

Zur Frage der Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen

Jens Mischner

Erdgas, Methan, Wasserstoff, Gemische, Zusatzgas, Austauschgas, Druckverlustberechnung, Strömungsgeschwindigkeit, Grenzgeschwindigkeit, Wandschubspannung

Im vorliegenden Beitrag werden Fragen der analytischen Berechnung von zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen erörtert. Hintergrund der Fragestellung ist die anstehende Umstellung von Gasversorgungssystemen von Erdgas auf Wasserstoff. Es wird gezeigt, dass beim Betrieb von Gasleitungen mit Wasserstoff deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten zulässig sind als beim Betrieb mit Erdgas. Als Kriterium wird eine maximal zulässige Wandschubspannung vorgeschlagen und quantitativ abgeschätzt. Vorschläge zur analytischen Berechnung der maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten werden unterbreitet. Diese berücksichtigen sowohl die Gasbeschaffenheit als auch spezifische Betriebsbedingungen der Rohrleitungen. Fragen des Mitreißens von Staubpartikeln und Flüssigkeitstropfen werden diskutiert.

On the flow velocities in gas pipelines

In this paper questions regarding the analytical calculation of permissible flow velocities in gas pipelines are discussed. The background for these posed questions is the upcoming conversion of gas supply systems from natural gas to hydrogen. It will be demonstrated, that significantly higher flow velocities are permissible for the operation of pipelines with hydrogen than for the operation with natural gas. As a criterion, a maximum permissible wall shear stress is proposed and quantitatively estimated. Proposals for the analytical calculation of the maximum permissible flow velocities are presented. These proposals consider both the gas characteristics as well as specific operating conditions of the pipelines. Issues of entrainment of dust particles and liquid droplets are discussed.

1. Einführung

Im Zusammenhang mit dem Problem der Netzberechnung und des (künftigen) Netzbetriebs von Gasleitungen, die anstelle von Erdgas mit Wasserstoff bzw. Erdgas-Wasserstoff-Gemischen beaufschlagt werden, stellt sich die Frage nach zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten neu.

Der Verfasser will zunächst versuchen, sich auf der Grundlage einer kurzen Literaturrecherche einen Überblick über gängige Richt- bzw. maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeiten in Gasrohrleitungssystemen zu verschaffen. Im Bereich des Erdgastransports- bzw. -verteilung finden sich entsprechende Angaben im „Cerbe“; dort ab der 3. Auflage, praktisch unverändert fortgeschrieben bis zur aktuellen Ausgabe des bewährten Lehrbuchs; siehe **Tabelle 1** gemäß [1-6], ebenso zitiert in [7; S. 619]. Es sei darauf verwiesen, dass in [6, S. 172f.] ausdrücklich angemerkt wird, dass es sich bei diesen Anga-

ben um erste Anhaltswerte für Strömungsgeschwindigkeiten handelt, also um Werte, an denen man sich üblicherweise bei der Netzdimensionierung orientieren kann, nicht jedoch um strenge Grenzgeschwindigkeiten, die es unter allen Umständen einzuhalten gilt. Außerdem wurde darauf hingewiesen, dass Staubpartikel schon ab Strömungsgeschwindigkeiten $w_G \geq 3$ m/s mitgerissen wer-

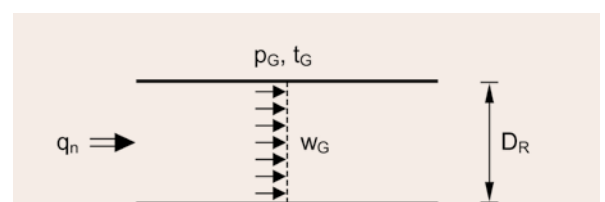


Bild 1: Situationskizze Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung

Tabelle 1: Anhaltswerte für hydraulische Kenngrößen und Strömungsgeschwindigkeiten in Gasrohrleitungen gemäß „Cerbe“ [1-6]

Erdgas			ND		MD	HD	
Druckbereich							
Überdruck	p_e	bar	≤ 0,03	> 0,03...0,1	> 0,1...1	> 1...16	40...70
Nennweiten	DN		50...600	50...600	100...400	300...600	400...900
Integrale Rauigkeit	k_i	mm	0,5...3,0	0,5...3,0	0,1...0,5	0,1...0,5	0,1
Verfügbares spezifisches Druckgefälle	$\frac{\Delta p}{L}$	$\frac{\text{mbar}}{\text{km}}$	0,5...1,5	1,0...1,5	–	–	–
	$\frac{p_1^2 - p_2^2}{L}$	$\frac{\text{bar}^2}{\text{km}}$	–	–	≤ 0,03	≤ 5	≤ 30
Rohrreibungszahl	λ		0,050 ... 0,020	0,040 ... 0,017	0,038 ... 0,016	0,021 ... 0,015	0,010 ... 0,008
Strömungsgeschwindigkeit	w_G		0,5 ... 3,5	1 ... 10	7 ... 18	≤ 20	≤ 20

den können. Die angegebenen Richtgeschwindigkeiten sind tendenziell deutlich höher. Die generelle Situation ist in **Bild 1** skizziert worden.

In [8, S. 131] werden für Fragen der Kapazitätsermittlung von Erdgasleitungen folgende Grenzgeschwindigkeiten angesetzt:

- 3 ... 6 m/s für Versorgungsleitungen
- 6 ... 10 m/s für Hauptleitungen

Angaben im Bereich 10 m/s werden von vielen Netzbetreibern als firmeninterne Richt- bzw. Grenzwerte für Erdgasleitungen bzw. -netze verwendet. Für den Bereich des überregionalen Gastransports sind jedoch auch in der Vergangenheit Rohrleitungen für Strömungsgeschwindigkeiten bis $w_G \leq 20$ m/s ausgelegt worden. Im Betrieb wurden in der Praxis des Netzbetriebs stets maßvolle Überschreitungen dieses Wertes akzeptiert (siehe *Fasold*

