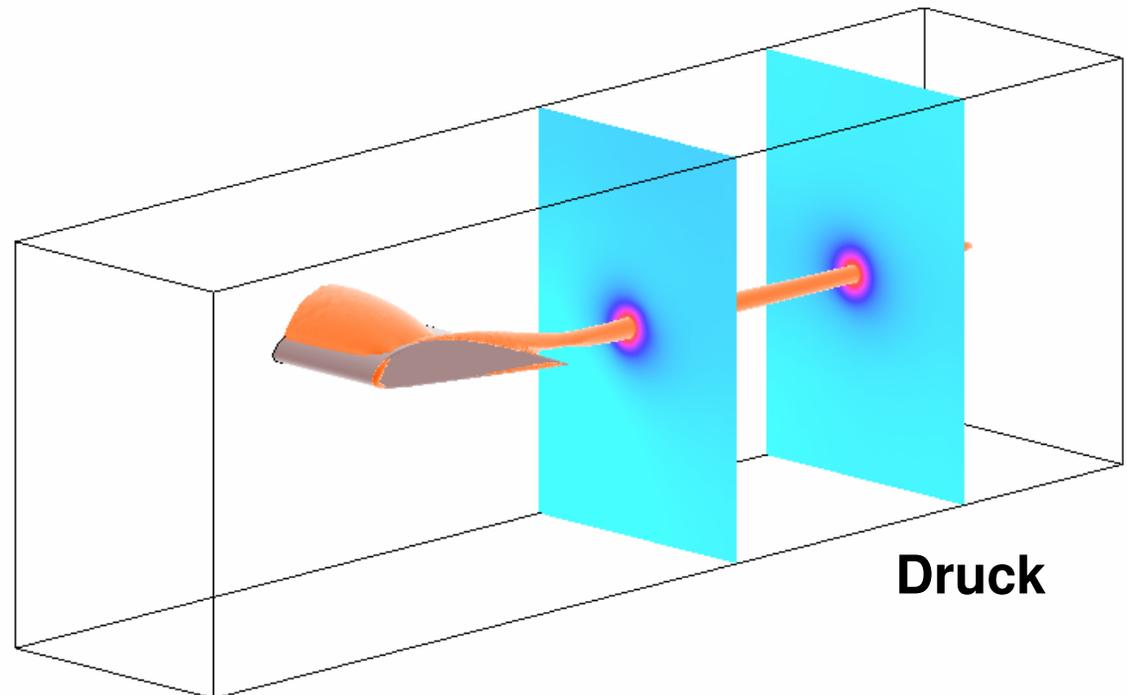
**Druckminimum auf der Saugseite**  
(k-e Modell)



**Druckminimum im Wirbelzentrum**  
(RSM-Modelle oder LES)



**Randwirbel eines hydrodynamischen Profils**

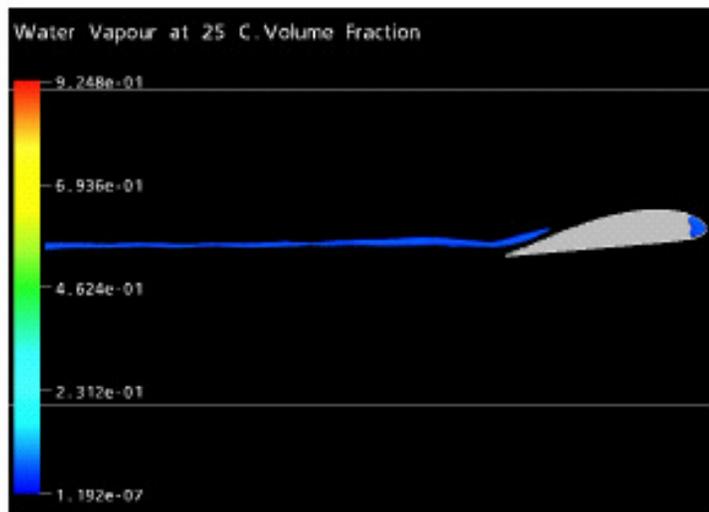
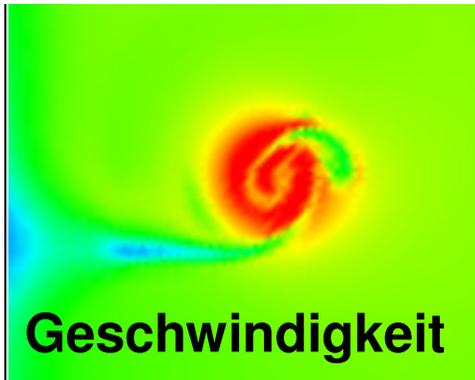


