

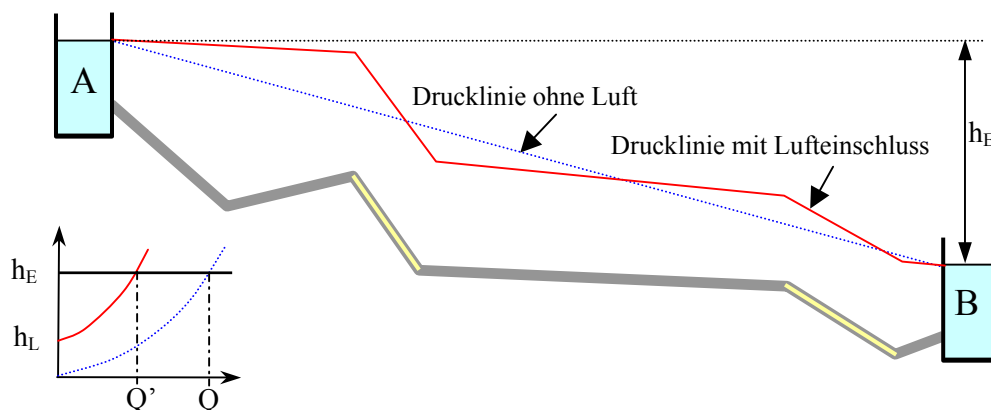
# Lufttransport in (wasserführenden) Rohrleitungen

Detlef Aigner

Das im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie am Institut für Wasserbau und Technische Hydromechanik der Technischen Universität Dresden von 2000 bis 2002 durchgeführte Forschungsprojekt zum Einsatz von Freigefälledruckleitungen für den Abwassertransport beschäftigte sich einerseits mit Untersuchungen des Lufttransportes an einer Modelleitung und andererseits mit der wissenschaftlichen Begleitung einer realisierten Freigefälledruckleitung. Schwerpunkt der Modellversuche war die Analyse von Möglichkeiten und Grenzen des Lufttransportes in Abhängigkeit von Gefälle und Strömungsgeschwindigkeit. Untersucht wurden die Transportmechanismen für Luftblasen beim Druckabfluss, der zeitabhängige Luftaustrag und der strömungsinduzierte Lufttransport im Teilfüllungsbereich einer Rohrleitung im Freispiegelabfluss. Im Ergebnis der Untersuchungen wurde ein Merkblatt und ein Programm zur Berechnung von Freigefälledruckleitungen erarbeitet. Für die Förderung und Unterstützung dieser Forschung möchte ich mich beim Sächsischen Landesamt für Umwelt und Geologie, insbesondere bei Dr. Uwe Engelmann, bedanken.

## Einleitung

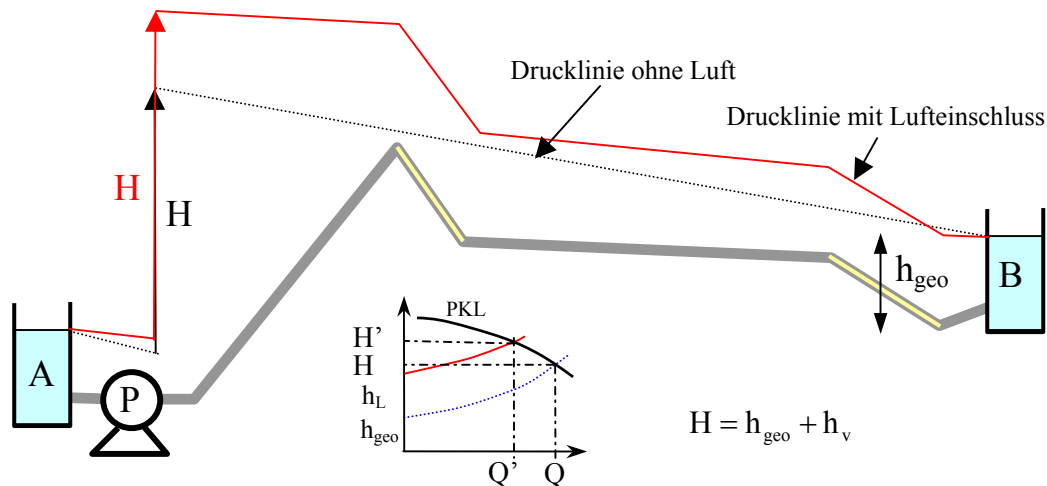
In Druckrohrleitungen kann es zur Ansammlung von Luft kommen, die den Abflussprozess behindert oder ganz verhindert (Abb.1).



**Abbildung 1:** Freigefälledruckleitung mit Luftabschluss ( $DL=EL$ )

Das gilt sowohl für Freigefälledruckleitungen als auch für Pumpenüberleitungen. Bei Druckluftspülungen, als bewährte Methode zur Verringerung von Aufenthaltszeiten bzw. zum Entfernen schädlicher Inhaltsstoffe, sowie bei der diskontinuierlichen Druckluftzugabe zur Erhöhung

der Fließgeschwindigkeiten werden gewollt Lufteinschlüsse erzeugt, die bei der Bemessung berücksichtigt werden müssen.



**Abbildung 2:** Pumpenüberleitung mit Lufteinschluss ( $DL=EL$ )

### Selbstentlüftung

Sowohl für Freigefälledruckleitungen als auch für Pumpenüberleitungen muss die Frage beantwortet werden, welche Mindestfließgeschwindigkeiten sind erforderlich, um Luftansammlungen selbstständig auszutragen (Selbstentlüftung). Der Einbau von Be- und Entlüftungsventilen wäre eine Alternative.