Tabelle 2: Strömungsgeschwindigkeiten in Gasanlagen²

DVGW-Regelwerk	Kontext, Durchflussgeschwindigkeit*)
DVGW-G 614-1 2014-10 (A)	6.4.2 Strömungsgeschwindigkeiten Die Strömungsgeschwindigkeit in der Rohrleitung soll 25 m/s nicht überschreiten. Bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten sind strömungsabhängige Pulsationsberechnungen durchzuführen sowie die Möglichkeit von Geräuschentwicklung und Erosion zu berücksichtigen. Außerdem ist die Arbeitsweise der vorgelagerten Gas-Druckregelgeräte zu berücksichtigen.
DVGW-G 494 2020-12 (M)	5.2 Strömungsgeräusche Die Strömungsgeräusche in einer Gas-Druckregelanlage sind normalerweise vernachlässigbar, wenn in den Anschlussrohrleitungen die für die Gasfortleitung empfohlene maximale Strömungsgeschwindigkeit von 20 m/s nicht überschritten wird. Liegen jedoch in der Anlage oder auch in partiellen Anlagenbereichen (z. B. in den Sicherheitsarmaturen) höhere Geschwindigkeiten vor, ist der Einfluss des Strömungsgeräusches auf das Gesamtgeräusch zu beachten.
DVGW-G 492 2004-01 (A)	6 Anforderungen an Messanlagen 6.1 Allgemeines ... Die lichte Weite von verbindenden Leitungen und Leitungsteilen – ausgenommen sind Messgeräte – ist unter Berücksichtigung des gesamten Druckverlustes zu bemessen. In diesen Leitungen sollte eine Strömungsgeschwindigkeit von etwa 20 m/s nicht überschritten werden.

*) Alle Hervorhebungen kursiv - der Verfasser

**) aktuell: DVGW-G 499 August 2015 (A)

¹ Der Verfasser dankt Herrn M.Eng. Björn Kraft (Erfurt) für die aufwendige Recherche und die Überlassung der Ergebnisse [10]. Weitere Hinweise stammen von Herrn B.Eng. Maik Hoffmann (DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig) [11], dem an dieser Stelle ebenfalls herzlich für die freundliche Zurverfügungstellung seiner Rechercheergebnisse gedankt sei.

Tabelle 2: Strömungsgeschwindigkeiten in Gasanlagen² (Fortsetzung)

DVGW-Regelwerk	Kontext, Durchflussgeschwindigkeit*)			
DVGW-G 495 2015-11 (A)	Tabelle D.1 – Parameter			
	Lfd. Nr.	Berechnungsparameter	Berechnungsgröße	Sollwert
	1.	Eingangsnennweite	Strömungsgeschwindigkeit	nach Herstellerangaben; wenn keine Angaben verfügbar: OP _u bis 250 mbar: max. 15 m/s OP _u > 250 mbar bis 1 bar: max. 20 m/s OP _u > 1,0 bar: max. 25 m/s
	2.	Gasfilter ^{a)}	Betriebsdurchfluss pro m ² Filterfläche	150 (m ³ /h)/m ²
	3.	Gasvorwärmer	Leistung	Leistung ausreichend für t _E = 5 °C; t _A = +3 °C OP _{u,max} i. d. R. mind. 0,95 · MOP _u
	4.	SAV-Nennweite	Strömungsgeschwindigkeit	bei SAV mit Strömungsumlenkung: 50 m/s bei SAV mit axialem Durchgang: 70 m/s
	5.	Leistungskennwert Gasdruckregelgerät	K _G -Wert	ausreichend für Q _{n,max} bei OP _{u,min}
	6.	Leistungskennwert	Zählergröße	ausreichend für Q _{max}
7.	Ausgangsnennweite	Fließgeschwindigkeit am Messort für Gas-Druckregelgerät/SAV	nach Herstellerangaben; wenn keine Angaben verfügbar: OP _u bis 250 mbar: max. 15 m/s OP _u > 250 mbar bis 1 bar: max. 20 m/s OP _u > 1,0 bar: max. 25 m/s	
a) Gilt für Patronenfilter, die bei staubbelastetem Gas eingesetzt werden, nicht für Zellenfilter.				
DVGW-G 499 April 1997 (M)**)	3.2 Wärmeaustauscher Die Geschwindigkeit in den Rohren des Rohrbündels soll 40 m/s nicht überschreiten.			
DVGW-GW 303-1 Oktober 2006 (A)	Gasleitungen A.I.2 Richtwerte für Fließgeschwindigkeiten Richtwerte für Fließgeschwindigkeiten für die Auslegung und den Betrieb von Wasserleitungen enthält DVGW W 400-1 (A). Für die Auslegung und den Betrieb von Gasleitungen haben Fließgeschwindigkeiten keine den Wasserleitungen entsprechende Bedeutung. Als Richtwerte für maximale Fließgeschwindigkeiten staubbelasteter Leitungen können 4-8 m/s herangezogen werden. Darüber hinaus ist auf mögliche Lärmbeeinträchtigungen bei hohen Geschwindigkeiten zu achten.			

*) Alle Hervorhebungen kursiv - der Verfasser
**) aktuell: DVGW-G 499 August 2015 (A)

[9]). Offensichtlich handelt es sich bei diesen Strömungsgeschwindigkeiten um Angaben, die „aus Erfahrung“ für Erdgasleitungen allgemein akzeptiert sind. Eine theoretische Fundierung, insbesondere für strenger einzuhalten-

de Limitierungen scheint nicht zu existieren. Interessanterweise enthält auch das gasfachliche Regelwerk nur wenige explizite Angaben zu Strömungsgeschwindigkeiten, die in Gasleitungen einzuhalten wären. Im techni-

Tabelle 3: Durchflussgeschwindigkeiten (TGL 163-12000, Ausgabe 8.64); siehe [12, 13]

Fluid/Leistungsart	Durchflussgeschwindigkeit in m/s
Stadtgas	
Haushaltanschlüsse bis 0,02 kp/cm ²	bis 1
Niederdruckleitung bis 0,05 kp/cm ²	3 ... 8
Mitteldruckleitung bis 1 kp/cm ²	5 ... 10
Hochdruckleitung größer 1 kp/cm ²	10 ... 25
Wasserstoff	
bis 20 kp/cm ²	12 ... 15
Industriegas	
Niederdruckleitung bis 1,05 kp/cm ²	3 ... 20
Mitteldruckleitung bis 2 kp/cm ²	5 ... 25
Hochdruckleitung über 2 kp/cm ²	20 ... 60

schen Regelwerk fixierte Anhaltswerte für Strömungsgeschwindigkeiten in Gasanlagen wurden in **Tabelle 2** zusammengestellt.

Diese Angaben beziehen sich in aller Regel auf Anlagen bzw. deren Bauteile und weniger auf Transport- bzw. Verteilleitungen. Es ist zu beachten, dass zulässige Strömungsgeschwindigkeiten häufig als Funktion des Betriebsdrucks ausgewiesen werden ($w_{G,zul.} = f(p_G)$). Das ist physikalisch de facto gleichbedeutend mit einer Abhängigkeit der zulässigen Fließgeschwindigkeit von der Dichte des Gases, also $w_{G,zul.} = f(\rho_G)$.