# Rayleigh-Plesset Kavitationsmodell

## Large (Detached)-Eddy Simulation

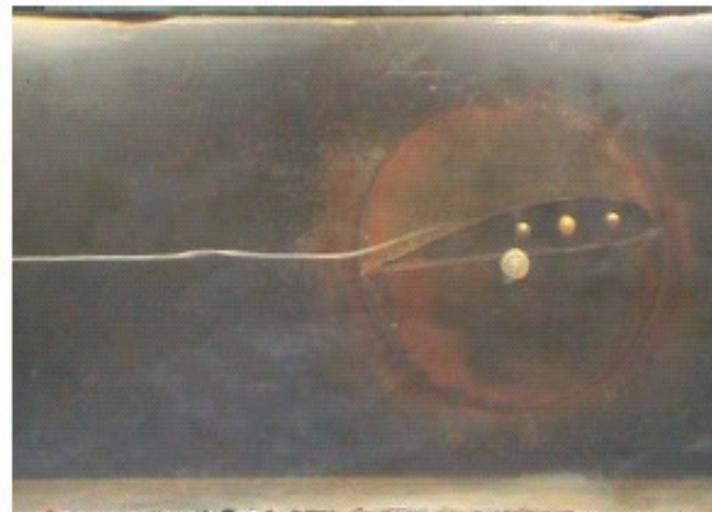
Kavitationszahl

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_{\text{krit}}}{\frac{1}{2} \rho \cdot u_{\infty}^2}$$



Simulation:

$$\sigma = 1,03$$



Versuch:

$$\sigma = 2,99$$

*E. Ohlberg, Diplomarbeit,  
Uni-Stuttgart (2005)*

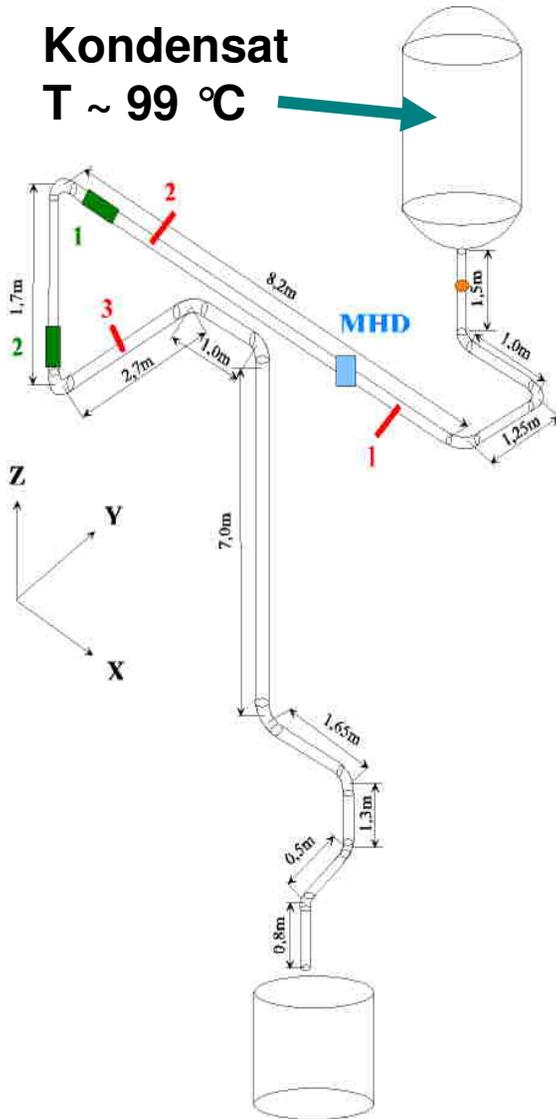


# Thermisches Kavitationsmodell

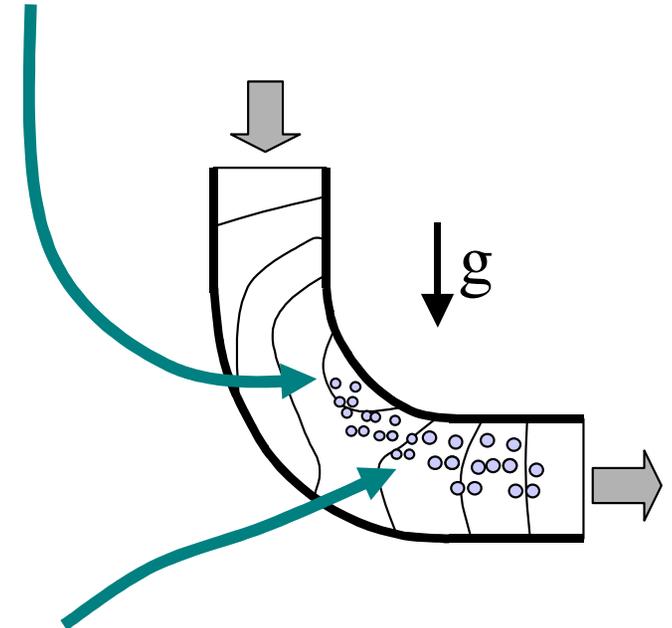
## Beispiel: gravitationsgetriebene Rohrströmung