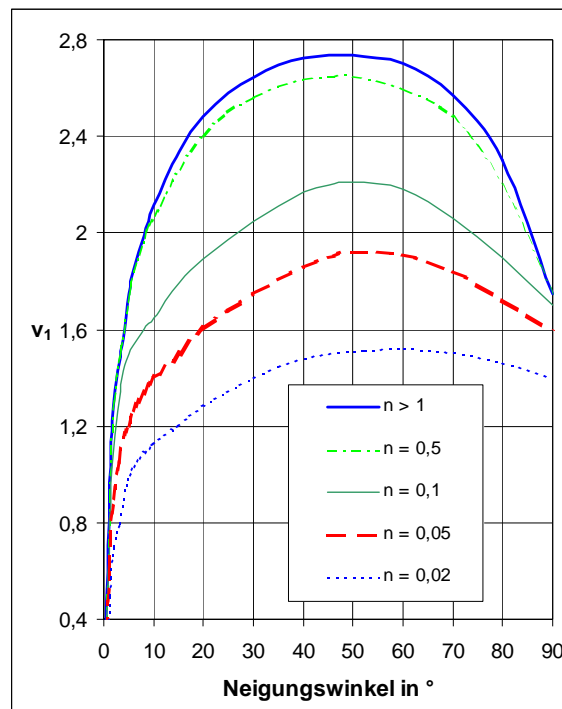
Bereits *Gandenberger* (1957) stellte in seinen Untersuchungen fest, dass die Bewegung von Luftblasen in der Rohrleitung von der Blasengröße, der Blasenform und dem Rohrquerschnitt abhängig ist, wobei er feststellte, dass die Blasenform hauptsächlich vom Neigungswinkel der Rohrleitung bestimmt wird. Und er stellte fest, dass den relativ größten Widerstand in der Strömung eine Blase mittlerer Größe verursacht.

Er definierte die dimensionslose Blasengröße  $n$  aus dem Verhältnis des Blasenvolumens  $V_B$  zum Volumen eines Rohrstückes mit der Länge des Durchmessers  $d$  der Rohrleitung.

$$n = \frac{V_B}{\frac{\pi}{4} \cdot d^3} \quad (1)$$

Seine theoretischen Überlegungen zur Blasenbewegung beruhten auf dem Kräftegleichgewicht zwischen Blasenaufltrieb und Strömungswiderstand einer Blase und führten zusammen mit umfangreichen Messungen und Literaturstudien zu den bisher meist verwendeten Angaben zum Luftaustag aus Rohrleitungen (DVGW-Merkblatt W 403, 1988). Für seine Versuche verwendete *Gandenberger* Glasrohre bis 100 mm Durchmesser die er bis  $90^\circ$  neigte. Er stellte fest, dass für dimensionslose Blasengrößen ab etwa  $n = 0,5$  sich keine Steigerung der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit mehr einstellte und legte als Grenzwert  $n = 1$  fest. Die

Maximalwerte der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit ermittelt er bei etwa 40° bis 50° Rohrneigung (Abb. 3).



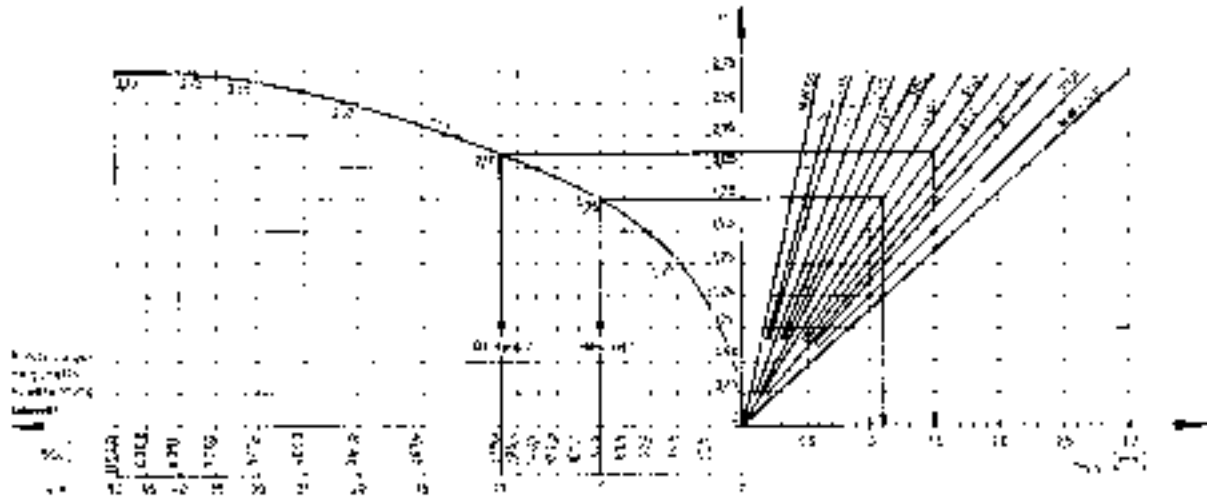
**Abbildung 3:** *Extrapolierte Selbstentlüftungsgeschwindigkeit für  $d_1 = 1\text{ m}$  in Abhängigkeit vom Neigungswinkel der Rohrleitung und der dimensionslosen Blasengröße  $n$  nach Gandenberger (1957)*

Ähnliche Ergebnisse zur Abhängigkeit der Blasenauftiegs­geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Neigung der Rohrleitung erzielte *Zukoski* (1966) bei seinen Untersuchungen in nicht durchflossenen Rohren mit unterschiedlichen Fluiden. Er ermittelte eine maximale Blasenauftiegs­geschwindigkeit bei etwa 30° bis 40° Rohr­neigung. Für die Blasen­größe gibt er einen Grenzwert von  $n = 1,5$  an. Auch *Kalisnski* (1943), *Kent* (1952), *Krug* (1988), *Wisner* u.a.(1975) und neuere Untersuchungen von *Walther* und *Günthert* (1998) beschäftigten sich mit diesen Problemen und führten zu empirischen Gleichungen für eine Mindest­fließ­geschwindigkeit zur Selbstentlüftung.