Sucht man nach Angaben für Strömungsgeschwindigkeiten in Netzen mit Wasserstoff, so kann pragmatisch zunächst auf Daten für Stadtgasleitungen zurückgegriffen werden; siehe **Tabelle 3** gemäß [12, 13]. In TGL 163-12000 [13] finden sich auch Angaben für Wasserstoffleitungen, die in **Tabelle 3** aufgenommen worden sind.

Schmidt [14, S. 313] gibt für Wasserstoffleitungen explizit eine Grenzgeschwindigkeit von $w \leq 10$ m/s an, um eine Beschädigung von Einbauten durch mitgerissene Festpartikel und Tropfen zu verhindern und um in oberirdisch geführten Zuleitungen zu gastechnischen Anlagen die durch Strömungsgeräusche verursachten Lärmemissionen zu begrenzen. Die Bedingung, die aus Erfahrung für Erdgasnetze angewandt wird, soll nach [14] ganz ausdrücklich auch für Wasserstoffnetze uneingeschränkt Gültigkeit haben. Das Übertragen der Grenzgeschwindigkeiten für Erdgasnetze auf Wasserstoffleitungen wird in [14] damit begründet, dass das o. a. Schutzziel für den Betrieb der Leitungen mit Erdgas (Verhinderung der Beschädigung der Leitungsanlage infolge Mitritt von Partikeln/Tropfen, Verhinderung unzulässiger Schallemissionen etc.) in gleicher Weise auch für den Betrieb der Lei-

tungen mit Wasserstoff gelten würde, so dass auch dieselben Restriktionen in Bezug auf die Strömungsgeschwindigkeiten maßgebend seien. Der Verfasser hatte das bereits früher, siehe [15], infrage gestellt, da die Argumentation via Strömungsgeschwindigkeiten eher formalen Charakter hat und nicht auf physikalisch begründeten Zusammenhängen basiert. Abweichende fluidmechanische Eigenschaften der strömenden Fluide wie deren Dichte, ggf. Viskosität o. ä. werden an dieser Stelle nämlich nicht bedacht. In einer kürzlich erschienenen Arbeit von *Steiner* [16] wird eine sehr detaillierte und überaus lehrreiche Analyse in puncto „historischer“ Strömungsgeschwindigkeiten in Anlagen und Netzen, Erfahrungswerten, Angaben in Regelwerken etc. vorgelegt. *Steiner* kommt dezidiert zu dem Schluss, dass „der Wert von 20 m/s deshalb auch einen Richtwert für die Integration von regenerativ erzeugten Gasen wie Wasserstoff darstellen (wird). 20 m/s bleibt - eine neue Empfehlung für Durchschnittsgeschwindigkeiten in Gasanlagen und Rohrleitungen ist deshalb nicht erforderlich.“ [16]. Obwohl die Argumentation in [16] außerordentlich kenntnisreich und differenziert geführt wird, fehlt auch dort eine grundhafte physikalisch abgestützte, kritisch reproduzierbare Methodik zur Bestimmung der maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen, die sowohl auf Erdgase als auch auf Erdgas-Wasserstoff-Gemische bis hin zu Wasserstoff universell anwendbar wäre. Zudem chargieren die Autoren letztlich doch zwischen maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten, wirtschaftlich optimierten und allgemein üblichen, d. h. aus Erfahrung sinnvollen Durchschnittsgeschwindigkeiten im Leitungsbetrieb. „Echte“ Grenzgeschwindigkeiten werden typischerweise nicht postuliert. Aus dieser „Gemen-

gelage“ leitet sich letztlich die Problemstellung für diesen Beitrag ab.

2. Problemstellung

Bei der Umstellung von Erdgasnetzen auf den Betrieb mit Wasserstoff sind systematisch höhere Mengenströme zu transportieren als beim Betrieb der Netze mit Erdgas, da der Brennwert von Wasserstoff bzw. Wasserstoff-Erdgas-Gemischen geringer ist als der von Erdgas. Zugleich ist die Dichte von solchen Gemischen substanziiell niedriger als die von Erdgas. In Summe stellen sich in Gasnetzen, die von Erdgas auf Wasserstoff umgestellt werden, bei energiestromgleichen Lastverhältnissen, unveränderten Durchmessern und gleichen Betriebsdrücken daher zwangsläufig deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten ein; siehe hierzu [17-19]. Das wird bei der netzplanerischen Analyse der Leitungssysteme schnell offenkundig, wenn man sich an bislang geltenden Grenzwerten für die Strömungsgeschwindigkeiten orientiert. Hydraulische Probleme, wie beispielsweise das Nichteinhalten von Druckwerten an wichtigen Netzknoten- bzw. Anschlusspunkten lassen sich i. d. R. durch Druckanhebungen o. ä. Maßnahmen beheben. Diese wirken sich jedoch praktisch nicht auf die Strömungsgeschwindigkeiten im Netz aus, so dass ein Beibehalten der bislang verwendeten Grenzgeschwindigkeiten häufig kapitalintensive Netzbauten nach sich ziehen würde. Es ist daher ein Gebot wirtschaftlicher Vernunft, bislang geltende Restriktionen kritisch infrage zu stellen und ggf. physikalisch abgesichert neu zu formulieren. Sollte es sich erweisen, dass in Wasserstoffnetzen höhere Strömungsgeschwindigkeiten zulässig wären als in Erdgasnetzen, wäre das sowohl volkswirtschaftlich als auch für Netzbetreiber betriebswirtschaftlich bedeutsam.

Es stellt sich daher fast zwangsläufig die Frage, welche Grenzgeschwindigkeiten beim Betrieb der Netze mit Wasserstoff zwingend einzuhalten sind. Es sei darauf verwiesen, dass ähnlich gelagerte Probleme für die Auslegung und den Betrieb von Gasdruckregelanlagen kürzlich intensiv untersucht worden sind [20]; die dort angewandte Vorgehensweise lässt sich auf die hier zu behandelnde Problemstellung nicht übertragen, so dass eine eigene Untersuchungsmethodik entwickelt werden muss.

