

## FKZ 2476: Ausbreitung und Ausregnen im Fall von Zweiphasen-Freistrahlen aus Gas und Flüssigkeit in ruhender Luft

L. Friedel, S. Al Rabadi, Institut für Strömungsmechanik, Technische Univ. Hamburg-Harburg

Die Ausbreitung infolge des Mitrisses von Umgebungsluft, die Änderung der Konzentration im Freistrahle, die Reich- bzw. Wurfweite und der Ausfall der Flüssigphase in der Form des sog. Ausregnens sind u.a. wichtige Fragestellungen im Rahmen der Erstellung einer Sicherheitsanalyse für eine Prozeßanlage in der Chemischen Industrie bei der Gegebenheit eines postulierten Behälterwandrisses, einer undichten Dichtung oder eines Guillotine-Rohrbruches. Die rechnergestützte Vorhersage erfolgt regelmäßig mit Hilfe von integralen Multiphysik-Ausbreitungsmodellen. Die wichtigsten Untermodelle für das Schließen der Erhaltungsgleichungen betreffen im wesentlichen die anfängliche Tropfengröße, ggf. nach Fragmentierung der Flüssigphase, die Relativgeschwindigkeiten zwischen den Tropfen und der Gasphase bzw. der ruhenden Luft sowie den Wärme- und Stoffübergang zwischen den Phasen. Die Messungen zur Validierung der Untermodelle bzw. der integralen Vorausberechnungen sind praktisch ausschließlich mit Gemischen aus Wasser und Luft durchgeführt worden, so daß die Aussagen nicht auf die in der industriellen Praxis eingesetzten Stoffe mit anderen thermodynamischen Eigenschaften und insbesondere Transportgrößen verlässlich extrapolierbar sind. Das Ziel ist daher eine auf analytischen und experimentellen Untersuchungen gestützte Modellbewertung.

Im Rahmen der Arbeit ist eine Versuchsanlage für den Betrieb mit einem Zweiphasengemisch aus Luft und Wasser für den Einsatz von viskosen, newtonschen Glukosesirup als flüssige Phase erweitert worden, Abb. 1. Bei den Experimenten sind im sog. Ähnlichkeitsbereich der Ausbreitung des horizontalen Freistrahles, d. h. in einem Abstand stromabwärts von mindestens dem 30fachen Düsenaustrittsdurchmesser, Abb. 2, mit Hilfe der Laser Doppler Anemometrie (LDA) und der Hochgeschwindigkeitskinematographie sowie gravimetrisch die nachstehend genannten Größen und Merkmale ermittelt worden:

Größenverteilung, Tropfenbahnen und Geschwindigkeiten der Tropfen,  
Aufweitungswinkel des Freistrahles und  
ausgefallene Flüssigkeitsmasse

Der detaillierten Messung der sich selbst einstellenden Tropfengröße wurde eine besondere Bedeutung zugemessen, da dieses Merkmal einen wesentlichen Einfluß auf die Ausbreitung des Freistrahles und den Ausfall der Tropfen ausübt und da der Vergleich mit den Ergebnissen aus vorangegangenen Experimenten am selben Versuchsstand bei ansonsten identischen Betriebsbedingungen mit Freistrahlen aus Luft und Wasser besonders eindeutige Aussagen ermöglicht.

Während der Versuche wurden systematisch die Parameter Düsendurchmesser und -länge, Druck im Austrittsquerschnitt, Gesamtmassenstrom und Strömungsmassenluftgehalt, axialer und radialer Meßabstand stromabwärts von dem Austrittsquerschnitt der Düse sowie insbesondere die Stoffwerte, Tab. 1, verändert.

Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zur Flüssigkeitfragmentierung bzw. Trop-

fenbildung, Abb. 3, und der LDA Messungen zur radialen und achsialen Tropfengeschwindigkeit im (horizontalen) Freistrahlfeld bei Flüssigkeitsviskositäten von bis zu 700 mPas zeigen im Vergleich zu den ansonsten bei gleichen Versuchsbedingungen durchgeführten Messungen mit Luft-Wassergemischen [1], daß die Tropfen auf der Basis einer Beschreibung mit Hilfe des Sauterdurchmessers merklich kleiner sind, Abb. 4. Dies gilt um so mehr, je größer die Flüssigkeitsviskosität ist. Insgesamt gilt, daß im Vergleich zu den Ergebnissen für den Freistrahlfeld aus Luft und Wasser die Wurfweite länger ist, u. a. aber auch aufgrund der gleichzeitig höheren Dichte der Flüssigphase. Dies führt dann auch zu einem stärkeren Ausregen.