Die Erkenntnisse von *Gandenberger* wurde in einem DDR-Werkstandard (WAPRO 1.13., 1971) zu einem Diagramm (Abbildung 4) verarbeitet, bei dem seine Ergebnisse für die Anwendung auf Rohrdurchmesser größer 100 mm durch folgende Gleichung (2) extrapoliert wurden.

$$v_s = v_1 \cdot \sqrt{\frac{d}{d_1}} \quad (2)$$

Die Geschwindigkeit  $v_1$  bezieht sich dabei auf die nach *Gandenberger* maximal erforderliche Selbstentlüftungsgeschwindigkeit bei  $n = 1$  für einen Durchmesser von  $d_1 = 1\text{ m}$ .



**Abbildung 4:** Ermittlung der Mindestfließgeschwindigkeit  $v$  zur Gewährleistung der Gasblasenabführung ( $n \geq 1$ ) aus WAPRO 1.13. (1971)

Die von *Wiesner* u.a. (1975) aus Messungen an einer  $18,5^\circ$  geneigten 250 mm Rohrleitung im Vergleich mit anderen Messergebnissen ermittelte empirische Gleichung für eine Mindestfließgeschwindigkeit zur Selbstentlüftung in Rohrscheiteln lautet:

$$v_s = \left(0,825 + 0,25 \cdot \sqrt{I_{\text{Rohr}}}\right) \cdot \sqrt{g \cdot d} \quad (3)$$

*Walther* und *Günthert* (1998) untersuchten ein PE-HD-Rohr mit einem Innendurchmesser von 63 mm bei insgesamt 8 unterschiedlichen Neigungen von  $0^\circ$  bis  $34^\circ$ . Die gefundene Regressionsgerade weicht im Anstieg nur wenig von der nach *Wisner* ab.

$$v_s = \sqrt{gd} \cdot (0,28\sqrt{\sin \alpha} + 0,68) \quad (4)$$

*Walther* und *Günthert* fügten hinzu, dass die Formel nur für den Bereich bis ungefähr  $45^\circ$  gilt, weil die Selbstentlüftungsgeschwindigkeit bei stärkeren Neigungen wieder sinkt.

Im Hubert-Engels-Labor der Technischen Universität Dresden wurden von 2000 und 2002 Untersuchungen zur Blasenbewegung in einer bis zu 15% neigbaren Rohrleitung mit einem Innendurchmesser  $d = 190$  mm bei einer Länge von  $L = 22$  m durchgeführt. Schwerpunkt der Untersuchungen war die Analyse der Einzelblasen unterschiedlicher Größe. Neben der Form und der Größe der Blasen wurde deren Stillstandsgeschwindigkeit in der Strömung der geneigten Rohrleitung ermittelt. Die umfangreichen Messungen lieferten wichtige Erkenntnisse für die theoretische Bestimmung der Selbstentlüftungsgeschwindigkeit. Aus Beobachtungen wurde festgestellt, dass am Ende einer größeren Lufttasche in einer mehr oder weniger turbulenten Zone, ähnlich der eines Wechselsprunges (siehe Abb.5), kleine Luftblasen mit der Strömung mitgerissen werden die sich zu größeren Blasen vereinigen. Die so entstandenen größeren Blasen lassen sich deutlich schwieriger

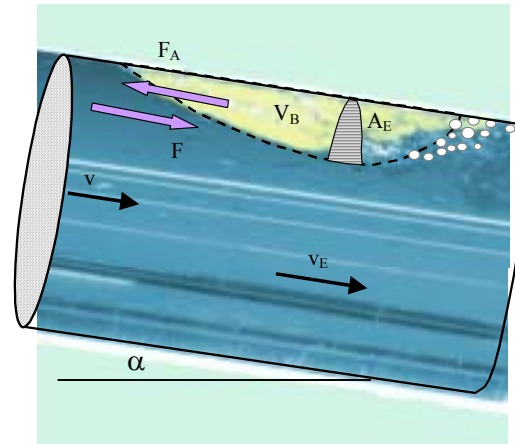
bewegen bzw. verharren, bleiben an Übergängen (Flanschen) hängen oder wandern sogar entgegen der Strömung.

Um aus dem Gleichgewicht (Gleichung 5) für den Stillstand einer Blase eine für die Selbstentlüftung erforderliche Geschwindigkeit ableiten zu können, waren Untersuchungen zur Verformung der Blase in Abhängigkeit von der Neigung, zum Strömungswiderstand ( $c_w$ ) der Blase u. a. erforderlich.

$$F = c_w \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A_E \cdot v_E^2 = F_A = \rho \cdot g \cdot V_B \cdot \sin \alpha$$

(5)

Strömungskraft und Auftriebskraft  
im Gleichgewicht.