Ziel des Beitrags ist es daher, den Versuch zu unternehmen, auf der Basis fluidmechanischer Überlegungen ein physikalisch begründetes, daher nachvollziehbares (reproduzierbares) Kriterium zu formulieren, auf dessen Grundlage sich hydraulisch fundierte Limitierungen für die Strömungsgeschwindigkeiten in Gasnetzen ableiten lassen. Zudem sollen Grenzgeschwindigkeiten im Hinblick auf den Mitriss von Staubpartikeln und Flüssigkeits-

tröpfchen in der Leitung analysiert und diskutiert werden. Das schließt den Versuch ein, vorhandene und allgemein anerkannte Erfahrungswerte aus dem Betrieb von Erdgasnetzen einzuordnen und diese ggf. zu verifizieren. Auf dieser Grundlage sollen dann in einem zweiten Schritt fluidmechanisch begründete Geschwindigkeitsgrenzen für den Betrieb der Gasnetze mit Wasserstoff angegeben und zur Diskussion gestellt werden.

Fragen der Schallemissionen durch Strömungsvorgänge in Leitungen werden in diesem Beitrag nicht behandelt. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sich bei energiestromäquivalenter Belastung der Leitungen ähnliche schalltechnische Parameter ergeben werden wie beim Betrieb der Leitungen mit Erdgas [11]. Die in diesem Beitrag diskutierten Problemstellungen und abgeleiteten Größen gelten daher formal zunächst in erster Linie für erdverlegte Rohrleitungen.

Stoffdaten für Erdgase, Wasserstoff bzw. Erdgas-Wasserstoff-Gemische finden sich in [6, 14, 15–19] bzw. in [21–23].

3. Grenzgeschwindigkeiten

3.1 Mitriss Staub

Bei der Fixierung von Grenzgeschwindigkeiten für den Betrieb von Gasleitungen wird häufig die Problematik des Mitrisses von in den Leitungen vorhandenem Staub thematisiert. Es ist also erforderlich, sich mit der Frage auseinanderzusetzen, unter welchen Bedingungen Staubpartikel in Gasleitungen mitgerissen und durch den Gasstrom in Strömungsrichtung verfrachtet werden. Hierzu liegen aus der Vergangenheit empirische Untersuchungen von *Bolzinger* vor, die u. a. in [24] zitiert werden. Demgemäß müssen als Ursachen für den im Erdgas transportierten Staub folgende Faktoren bedacht werden:

- Rost, der sich von der Innenwand nicht beschichteter Rohre „von selbst“ ablöst oder durch die Einwirkung der Gasströmung abgelöst wird,
- Verunreinigungen, z. B. Sand, die beim Bau der Rohrleitung in die Segmente gelangt und auch nach dem Molchen der fertiggestellten Leitung nicht vollständig entfernt worden sind.

Feststoffteilchen dieser Art setzen sich in der Rohrsohle ab und werden beim Erreichen einer unteren Grenzgeschwindigkeit vom strömenden Medium Erdgas aufgewirbelt und im Rohr transportiert. *Lubenau* [25] weist dezidiert darauf hin, dass die Staubbelastung in modernen Gasleitungen im Vergleich zu früheren Verhältnissen recht gering ist. Die früher analysierten Stoffdaten der Stäube (Partikelgrößen, Partikelgrößenverteilungen, Bestandteile und darauf basierende Stoffeigenschaften)

Tabelle 4: Grenzgeschwindigkeiten Staubtransport nach Bolzinger gemäß [24]

Korngröße µm	Aufwirbelungsgeschwindigkeit			Transportgeschwindigkeit		
	$p_G = 1 \text{ bar}$	m/s 5 bar	70 bar	$p_G = 1 \text{ bar}$	m/s 5 bar	70 bar
> 20	6,0	3,0	0,92	2,8	1,4	0,43
> 50	9,9	4,9	1,02	4,6	2,25	0,47
> 100	12,55	5,3	1,08	5,8	2,45	0,50
> 200	15,15	5,6	1,08	7,0	2,65	0,50

dürften jedoch weiter Gültigkeit haben, so dass auf diese Erkenntnisse gemäß [24] auch weiterhin zurückgegriffen werden darf.

Diese o. a. Grenzgeschwindigkeit wird nach *Bolzinger* bestimmt von

- der Korngröße des Staubes und
- dem Druck, unter dem das Gas fortgeleitet wird.

Die von *Bolzinger* ermittelten und in [24]^{2, 3} zitierten empirischen Daten zum Staubtransport in Erdgasleitungen sind hier auf der Grundlage von [24] in **Tabelle 4** wiedergegeben worden.

Es zeigt sich, dass die zum Aufwirbeln abgelagerten Staubes erforderlichen Gasgeschwindigkeiten etwa doppelt so hoch sind, wie die für das Transportieren des aufgewirbelten Staubes. Diese Angabe enthält indirekt Informationen zu den ablaufenden Vorgängen: In Gasleitungen befindet sich in der Rohrsohle Staub. Über diese Staubablagerungen strömt Gas. Ab einer bestimmten Fließgeschwindigkeit des Gases werden aus der Staubablagerung Partikel „herausgerissen“ und von der Gasströmung „mitgenommen“. Unter den Bedingungen in Gastransportleitungen darf davon ausgegangen werden, dass die Staubbelastung der Gasströmung verhältnismä-

Bild 2: Situationskizze Staubaufwirbelung/Mittriss von Staubpartikeln an der Rohrsohle

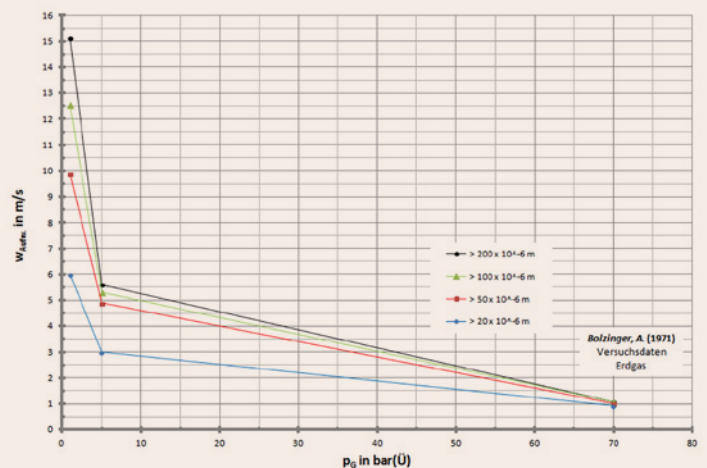
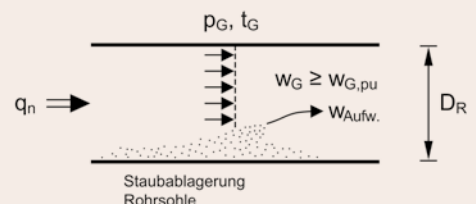