- E
- BW
- RG
- KB
- BI

Kondensat  
 $T \sim 99 \text{ }^\circ\text{C}$



Keimbildung



Blasenwachstum

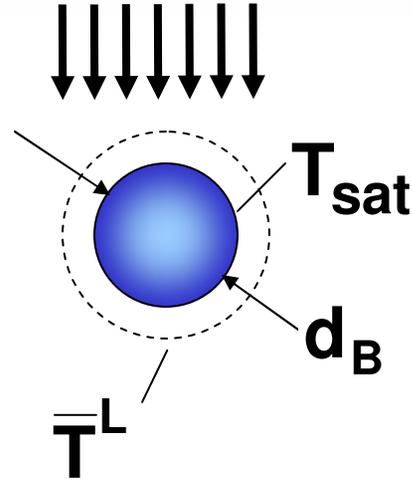
*T. Giese: Dissertation,  
Uni-Stuttgart (2003)*



# Thermisches Wechselwirkungsmodell

## Allgemeine Formulierung

Kavitation:  
 Flüssigkeit überhitzt  
 ⇒ Verdampfung  
  
unterkühltes Sieden  
 Flüssigkeit unterkühlt  
 ⇒ Kondensation



Sprayverdampfung  
 Gas überhitzt  
 ⇒ Verdampfung  
  
Nassdampf:  
 Gas unterkühlt  
 ⇒ Kondensation

### Energiegleichungen

$$\rho_{k0} \left\{ \frac{\partial(\alpha_k e_{tot}^{2\phi,k})}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \bar{u}^k e_{tot}^{2\phi,k}) \right\} = \nabla \cdot [\alpha_k (\bar{q}^k + \bar{q}^{2\phi,k})] + \bar{e}_{tot}^k \Gamma_k - E_k$$

### Wärmeübergangskoeffizient

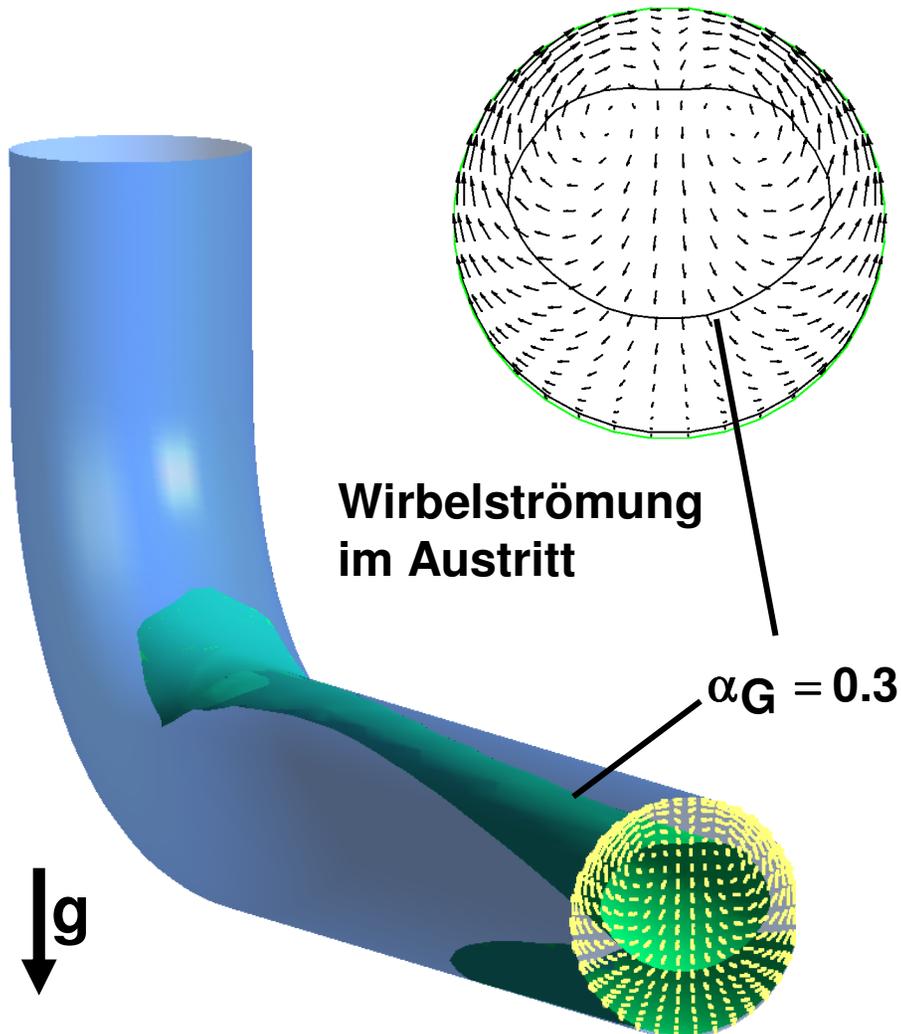
$$h = \frac{\lambda_L}{d_B} (2 + 0.6 Re^{0.5} \cdot Pr_L^{0.33}) \quad ; \quad Re = \frac{d_B \cdot |\bar{u}^L - \bar{u}^G|}{\nu_c}$$