**Abbildung 5:** Bewegungsgleichgewicht einer Luftblase

Die Formänderung  $\kappa$  der Blase war vor allem von der Blasengröße abhängig und konnte näherungsweise mit Gleichung (6) ermittelt werden.

$$\kappa = A_E/A = 0,465 \cdot n^{0,56} \quad (6)$$

Der Widerstandsbeiwert  $c_w$  der Blase änderte sich signifikant in Abhängigkeit von der Rohrneigung und wurde mit Gleichung (7) angenähert.

$$c_w = 1,64 \cdot \sin \alpha + 0,06 \quad (7)$$

Durch Einsetzen der Gleichungen (6) und (7) sowie der Kontinuitätsbedingung  $v_E \cdot (A - A_E) = v \cdot A$  in Gleichung (5) ergibt sich eine Gleichung für die Stillstandsgeschwindigkeit einer Blase der dimensionslosen Größe  $n$  zu:

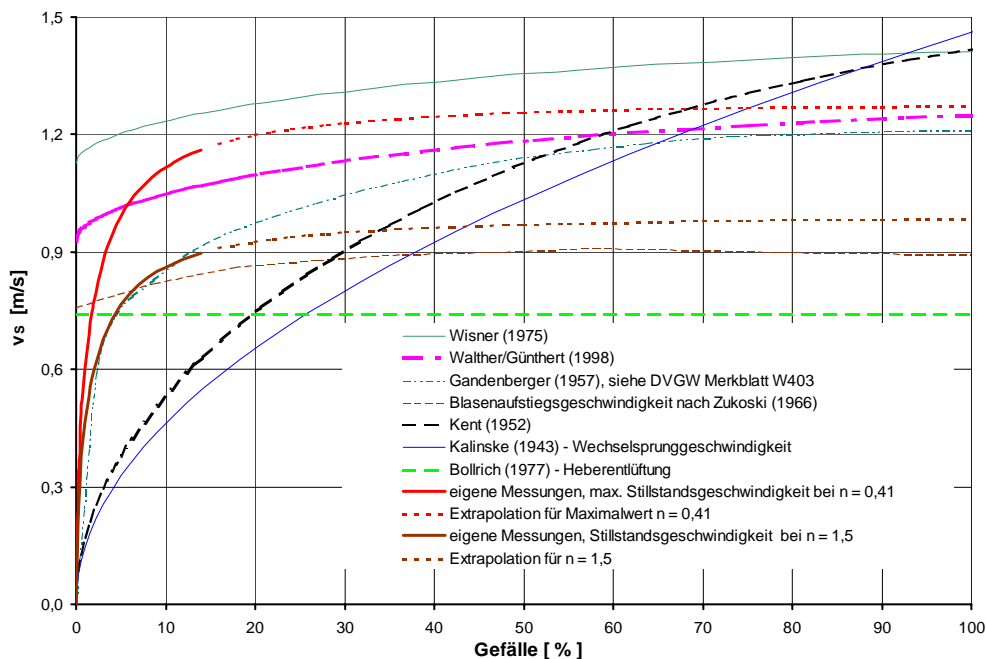
$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot \frac{n \cdot d \cdot \sin \alpha}{\kappa \cdot c_w}} \cdot (1 - \kappa) = \sqrt{4,3 \cdot g \cdot \frac{d \cdot \sin \alpha}{(1,64 \cdot \sin \alpha + 0,06)}} \cdot (n^{0,22} - 0,465 \cdot n^{0,78}) \quad (8)$$

Die Untersuchungen zeigten ähnlich wie bei *Gandenberger* und *Zukoski*, dass eine Blase mittlerer Größe die größte Geschwindigkeit für seinen Transport mit der Strömung benötigt, also muss Gleichung (8) ein Maximum für  $v$  in Abhängigkeit von  $n$  besitzen. Durch eine Extremwertberechnung mit  $dv/dn=0$  ergibt sich eine maximale Stillstandsgeschwindigkeit für eine Einzelblase bei einem relativen Blasenvolumen von  $n=0,41$ . Mit diesem Wert vereinfacht sich Gleichung (8) zur Gleichung (9).

Setzt man die maximale Stillstandsgeschwindigkeit einer Luftblase als zu überbrückende Größe für die Entlüftung einer Rohrleitung voraus, dann kann unter der Voraussetzung o.g. Randbedingungen der Modellversuche die notwendige Selbstentlüftungsgeschwindigkeit  $v_s$  in Freigefälledruckleitungen mit Gleichung (9) ermittelt werden.

$$v_s = \sqrt{1,5 \cdot g \cdot \frac{d \cdot \sin \alpha}{(1,64 \cdot \sin \alpha + 0,06)}} \quad (9)$$

Ein Vergleich mit Gleichungen der oben genannten Autoren zur Selbstentlüftung bzw. zum Blasenanstieg zeigt die folgende Abbildung.



**Abbildung 6:** *Selbstentlüftungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Rohrgefälle*

### Luftaustrag in Abhängigkeit von der Zeit

Neben den Untersuchungen zur Blasenbewegung wurde in den Modellversuchen an der TU Dresden der Austrag der Luft in Abhängigkeit von der Zeit untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass der Luftaustrag nicht nur von der Strömungsgeschwindigkeit selbst sondern auch von der Rohrneigung und der Lufttaschengröße zu Beginn des Luftaustrages abhängt. Die Modellversuche wurden bei einer bestimmten Rohrneigung und konstanter Fließgeschwindigkeit so durchgeführt, dass das eingeschlossene Luftvolumen zu Beginn und zum Ende der Versuche ermittelt wurde. Die Ergebnisse sind in folgender Abbildung zusammengefasst.

Diese Untersuchungsergebnisse wurden in zwei Gleichungen für den relativen Luftaustrag  $\beta$  zusammengefasst.