Bild 3: Staubaufwirbelungsgeschwindigkeiten in Erdgasleitungen gemäß *Bolzinger* in Abhängigkeit vom Betriebsdruck; Parameter: Partikelgröße

² Leider konnte der Verfasser die Originalquelle [*Bolzinger*] nicht beschaffen. In [24] wird diese Arbeit auf das Jahr 1971 datiert und der Titel mit „Zur Frage des Staubtransports in Gasfortleitungs- und -verteilungsanlagen“ angegeben. Eine deutschsprachige Veröffentlichung dieses Titels im genannten Zeitraum konnte in der einschlägigen Fachliteratur nicht nachgewiesen werden. Bei „*Bolzinger, A.: On the Entrainment of Dust in Transmission and Distribution Pipelines.* In: Institution of Gas Engineers, Journal, 1971, Band 11“ handelt es sich wohl lediglich um einen Verweis/Kurzinhaltsangabe auf die relevante Originalarbeit. Hierbei dürfte es sich um „*Bolzinger, A.: Gaz d’Auffourd’hui, Jan. 1971, 95 (1), 3-17*“ handeln. Leider konnte diese Quelle durch den Verfasser trotz intensiver Bemühungen nicht eingesehen werden. Der Verfasser zitiert *Bolzinger* daher notgedrungen stets nach [24]; aber auch dieser Projektbericht liegt nur in kurzen Auszügen vor, so dass die näheren Bedingungen der Untersuchungen von *Bolzinger* nicht exakt recherchiert werden konnten. Es wird davon ausgegangen, dass die Druckangaben als Überdrücke zu verstehen sind.

³ Der Verfasser dankt Herrn Dipl.-Ing. A. Bilsing (DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig) für die freundliche Unterstützung bei der Quellenrecherche.

ßig gering ist. Die für den Mittriss des Staubes nötige Energie wird vom strömenden Gas aufgebracht.

Diese Situation wurde in **Bild 2** skizziert. Demgemäß werden durch Einwirkung des Gasstroms auf den in der Rohrsohle abgelagerten Staub einzelne Staubpartikel an der Oberfläche in Bewegung gebracht, infolge des Aufeinanderabrollens der Partikel bilden sich wellenförmige Käme, aus denen sich dann Partikel lösen und mit dem Gasstrom fortgetragen werden.

Die Angaben gemäß **Tabelle 4** bieten in dieser Form $w_{Aufw.} = f(p_G)$ einen sehr praxisbezogenen Überblick über die Grenzgeschwindigkeiten zum Staubtransport in Erdgasleitungen. Die Daten gemäß **Tabelle 4** wurden zusätzlich grafisch in **Bild 3** aufgetragen. Diese Art der Auf-

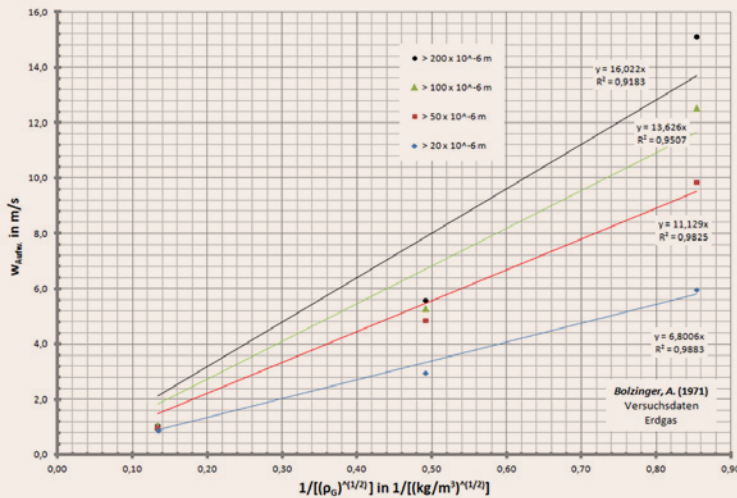


Bild 4: Staubaufwirbelungsgeschwindigkeiten in Erdgasleitungen gemäß Bolzinger in Abhängigkeit von der Dichte des Gases; Parameter: Partikelgröße

bereitung bietet jedoch noch keinerlei analytischen Zugang zu den zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Staubtransports in Gasleitungen, der eine Übertragung dieser Grenzggeschwindigkeiten von Erdgasleitungen auf die Verhältnisse in wasserstoffführenden Gasleitungen zulassen würde.

Das Destabilisieren der Staubformationen und das nachfolgende Mitreißen von Staubpartikeln ist auf direkte mechanische Einwirkungen der Strömung auf die Staubpartikel zurückzuführen. Die hierfür aufgewendete Energie stammt aus der sog. Strömungsenergie des Fluidstroms und ist proportional sowohl zur Fließgeschwindigkeit als auch zur Dichte des Fluids. Es bietet sich daher an, zu versuchen, die Abhängigkeiten gemäß **Bild 3** physikalisch korrekter in der Form $w_{Aufw.} = f(\rho_G)$ aufzubereiten, da ein direkter Zusammenhang zwischen Druck und Dichte besteht ($\rho_G = f(p_G)$). Wenn man die Normdichte des Gases als bekannt voraussetzt, gilt bekanntermaßen:

$$\rho_G = \rho_{n,G} \cdot \frac{p_G}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T_G} \cdot \frac{Z_n}{Z_G} = \rho_{n,G} \cdot \frac{p_G}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T_G} \cdot \frac{1}{K_G} \quad (1)$$

Unter Berücksichtigung aller Unwägbarkeiten in den verwendeten Daten nach Bolzinger lässt sich die Abhängigkeit $\rho_G = f(p_G)$ gemäß **Bild 4** recht gut in der Form

$$w_{Aufw.} \sim \frac{1}{\sqrt{\rho_G}} \quad (2)$$

darstellen.