Im Rahmen der analytischen Arbeiten wurde ein neues Modell für die Vorhersage der achsialen und der radialen Tropfengeschwindigkeit auf der Basis der Beschleunigungsphase und der anschließenden Verzögerungsphase der Tropfen entwickelt und den Meßwerten angepaßt. Das Gleichungssystem lautet:

Tropfengeschwindigkeit auf der Freistrahlfeldachse

$$u_{droplet_{centerline}}(s) = u_{expansion\ air} \cdot \underbrace{\left(1 + \left(1 - \exp\left(-A \cdot \sqrt{\frac{s}{d_{Nozzle}} - \frac{s_{virtual}^2}{d_{Nozzle}^2}}\right)\right)\right)}_{\text{Beschleunigung}} \cdot \underbrace{\exp\left(-0.158 \cdot \sqrt{\frac{s}{d_{Nozzle}} - \frac{s_{virtual}^2}{d_{Nozzle}^2}}\right)}_{\text{Verzögerung}} \quad \text{mit}$$

$$u_{expansion\ air} = u_{Nozzle} + \frac{(P_{outlet} - P_{ambient}) \cdot A_{Nozzle}}{\dot{M}_{Total(Nozzle)}}, \quad u_{Nozzle} = \frac{\dot{M}_{Total(Nozzle)}}{\rho_{Nozzle} \cdot A_{Nozzle}}$$

$$A = \frac{22.5}{Re_{Nozzle}} \cdot \frac{\eta_{Air(P_{ambient})}}{\eta_{Liq}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Liq}}{\rho_{Air(P_{ambient})}}}, \quad s_{virtual} = d_{Nozzle} (1.92 \cdot \ln Re_{Nozzle} - 23.1)$$

$$Re_{Nozzle} = \frac{4 \cdot \dot{M}_{Total(Nozzle)}}{\pi \cdot d_{Nozzle} \cdot \eta_{Nozzle}} \quad \text{und} \quad \eta_{Nozzle} = 1 / \left( \frac{\dot{x}_{Air(Nozzle)}}{\eta_{Air(P_{ambient})}} + \frac{1 - \dot{x}_{Air(Nozzle)}}{\eta_{Liq}} \right)$$

Radiale Tropfengeschwindigkeit

$$u_{droplet}(s, r) = u_{droplet_{centerline}}(s) \cdot \exp\left(-0.693 \cdot \frac{r}{C_{Entrainment}(s) \cdot (s - s_{virtual})}\right)^{1.3} \quad \text{mit}$$

$$C_{Entrainment}(s) = 0.11 - \frac{0.02}{1 - \dot{x}_{Air(Nozzle)}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{Air(P_{ambient})}}{\rho_{jet,hom}(s)}},$$

$$\rho_{jet,hom}(s) = 1 / \left( \frac{\dot{x}_{Air}(s)}{\rho_{Air(P_{ambient})}} + \frac{1 - \dot{x}_{Air}(s)}{\rho_{Liq}} \right) \quad \text{und}$$

$$\dot{x}_{Air}(s) = (\dot{M}_{Air} + \dot{M}_{Entrainment}(s)) / \dot{M}_{Total}(s)$$

**Vorschlag für ein Zweizonen Modell für die Tropfengeschwindigkeit auf der Freistrahlfeldachse und für die radiale Tropfengeschwindigkeit**

Die Vorhersagen des neuen Modells und die gemäß dem Rechenprogramm Ejet bzw. J. L. Woodward [2] sowie die entsprechend den Modellen gemäß V. Ianello et al. [3] und R. Surma [4] wurden den Meßergebnissen gegenübergestellt. Erwartungsgemäß zeigte sich, daß die Wiedergabeungenauigkeit der an Gemischen aus Luft und Wasser kalibrierten Ausbreitungsmodelle gemäß Ejet, V. Ianello et al. und R. Surma größer ist, da rechnerisch (weiterhin) von einer unveränderten anfänglichen mittleren Tropfengröße ausgegangen wird, während (erwartungsgemäß) das neue Modell die geringsten Ungenauigkeiten aufweist, Tab. 2. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsergebnisse und der analytischen Untersuchungen ist in /5,6/ enthalten.