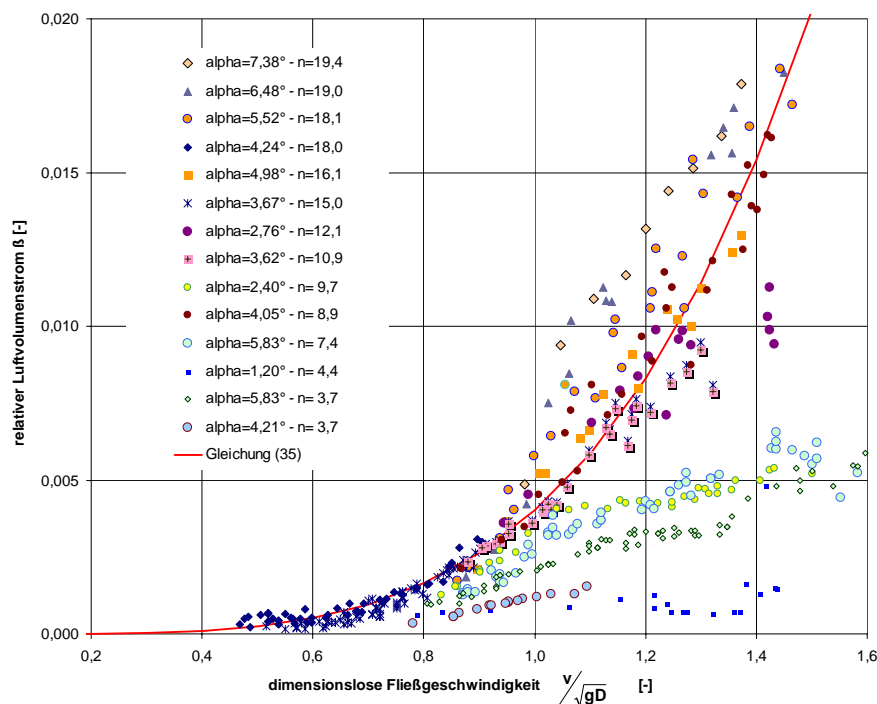
$$\beta = \frac{Q_L}{Q_W} = 0,004 \cdot \left( \frac{v}{\sqrt{g \cdot d}} \right)^4 \quad (10)$$

mit  $Q_L$ -Luftvolumenstrom,  $Q_W$ -Wasservolumenstrom

Gleichung (10) gilt für die dimensionslose Geschwindigkeit  $v/\sqrt{g \cdot d} < 0,75$  für kleinere und größere Lufteinschlüsse und alle Neigungen,

Gleichung (10) gilt ab  $v/\sqrt{g \cdot d} \geq 0,75$  nur für größere Lufttaschen mit einem dimensionslosen

Volumen  $n = \frac{4 \cdot V_{\text{Blase}}}{\pi d^3} \geq 10$  und bei einer größeren Rohrneigung  $\alpha > 3^\circ$ .



**Abbildung 7:** *relativer Luftvolumenstrom als Funktion der dimensionslosen Fließgeschwindigkeit für unterschiedliche Neigungen und eingeschlossene Luftvolumina zu Beginn der Messung*

Bei flacheren Rohrneigungen und kleineren Luftvolumina fehlt der turbulente Bereich am Ende der Blase zum Einschlagen von Luftblasen wodurch sich der Lufttransport deutlich verringert. Hier kann der deutlich geringere Luftaustrag nach Gleichung (11) abgeschätzt werden. Diese Gleichung gilt nur für größere Fließgeschwindigkeiten ab  $v \geq v_s$ . Die Gleichungen (10) und (11) beschränken sich auf die Randbedingungen der Untersuchungen, da keine Vergleichswerte bekannt sind. Sie sollten nur zur Zeitschätzung angewendet werden.

$$\beta = \frac{Q_L}{Q_W} = 0,3 \cdot \sin \alpha \cdot \left( \frac{v - v_s}{\sqrt{g \cdot d}} \right) \quad (11)$$

## Luftströmung im Teilfüllungsbereich

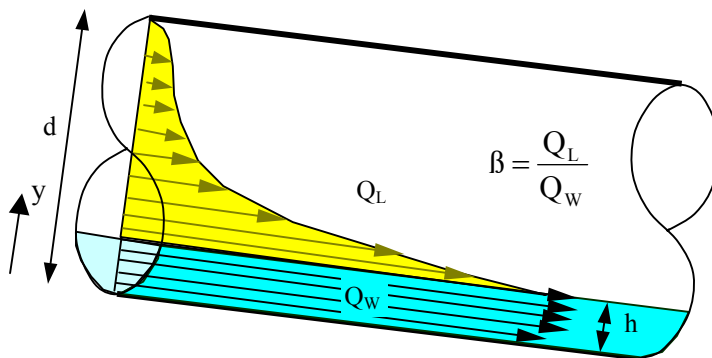
Im Teilfüllungsbereich wird durch die Wasserströmung eine Luftströmung induziert (Abb. 8). Diese Luftströmung kann sich nur frei ausbilden, wenn ihre Zu- und Abströmung garantiert ist. Es bildet sich ein Gleichgewicht zwischen einem durch die Wasserströmung induzierten möglichen Lufttransport (Luftbedarf) und einem durch die Strömungswiderstände bzw. durch Be- und Entlüftungen ermöglichten Lufttransport (Luftangebot) aus. Dieses Gleichgewicht bestimmt den transportierten Luftvolumenstrom.

$$\text{Luftangebot: } Q_L = \sqrt{\frac{\sum \Delta p}{\sum \chi}} \quad (12)$$

mit  $\sum \Delta p$  – Summe der Druckdifferenzen z.B. zwischen Außen und Innen am Lufteintritt, zwischen Innen und Außen am Luftaustritt und Druckverlust infolge Luftströmung in der Rohrleitung.