Das ist ein deutlicher Fingerzeig auf die tatsächlichen Mechanismen und Abhängigkeiten. Es lohnt sich daher, an dieser Stelle nochmals zu versuchen, theoretisch tiefere Zusammenhänge für den Staubtransport

Tabelle 5: Wert des Parameters D_{pu} gemäß Gl. (4) als Funktion der Partikelgröße

Partikelgröße $\mu\text{m} (= 10^{-6} \text{ m})$	D_{pu}
> 20	0,00250
> 50	0,00400
> 100	0,00600
> 200	0,00850
> 300	0,01000

in Rohrleitungen zu analysieren. Hier helfen die Erkenntnisse aus dem Bereich des pneumatischen Transports, siehe [26–35], weiter. Die sog. Pickup-Geschwindigkeit $w_{G,pu}$ lässt sich gemäß [35, S. 149ff.] wie folgt abschätzen:

$$w_{G,pu} = \left[0,0428 \cdot \left(\frac{d_{5,50} \cdot \rho_G}{\eta_G} \right)^{0,175} \cdot \left(\frac{D_R}{d_{5,50}} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_P}{\rho_G} \right)^{0,75} \cdot \sqrt{g \cdot d_{5,50}} \right]^{0,825} \quad (3)$$

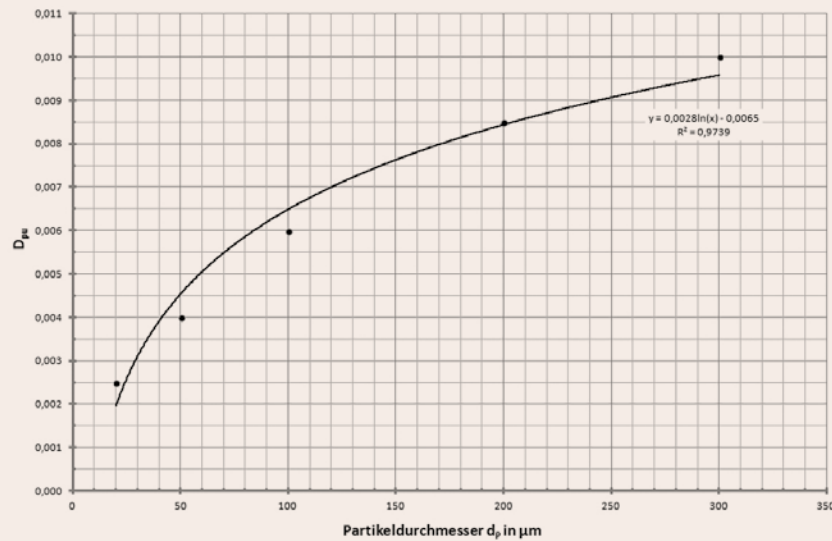
Die Pickup-Geschwindigkeit und die Aufwirbelungsgeschwindigkeit nach Bolzinger sind physikalisch analoge und daher einigermaßen direkt vergleichbare Größen.

Der Korndurchmesser von Stäuben ist stets ein statistischer Mittelwert, der die Gesamtheit der Partikeldurchmesser repräsentiert. Häufig wird hierfür der sog. Medianwert der Korngrößenverteilung $d_{5,50}$ verwendet; siehe beispielsweise [30, 34, 35]. Dieser soll nachfolgend einfach als Partikeldurchmesser d_p (also: $d_p = d_{5,50}$) bezeichnet werden.

Vergleicht man diese Beziehung mit den Abhängigkeiten nach Bolzinger und will versuchen, diese vergleichbar in eine gemeinsame Struktur zu bringen, dann gilt es in erster Linie, die Geometrieparameter (Rohrleitungsdurchmesser D_R , Partikeldurchmesser d_p) aus Gl. (3) zu eliminieren, resp. zusammenfassend zu mitteln. Hierfür wird Gl. (3) wie folgt neu angeschrieben:

$$w_{G,pu} = \underbrace{\left(0,0428 \cdot \sqrt{g} \right)^{0,825}}_{0,0875} \cdot \underbrace{d_p^{0,175}}_{D_{pu}} \cdot \left(\frac{D_R}{d_p} \right)^{0,25} \cdot d_p^{0,50} \cdot d_p^{0,825}$$

Bild 5: Abhängigkeit des Parameters D_{pu} gemäß Gl. (4) von der Partikelgröße



$$\cdot \left(\frac{\rho_G}{\eta_G} \right)^{0,175} \cdot \left(\frac{\rho_P}{\rho_G} \right)^{0,25}$$

mit

$$D_{pu} = d_p^{0,175} \cdot \left(\frac{D_R}{d_p} \right)^{0,25} \cdot d_p^{0,50}$$

oder

$$D_{pu} = \left(d_p^{0,425} \cdot D_R^{0,25} \right)^{\frac{1}{0,825}} \quad (4)$$

Schätzt man den Wert der Größe D_{pu} für Partikelgrößen in Anlehnung an *Bolzinger* für den üblichen Durchmesserbereich von Gastransport- und -verteilungen (DN 100 bis DN 1000) in SI-Einheiten ab und mittelt „nach Augenmaß“, dann lassen sich Zahlenwerte gemäß **Tabelle 5** angeben.

Für die Abschätzung der partikelgrößenabhängigen Pickup-Geschwindigkeit von Stäuben in Gasleitungen lässt sich also letztlich auf Gl. (5) zurückgreifen:

$$w_{G,pu} = 0,0875 \cdot D_{pu} \cdot \left[\left(\frac{\rho_G}{\eta_G} \right)^{0,175} \cdot \left(\frac{\rho_P}{\rho_G} \right)^{0,25} \right]^{\frac{1}{0,825}} \quad (5)$$

Der oben eingeführte Parameter D_{pu} ist lediglich von der Partikelgröße abhängig. Eine entsprechende Aufbereitung der Daten aus **Tabelle 5** findet sich in **Bild 5**.

Es gilt demgemäß folgende Approximationsgleichung (beachte: $[d_p] = \mu\text{m}$):

$$D_{pu} = 0,0028 \cdot \ln(d_p) - 0,0065 \quad (6)$$

Gl. (5) enthält neben der Dichte der Staubpartikel (ρ_P) nur noch Stoffwerte des transportierten Gases (Dichte ρ_G , dynamische Viskosität η_G), so dass mit Hilfe von Gl. (5) die Pickup-Geschwindigkeit von Staubpartikeln direkt berechnet werden kann. Das ist sowohl für Erdgas aber gleichermaßen auch für Wasserstoff möglich. Die Ergebnisse entsprechender Berechnungen sind in **Tabelle 6** ausgewiesen worden.