Insgesamt gilt, daß die experimentellen und analytischen Ergebnisse der Untersuchungen jetzt eine bessere Einschätzung der Eignung der Multiphysik-Ausbreitungsmodelle bzw. Rechenprogramme für die Zwecke der (deutschen) Chemischen Industrie erlauben, so daß insgesamt ein sicherheitstechnisch bedeutsamer und dringend erforderlicher Beitrag zur realitätstnahen Gefährdungsabschätzung möglich sein wird. Sie stellen eine für die industrielle Praxis notwendige Ergänzung zur Richtlinie VDI 3783 für die Ausbreitung von Gasen dar.

## Literatur

- [1] R. Surma, L. Friedel, P. Bricard: Geschwindigkeit und Größe der Tropfen in horizontalen Zweiphasen-Freistrahlen aus Wasser und Luft in ruhender Umgebung, Teil 1 und 2. Techn. Überwachung 44 (2003), 4, 24-27, und 5, 26-33.
- [2] Ejet in J. L. Woodward: Dispersion modelling of an elevated high momentum release forming aerosol. J. Loss Prev. Process Ind. 2 (1989), 22-32.
- [3] V. Ianello et al: Improved source definition for modelling the ambient impact of accidental release of hazardous liquids. Proc. Loss Prevention Symposium, Oslo, 1989, 58,1.
- [4] R. Surma: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Ausbreitung von isothermen Freistrahlen aus Luft und Wasser in ruhender Luft. Diss. Techn. Univ. Hamburg-Harburg, 2005.
- [5] S. Al Rabadi, L. Friedel, A. Al Salaymeh: Mean droplet size and local velocity in horizontal isothermal free jets of air and water, respectively, viscous liquid in quiescent ambient air. Chem. Eng. Technol. 30 (2007) 1, 71-83.
- [6] Al Rabadi: Effect of fluid properties and flow conditions on the dispersion of horizontal isothermal two-phase air/liquid jet flow. Diss. Techn. Univ. Hamburg-Harburg, 2007. (in Vorbereitung)

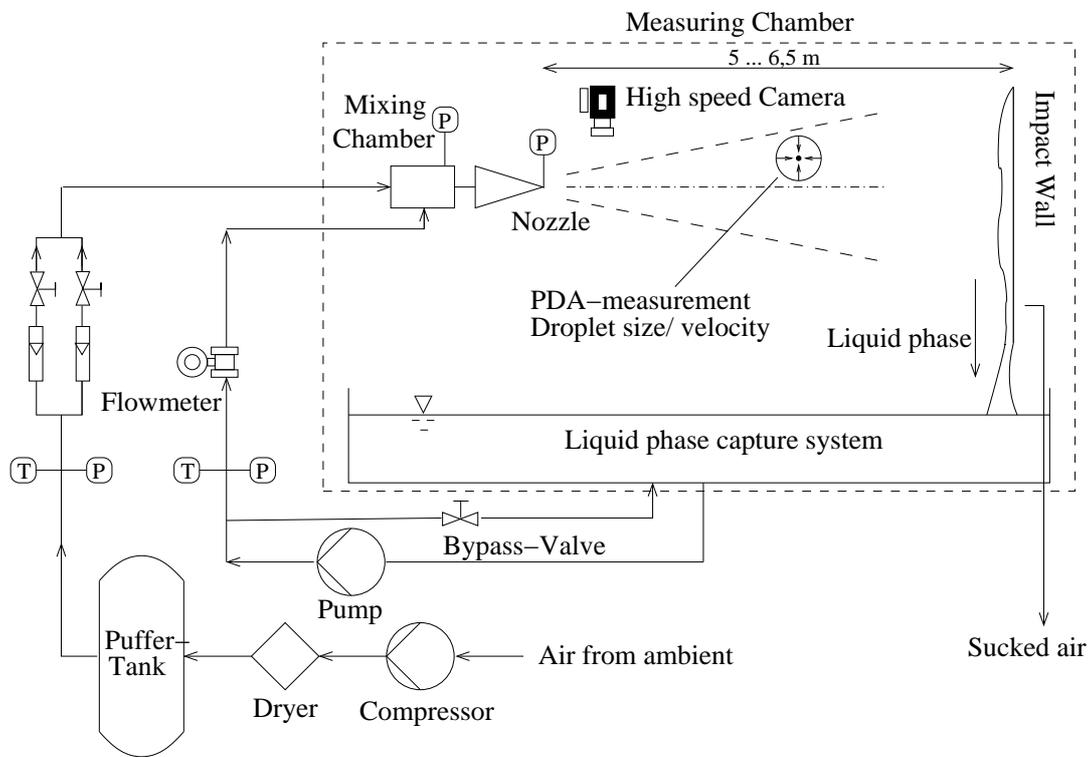


Abb. 1: Versuchsstand für Freistrahlundersuchungen mit Zweiphasengemischen aus Luft und Wasser bzw. Glukosesirup