$$\text{mit } \sum \chi = \chi_E + \chi_R + \chi_A = \frac{\rho_L}{\mu_E^2 \cdot a_E^2 \cdot 2} + \lambda \cdot \frac{L}{d_{hy}} \cdot \frac{\rho_L}{A_L^2 \cdot 2} + \frac{\rho_L}{\mu_A^2 \cdot a_A^2 \cdot 2} \quad (13)$$

$$\text{Luftbedarf: } Q_L = f(v_w, \frac{h}{d}) \quad (14)$$



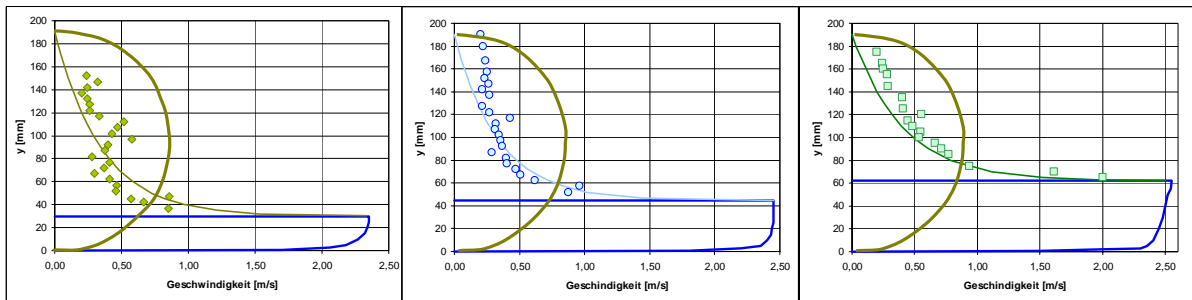
**Abbildung 8:** Luftbewegung beim Teilfüllungsabfluss

Die Wasserströmung in einer teilgefüllten Rohrleitung regt an der Scherfläche zwischen Wasser und Luft eine Bewegung der Luft an. Diese Bewegung ist abhängig von der Geschwindigkeit  $v_w$  des Wassers an der Wasseroberfläche, dem Füllungsgrad  $h/d$  und damit der Kontaktfläche  $b_w L$  und der Rauigkeit an der Wasseroberfläche  $k_w$ . Fließen beide Medien getrennt ab, denn stellt sich eine logarithmische Verteilung der Luftgeschwindigkeit ein. Campbell und Guyton (1953) untersuchten diese Luftströmung als ebenen Fall und ermittelten unter der Annahme, dass die Luftströmung an der Wand Null und an der Wasseroberfläche  $v_w$  ist, folgende Gleichung:



$$\frac{v_L}{v_W} = 1 - \frac{0,294 \cdot \ln \frac{y-h}{k_W} + 1}{0,294 \cdot \ln \frac{d-h}{k_W} + 1} \quad (15)$$

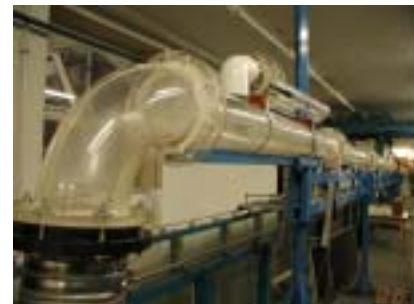
Diese Gleichung stimmt auch gut mit eigenen LDA-Messungen entlang der vertikalen Achse einer 190 mm Plexiglasleitung überein, allerdings wurde die Luftgeschwindigkeit nahe der Wand bei den eigenen Messungen nie Null. In den folgenden Abbildungen sind die drei Messergebnisse an einer etwa 12% geneigten und 12,62 m langen Leitung dargestellt.



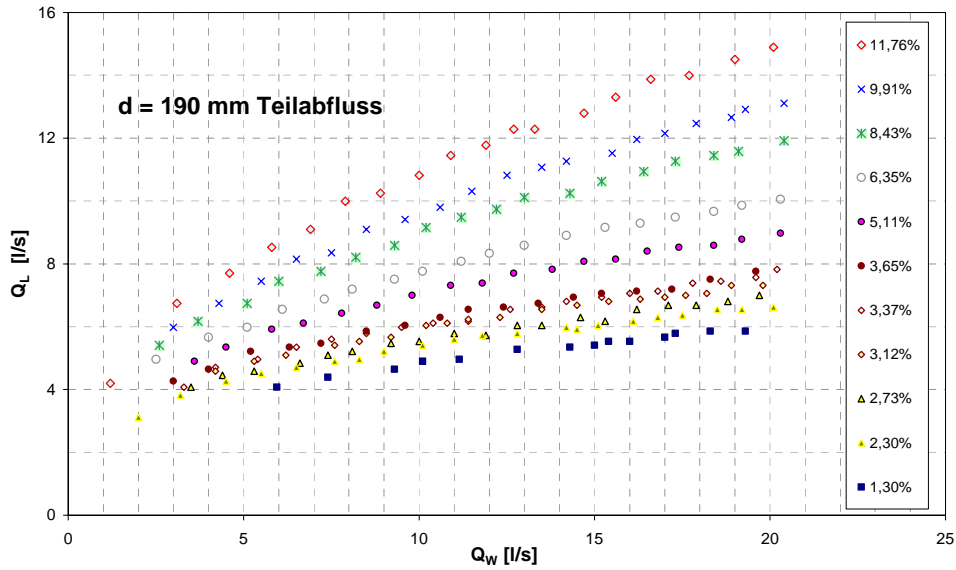
**Abbildung 9:** Luftmessung an einer teilgefüllten Rohrleitung, die durchgezogene Linie wurde aus Gleichung (15) mit  $k_W=5\text{mm}$  ermittelt  
 (links:  $Q_W=6,7\text{l/s}$ ;  $Q_L=7,76\text{l/s}$ ;  $v_W=2,35\text{m/s}$ ;  $h=30\text{mm}$   
 mitte:  $Q_W=13,7\text{l/s}$ ;  $Q_L=10,37\text{l/s}$ ;  $v_W=2,45\text{m/s}$ ;  $h=45\text{mm}$   
 rechts:  $Q_W=26\text{l/s}$ ;  $Q_L=12,85\text{l/s}$ ;  $v_W=2,55\text{m/s}$ ;  $h=62\text{mm}$ )