Ranz-Marshall



# Thermisches Kavitationsmodell

## Ergebnis für einen Rohrkrümmer



an die Blasen übertragene Wärme geht in die Verdampfung

Verdrängungswirkung der Blasen beeinflussen Druckverlust des Krümmers

Rekondensation möglich

Blasen steigen auf (Schlupf) und beeinflussen die Flüssigkeitsströmung

# Modelle mit / ohne Relativgeschwindigkeit

## Auswahl entsprechend der Blasengröße

- E
- BW
- RG
- KB
- BI

**Blasen mit Eigendynamik**  
(zwei unabhängige Impulsgleichungen)

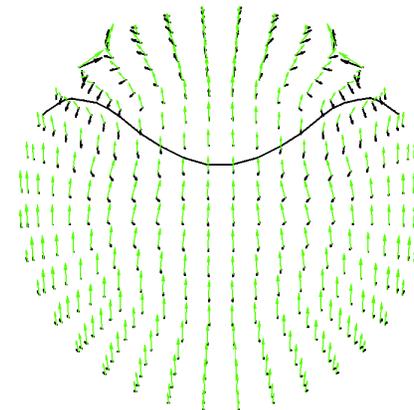
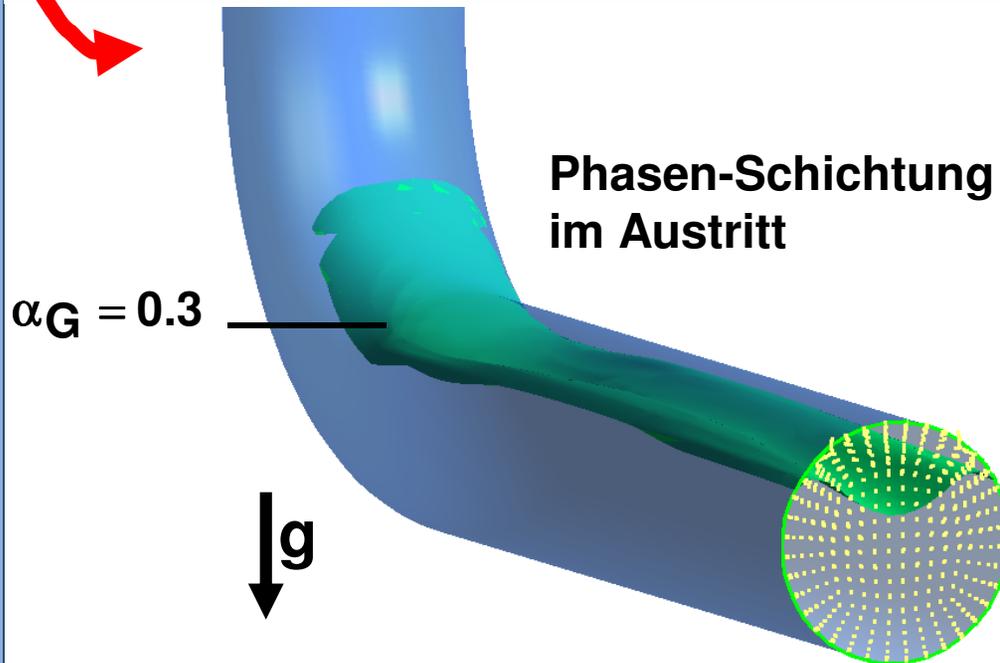