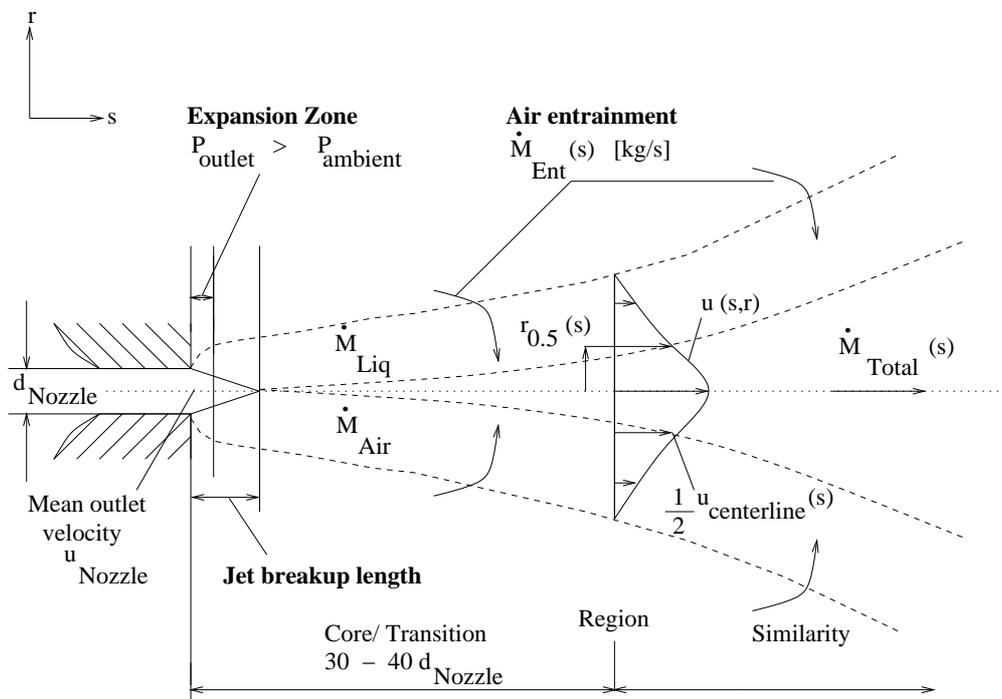


Abb. 2: Merkmale des Zweiphasenfreistrahles in ruhender Luft bei niedrigerem Umgebungsdruck

	Air/ Liquid phase free jet	
	Nozzle outlet diameter	: 3 mm
	Stagnation pressure	: 5 bar
	Air/ water	Air/ glucose syrup ( 70 mPa s )
Mass flow rate	: 7039 kg/m <sup>2</sup> s	: 6640 kg/m <sup>2</sup> s
Mass flow air quality	: 5.4 %	: 5.6 %
Homogeneous outlet velocity	: 86.9 m/s	: 80 m/s

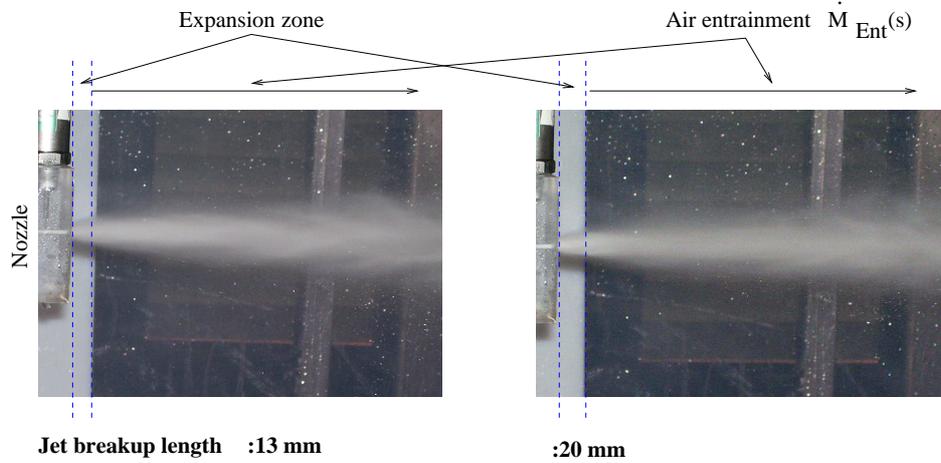


Abb. 3: Luft/Wasser bzw. Glukosesirup Freistrah mit längerer Wurfweite bei höherer Viskosität