An der Versuchsleitung  $d=190\text{mm}$  wurden mit Hilfe eines 100 mm Flügels der am Hochpunkt eintretende Luftvolumenstrom gemessen. Die Belüftung am Scheitel der Rohrleitung bestand aus einem Krümmer und der etwa 1 m langen 90 mm Plexiglasleitung (Abbildung 10). Zwischen beiden wurde der Flügel geklemmt. Am Ende der Versuchsleitung konnten Wasser und Luft frei ausmünden.

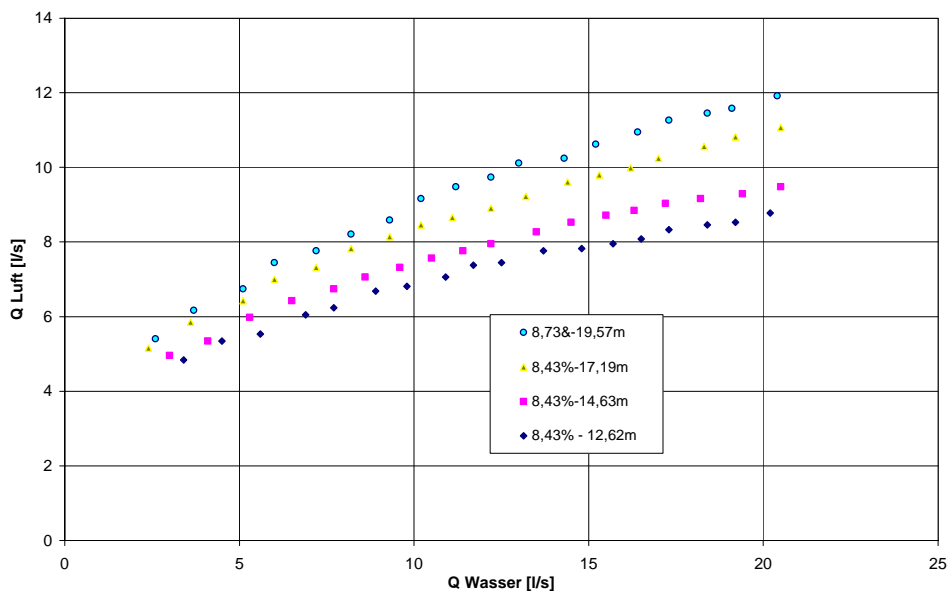
**Abbildung 10:** Luftmessung am Rohrscheitel mit einem Flügel



Die Versuchsergebnisse sind in folgenden Abbildungen dargestellt. Abbildung 11 zeigt den gemessenen Luftvolumenstrom in Abhängigkeit vom Wasservolumenstrom und den eingestellten Neigungen der Versuchsleitung. Die Ergebnisse in Abbildung 12 verdeutlichen den Einfluss der Rohrleitungslänge auf den Luftvolumenstrom. Wegen des dominanten Widerstandes beim Zuströmen der Luft am Belüftungsrohr, erhöht sich der Luftvolumenstrom, wenn die Reibungsfläche zwischen Wasser und Luft durch eine größere Rohrlänge erhöht wird.



**Abbildung 11:** Luftmessung an einer  $L = 20\text{ m}$  langen Rohrleitung bei unterschiedlichen Neigungen



**Abbildung 12:** Längeneinfluss auf die Luftströmung bei konstanter Neigung

### **Lufteinmischung an Steilstrecken**

In steilen Rohrabschnitten kommt es durch die schnelle Wasserströmung zum Mitreißen der Luft. Die Scherwirkung zwischen Wasseroberfläche und Luft induziert nicht nur eine Luftbewegung in Strömungsrichtung sondern bei größeren Geschwindigkeiten auch eine Vermischung mit der Luft. Erreicht die turbulente Grenzschicht die Wasserspiegeloberfläche, dann kommt es laut Volkart (1978) zur Einmischung von Luft in das Wasser, was zu einem Anstieg des Abflussfläche führt, es entsteht eine Wasser-Luft-Gemischströmung. Dieser Prozess beginnt ab einer Boussinesq-Zahl  $Bou=6$ . Die Luftkonzentration wird nach Volkart mit Gleichung (16) folgendermaßen berechnet:

$$c = 1 - \frac{1}{0,02 \cdot (\text{Bou} - 6)^{1,5} + 1} \quad (16)$$

$$\text{Bou} = \frac{v}{\sqrt{g \cdot r_{hy}}} \quad (17)$$

Die Geschwindigkeit der Wasser-Luft-Gemischströmung  $v_G$  errechnet sich in Abhängigkeit von der Luftkonzentration  $c$  und der Wassergeschwindigkeit  $v_W$  der Teilfüllung zu:

$$v_G = v_W \cdot (1 - c^2) \quad (18)$$

Die mittlere Gemischabflussfläche  $A_{G\text{mittel}}$  bzw. die maximale Gemischabflussfläche  $A_{G\text{max}}$  werden in Abhängigkeit vom Luftanteil und der Abflussfläche  $A_W$  bei reiner Wasserströmung bei Teilfüllung mit Gleichung (19) und (20) berechnet.