geringe Geschw.  
große Blasen

**Dynamik des Phasengemisches**  
(homogenes Modell, „VoF-Methode“)

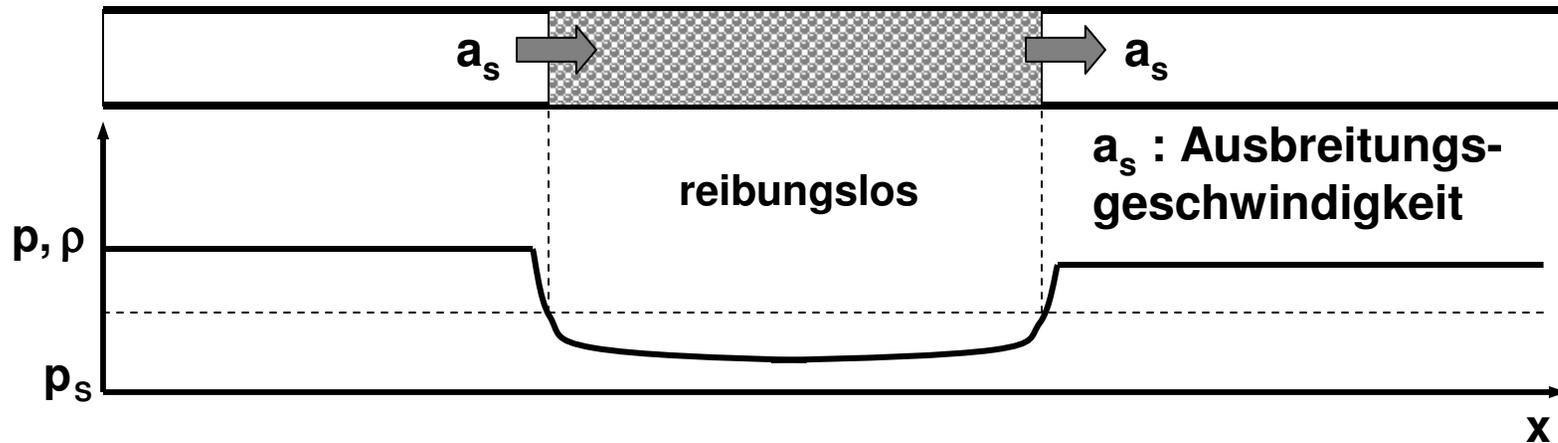


hohe Geschw.  
kleine Blasen



# Homogenes Modell: kein Schlupf

## Transiente Leitungsströmungen



- kompressibles Fluid
- thermisches Nichtgleichgewicht
- Berücksichtigung eines Anfangsluftgehaltes
- Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner Störungen
- Rankine-Hugoniot Beziehungen für kavitierende Strömungen

*U. Iben: Dissertation, Uni-Magdeburg,  
Fortschritt-Berichte VDI, Nr. 462 (2004)*



# Modelle für die Keimbildung

## für Zwei-Fluid Modell oder homogenes Modell

E

BW

RG

KB

BI

### Keime in der Anströmung:

(ohne „Keimbildungsmodell“)

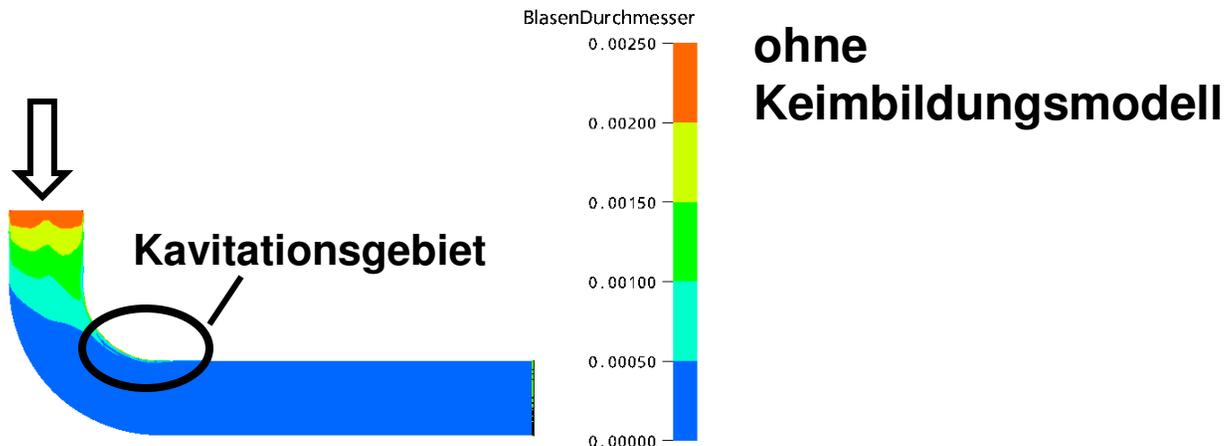
- keine inaktiven Keime
- keine Sekundärkeimbildung
- unterliegen Wachstumsmodellen