Es erweist sich, dass mit Hilfe von Gl. (5) die empirisch ermittelten Daten für die Aufwirbelungsgeschwindigkeit von Stäuben in Erdgasleitungen nach *Bolzinger* recht gut reproduziert werden können. Das gilt sowohl für die qualitativen Abhängigkeiten als auch für die quantitativen Werte der Grenzwerte für den Staubmitriss. Die Angaben in [6] liegen in eben dieser Größenordnung. Gl. (5) gestattet es aber auch, die Grenzwerte für Leitungen, die mit Wasserstoff betrieben werden, abzuschätzen. Es zeigt sich, dass die diskutierten Grenzwerte für den Staubmitriss aufgrund veränderter Stoffeigenschaften des strömenden Fluids bei Wasserstoff deutlich höher liegen als bei Erdgas, d. h. es gilt systematisch:

$$w_{G,pu,H_2} \gg w_{G,pu,EG}$$

Aus Gl. (5) ist außerdem zu erkennen, dass hierfür in erster Linie die bei gleichem Druck deutlich niedrigere Dichte von Wasserstoff verantwortlich ist. Daher ist bei gleicher Strömungsgeschwindigkeit auch die Strömungsenergie des Fluidstroms entsprechend geringer, so dass für das Mitreißen der Staubpartikel bei sonst gleichen Bedingungen eine höhere Fließgeschwindigkeit erforderlich ist. In diesem Sinne ist das Ergebnis gemäß **Tabelle 6** schlüssig.

Tabelle 6: Aufwirbelungsgeschwindigkeit nach *Bolzinger* gemäß [24] vs. Pickup-Geschwindigkeiten gemäß Gl. (5) für Erdgas (Methan) und Wasserstoff; Annahme: $\rho_p = 3600 \text{ kg/m}^3$

Korngröße d_p	Erdgas						Wasserstoff		
	Aufwirbelungsgeschwindigkeit			Pickup-Geschwindigkeit $w_{G,pu}$ gemäß Gl. (5)					
	$w_{Aufw.}$ nach <i>Bolzinger</i> (gerundet)								
	m/s			m/s			m/s		
μm	1 bar	5 bar	70 bar	1 bar	5 bar	70 bar	1 bar	5 bar	70 bar
> 20	6,0	3,0	0,9	3,2	1,5	0,3	14,5	6,8	1,3
> 50	9,9	4,9	1,0	5,4	2,5	0,4	24,2	11,3	2,1
> 100	12,6	5,3	1,1	7,7	3,6	0,6	34,5	16,1	3,0
> 200	15,2	5,6	1,1	11,5	5,3	0,9	51,4	24,0	4,4

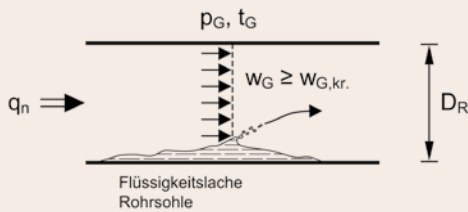


Bild 6: Situationskizze Tropfenmitriss aus Flüssigkeitslachen an der Rohrsohle

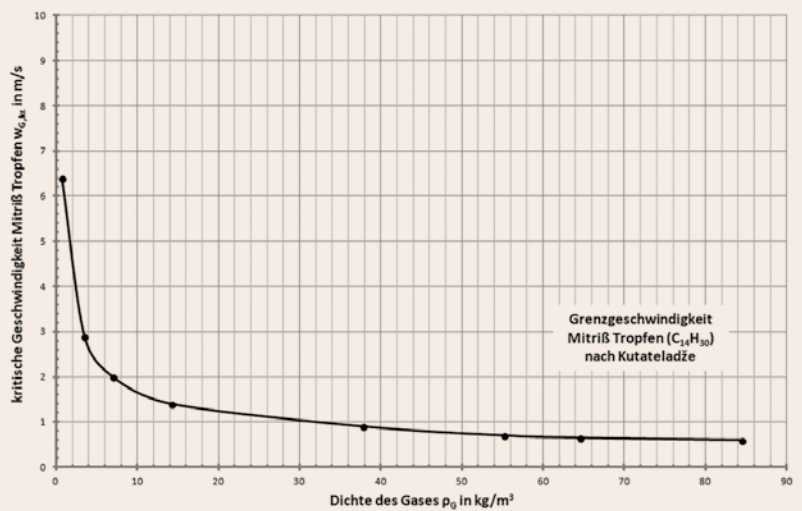


Bild 7: Kritische Geschwindigkeit Mitriss Flüssigkeitstropfen ($C_{14}H_{30}$) aus Flüssigkeitslachen an der Rohrsohle

3.2 Mitriss von Flüssigkeitstropfen

Nummehr soll versucht werden, die Grenzggeschwindigkeiten abzuschätzen, die erforderlich sind, Tropfen aus Flüssigkeitslachen an der Rohrsohle mitzureißen. Es wird also auch hier davon ausgegangen, dass sich an der Rohrsohle Flüssigkeitslachen befinden, aus deren Oberfläche durch die Gasströmung Tropfen herausgelöst und mitgerissen werden können; siehe **Bild 6**.

Die Mechanismen des Mitreißen von Flüssigkeitstropfen aus einer Lache heraus dürften denen des Mitrisses von Staub aus einer Partikelablagerung an der Rohrsohle ähneln: An der Rohrsohle hat sich Flüssigkeit angesammelt. Das war früher häufig Wasser, heute trifft man eher Kohlenwasserstoffe als Flüssigkeitsablagerung in Gasleitungen an [25]. *Lubenau* [25] schätzt ein, dass C_{14} -Kohlenwasserstoffe als repräsentativ für die in Gasleitungen anzutreffenden Kohlenwasserstoffgemische angesehen werden können. Gas strömt also über die zunächst glatte Flüssigkeitsoberfläche hinweg, bringt diese in eine wellenförmige Bewegung; diese Oberflächenwellen

schaukeln sich auf, bis sich aus den Wellenkämmen Flüssigkeitstropfen lösen und mit dem Gasstrom fortgetragen werden. Dieser Vorgang ähnelt phänomenologisch durchaus dem „Pickup“ von Staubpartikeln. Der Mitriss von Flüssigkeitstropfen aus Flüssigkeitslachen wurde ausführlich in Arbeiten von *Kutateladze* et al. ([36-39]) untersucht und analytisch aufbereitet. Die kritische Geschwindigkeit des Mitreißen von Flüssigkeitstropfen aus einer von Gas überströmten Flüssigkeitslache $w_{G,kr.}$ lässt sich demgemäß nach Gl. (7) ⁴ abschätzen:

$$w_{G,kr.} = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot g \cdot \sigma_L \cdot (\rho_L - \rho_G)}{\rho_G^2}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_L + \rho_G}{\rho_L}} \quad (7)$$

Die für die Auswertung von Gl. (7) erforderlichen Stoffdaten der Flüssigkeiten (Dichte ρ_L und Oberflächenspannung σ_L) finden sich beispielsweise in [40] (Kohlenwasser-

⁴ Gl. (7) wurde gemäß [38] bzw. [39] angegeben. Leider wird dieser Zusammenhang in beiden zitierten Literaturstellen mit unterschiedlichen (Druck-)fehlern angeführt, die hier - hoffentlich - korrigiert worden sind.