$$A_{G\text{mittel}} = A_W \cdot \frac{1}{(1 - c^2) \cdot (1 - c)} \quad (19)$$

$$A_{G\text{max}} = A_W \cdot \left( 2 \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - c}\right) + 1 \right) \quad (20)$$

Abgeschätzt werden kann das Verhältnis der Wassertiefen aus Gemischabfluss  $h_G$  für den mittleren oder den maximalen Wert und aus reinem Wasserabfluss  $h_W$  zu:

$$\frac{h_G}{h_W} = \left( \frac{A_G}{A_W} \right)^{\frac{3}{4}} \quad (21)$$

Der Volumenstrom der in das Wasser eingetragenen Luft ermittelt sich zu:

$$Q_L = Q_W \cdot \frac{c}{1 - c} \quad (22)$$

Verringert sich am Ende einer Steilstrecke das Rohrgefälle, dann kann es zum Fließwechsel und zum Zuschlagen der Leitung kommen. Die dabei im Wasser-Luft-Gemisch vorhandene Luft wird dann vollständig oder teilweise weitertransportiert. Durch Luftkompression kann es zu stoßartigen Luftbewegungen oder Luftaustritten auch entgegen der Fließrichtung kommen. Es ist für eine ausreichende Entlüftung an solchen Punkten zu sorgen.

### **Zusammenfassung**

Luft in Rohrleitungen ist dann beherrschbar, wenn man ihre Wirkung auf die Strömung in der Leitung kennt und ihren Einfluss bei den hydraulischen Nachweisen berücksichtigt. Der sicherste Umgang mit Lufteinschlüssen ist für eine ausreichende Be- und Entlüftung zu sorgen. Das ist nicht immer möglich und auch nicht immer erforderlich. Dann allerdings ist ihr Einfluss auf den Strömungsprozess nachzuweisen. Dieser Artikel liefert einen Beitrag dazu.

Quellen:

- Aigner, D.:** Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung, KA Korrespondenz Abwasser 47 (2000) Nr. 6, S. 876-881, Info siehe: [www.d-aigner.de](http://www.d-aigner.de)
- Aigner, D.; Thumernicht, S.:** Untersuchung von Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung. Forschungsbericht im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt und Geologie, Dresden 2002
- Aigner, D.; Thumernicht, S.:** Geregelt Freigefälledruckleitungen zur Abwasserüberleitung. Wasserbauliche Mitteilungen Heft 21, TU Dresden, 2002
- Campbell, F.B.; Cuyton, B.:** Air demand in gated outlet works. Proc. IAHR 1953, S. 529-533
- DVWG-Merkblatt W 403:** Planungsregeln für Wasserleitungen und Wasserrohrnetze. Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. Eschborn Jan. 1988
- Gandenberger, W.:** Über die wirtschaftliche und betriebssichere Gestaltung von Fernwasserleitungen, GWF Wasser, Abwasser 1957 Nr. 4, S. 206
- Kalinske, A.A. et al. :** Removal of air from pipelines by flowing water, Civil Engineering ASCE 13, pp. 781, 1943
- Kent, J.C. :** The entrainment of air by water flowing through circular conduits with downgrade slope, University of California, Berkeley, 1952
- Krug, Roland (1988):** Berechnung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit langer Luftblasen und der Schwallströmung in horizontalen und mäßig geneigten Rohrleitungen, Hydraulik und Gewässerkunde– Mitteilungen der TU München Nr.49, 1988
- LfUG-Merkblatt:** Hydraulische Bemessung von Freigefälledruckleitungen zum Abwassertransport. Freistaat Sachsen, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie. Mai 2003
- Schmalzl, Klaus:** Berechnung der Rohrkenlinie für Abwasserdruckleitungen unter Berücksichtigung von Lufteinschlüssen mit dem Tabellenkalkulationsprogramm ©Excel 97, Wasserwirtschaftsamt Rosenheim, 1999
- Volkart, Peter:** Hydraulische Bemessung steiler Kanalisationsleitungen unter Berücksichtigung der Luftaufnahme. Mitt. Nr. 30 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich, 1978
- Wackernagel, G.; Schmidt, H.; Aigner, D.; Thumernicht, S.:** Geregelt Freigefälledruckleitung zur Abwasserüberleitung. KA - Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 48 (2001) Nr.6, S. 844-847, Info siehe: [www.d-aigner.de](http://www.d-aigner.de)
- Walther, G. ; Günthert, F. W. :** Neue Untersuchungen zur Selbstentlüftungsgeschwindigkeit in Trinkwasserleitungen. gwf Wasser-Abwasser, 139 (1998) Nr. 8, S. 475-481. [www.bauv.unibw-muenchen.de](http://www.bauv.unibw-muenchen.de)
- WAPRO 1.13. :** Druckrohrleitungen der Wasserwirtschaft. Be- und Entlüftungsventile – Bemessung und Anordnung. Werkstandard des VEB Projektierung Wasserwirtschaft Halle, 1971
- Wisner, P.E. et al.:** Removal of air from water lines by hydraulic means, Journ. of the hydraulic division, Proc. ASCE 101 HY2, 1975, S. 243-257
- Zukoski, E.E.:** Influence of viscosity, surface tension and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. J. Fluid Mech. 25, pp. 821, 1966