$$\alpha_G = n \cdot \frac{\pi}{6} d_B^3$$

- $\alpha_G$  volumetrischer Dampfgehalt
  - $n$  Anzahldichte der Keime
  - $d_B$  Keimdurchmesser
- (zwei dieser Größen am Rand vorgeben)

### Keimbildung im Strömungsfeld:

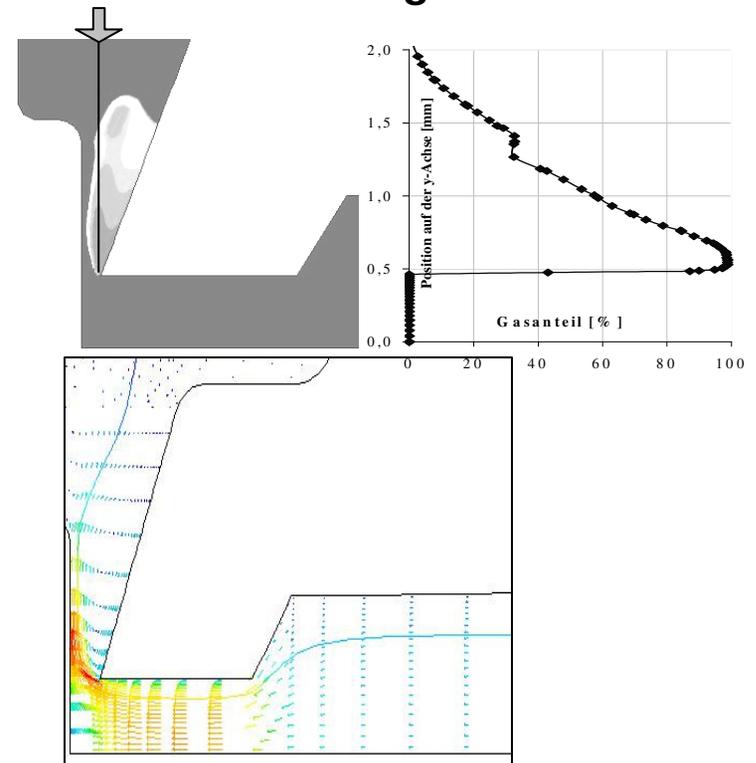
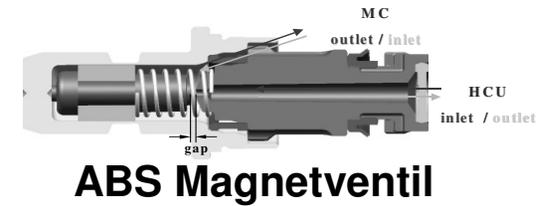
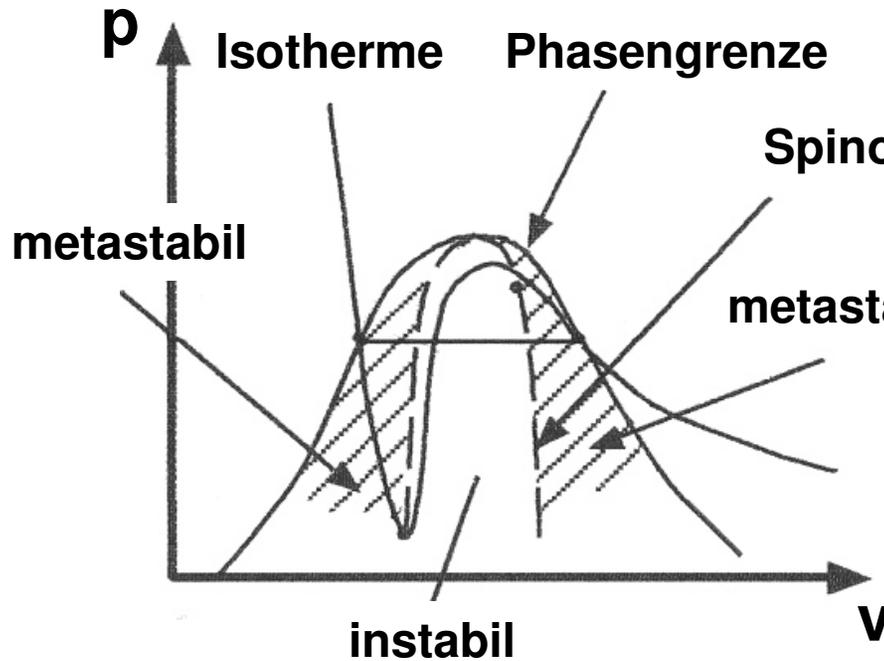
(Keimbildungsmodell)