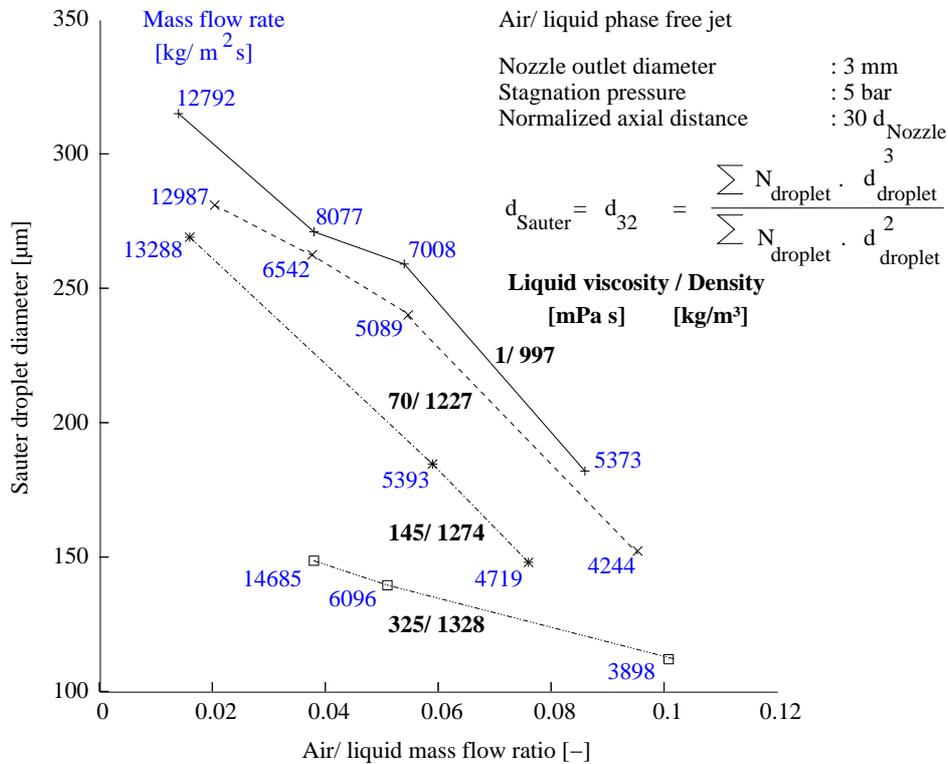


Abb. 4: Aus Messungen abgeleiteter Sauterdurchmesser in Abhängigkeit von dem Gemischmassenstromquotienten und der Flüssigphasenviskosität

Fluid 20° C, 1 bar	Viscosity [mPa s]	Density [kg/m <sup>3</sup> ]	Surface tension against air [mN/m]
Air	<b>0.018</b>	1.21	–
Water	<b>1</b>	997	72.6
Glucose Syrup	<b>8</b>	1134	69.5
	<b>70</b>	1227	72.8
	<b>100</b>	1258	71.5
	<b>200</b>	1274	75.9
	<b>325</b>	1328	79.1
	<b>760</b>	1342	79.5

Tab. 1: Stoffwerte der Fluide bzw. der Gemische bei Normbedingungen

Standard deviation	Centerline droplet model			
	Ejet	Iannello	Surma	Proposal
$\pm S_{abs} [m/s]$	52.8	45.3	34.5	25.3
$S_{ln} [\%]$	104.4	72.8	51.1	29.2

Absolute deviation

$$s_{abs} = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^n \ln^2(Y_{iexp}/Y_{ipred}) / (n - f - 1)}$$

Logarithmic deviation

$$s_{ln} = \exp \left( \sqrt{\sum_{i=1}^n \ln^2(Y_{iexp}/Y_{ipred}) / (n - f - 1)} \right) - 1$$

$n$  = number of data       $f$  = degree of freedom, number of model variables

**Tab. 2: Statistische Zahlen bzw. Wiedergabegenauigkeit der Modelle gemäß Ejet-programm, V. Iannello et al. und R. Surma sowie des Vorschlages**