- E
- BW
- RG
- KB
- BI

# Modelle für Keimbildung im Strömungsfeld

## Anwendung: Ausgasung aus einer Bremsflüssigkeit



$$\frac{d\alpha}{dt} = \underbrace{-\alpha \cdot k_{e \rightarrow g}}_{\text{Verlust}} + \underbrace{(1-\alpha) \cdot k_{g \rightarrow e}}_{\text{Gewinn}}$$

$$k_{g \rightarrow e} = \frac{p}{\tau \cdot C} \left( \exp\left[\frac{(-g_{\text{bar}} + f + p v_b)}{C}\right] - \exp\left[\frac{-g_{\text{bar}} + f + p v_{\text{bar}}}{C}\right] \right)$$

$$k_{e \rightarrow g} = \frac{p}{\tau \cdot C} \left( \exp\left[\frac{(-g_{\text{bar}} + f + p v_{\text{bar}})}{C}\right] - \exp\left[\frac{-g_{\text{bar}} + f + p v_{\infty}}{C}\right] \right)$$

$$C = \frac{k_B}{m_C} \cdot T$$

*M. Heusch: bisher unveröffentlichter Bericht*

# Modelle für die Blasengrößen-Verteilung

## Diskussion

**keine Blaseninteraktion**  
(konstante Anzahldichte pro Flüssigkeitsvolumen)



Gasgehalt < 5%

**Konstante Blasengröße**  
(Zerfall bei Wachstum)

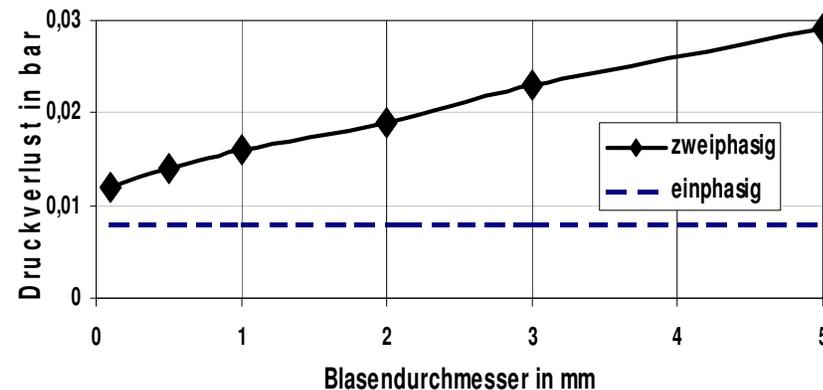
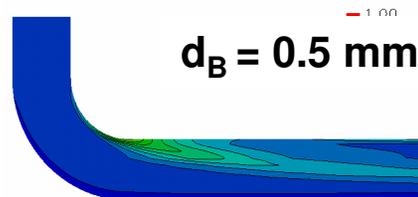


maximale Blasengröße bekannt

**Blasengrößen-Modell**  
(Gleichgewichtsmodell oder MUSIG)



Validierung erforderlich



# Blasengrößen-Verteilung

## Einführung

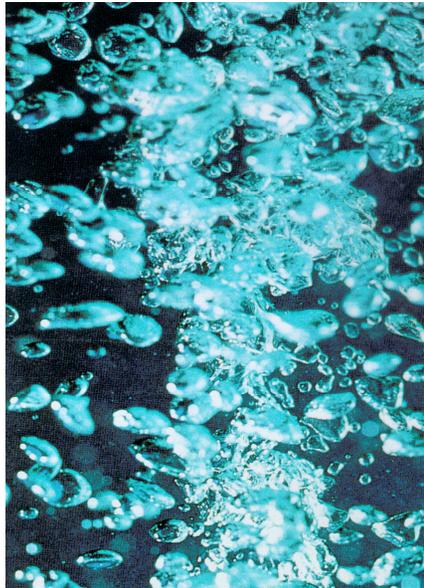
E

BW

RG

KB

BI

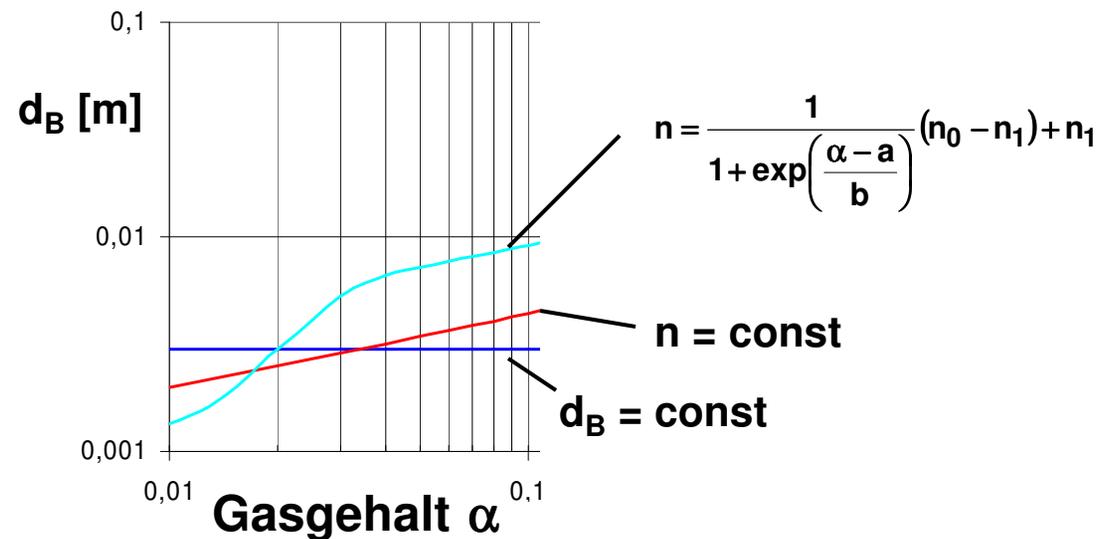


**allgemeine  
Blasenströmung**

— Zwei-Fluid Modell oder homogenes Modell:  
Blasengröße:  $d_B(x,y,z)$

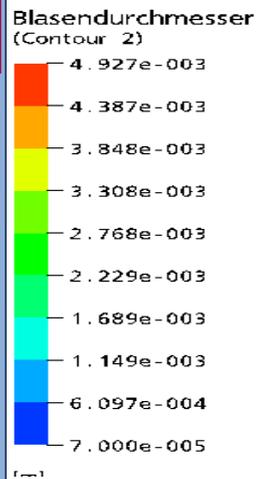
(MUSIG) mit Koaleszenz / Fragmentation (zeitabhängig)  
Blasengrößenspektrum:  $f(d_B, x, y, z)$

— Koaleszenz / Fragmentation im Gleichgewicht  
Blasengröße:  $d_B(\alpha, x, y, z)$

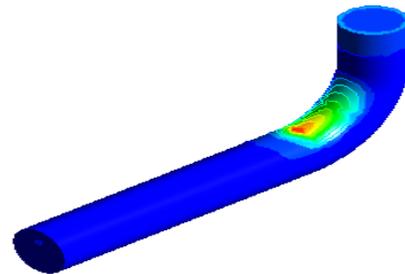


# Koaleszenz/Fragmentation, Gleichgewichtsmodell

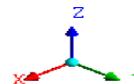
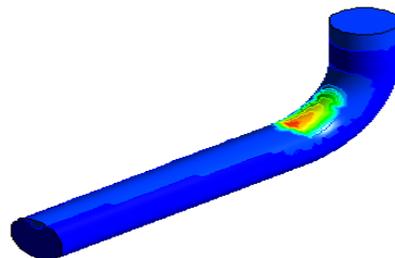
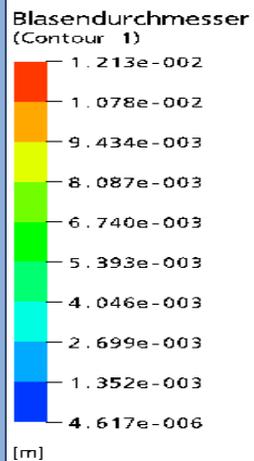
## Ergebnisse



$n = \text{konst}$



$$n = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{\alpha - a}{b}\right)} (n_0 - n_1) + n_1$$





# **Ausblick**

## **Modellvalidierung von Zweiphasenströmungen**

(Kombination der Modell-Varianten entsprechend  
der jeweiligen technischen Anwendung)

### **Kernenergietechnik: CFD-Forschungsverbund des BMWA**



**Entwicklung und Anwendung von CFD-Programmen  
für Phänomene im Kühlkreislauf von Leichtwasserreaktoren**

**. . . oder in zukünftigen Technologieprojekten**