Bild 8: Grenzgeschwindigkeit Mitriß Flüssigkeitstropfen ($C_{14}H_{30}$) vs. Pickup-Geschwindigkeit Staub für Erdgas

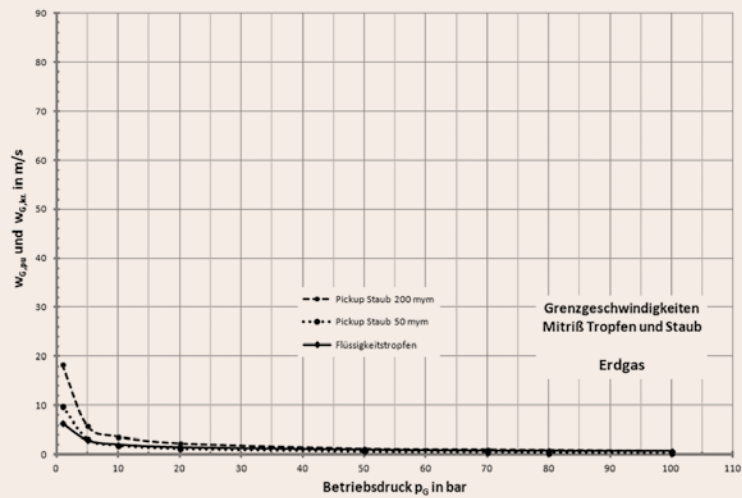
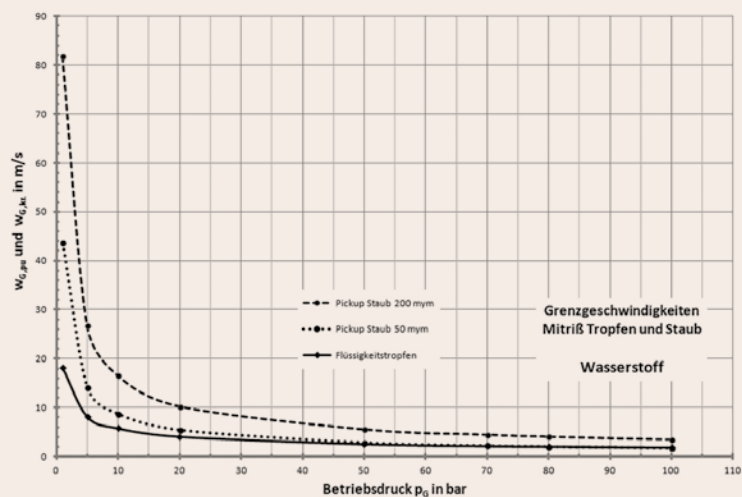


Bild 9: Grenzgeschwindigkeit Mitriß Flüssigkeitstropfen ($C_{14}H_{30}$) vs. Pickup-Geschwindigkeit Staub für Wasserstoff



stoffe) bzw. [41] (Wasser). Der Verlauf des Graphen für die kritische Gasgeschwindigkeit für das Mitreißen von Tropfen über einer Flüssigkeitsoberfläche (berechnet für $C_{14}H_{30}$) ist in **Bild 7** aufgetragen worden. Dabei wurde bewusst die durch Gl. (7) „vorgegebene“ funktionelle Abhängigkeit $w_{G,kr.} = f(p_G)$ beibehalten, die für beliebige Gase Gültigkeit hat.

Es sei darauf hingewiesen, dass sowohl für den Mitriß von Flüssigkeitstropfen als auch für das Aufwirbeln von Staub (siehe Gl. (2)), qualitative folgende Proportionalität besteht:

$$w_{G,kr.} \sim \frac{1}{\sqrt{\rho_G}} \quad (8)$$

Auch das muss als Hinweis darauf gewertet werden, dass nicht die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluidstroms allein das Kriterium für das Mitreißen von Flüssigkeitstropfen darstellt, sondern auch hier die Strömungsenergie (Fließgeschwindigkeit und Dichte des Gases) bestimmend sind.

3.3 Synopse Grenzgeschwindigkeiten Staub- und Tropfenmitriß

Es soll versucht werden, die bisher gewonnenen Analyseergebnisse zur Frage Staub- und Tropfenmitriß in Gasleitungen zusammenzufassen und zu bewerten. Hierzu wurden die maßgeblichen Größen in je einer grafischen Darstellung für Erdgas (**Bild 8**) und Wasserstoff (**Bild 9**) aufgetragen. Der einheitliche Maßstab der jeweiligen Ordinatenachse wurde bewusst gewählt, um die sehr verschiedenen Größenordnungen der Grenzgeschwindigkeiten für Erdgas und Wasserstoff klar sichtbar zu machen.

Zunächst erweist sich, dass die maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten zur Verhinderung des Mitreißen von Staubpartikeln und Tropfen für Erdgas und Wasserstoff jeweils in derselben Größenordnung liegen und für einen großen Druckbereich deutlich unterhalb der gängigen, streng genommen nur für Erdgas gültigen Grenzwerte ($10 \text{ m/s} \leq w_G \leq 20 \text{ m/s}$) liegen. Die in [6] genannte Grenzgeschwindigkeit von ca. 3 m/s gibt die hier

analytisch dargestellten maximal zulässigen Fließgeschwindigkeiten pauschal gut wieder. Das lässt die Schlussfolgerung zu, dass die üblichen maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Erdgasleitungen nicht darauf abstellen, den Mitreiß von Staub oder Flüssigkeiten beim Netzbetrieb zu verhindern, sondern auf anderen Kriterien basieren müssen. Dieser Frage soll im folgenden Abschnitt nachgegangen werden. Aus dem Vergleich der Abbildungen gemäß **Bild 8** und **Bild 9** ergibt sich eine weitere wichtige Folgerung: Die Grenzggeschwindigkeiten zur Verhinderung des Mitreißens von Staub bzw. Flüssigkeitstropfen sind beim Betrieb der Leitungen mit Wasserstoff deutlich höher als beim Betrieb mit Erdgas. Ursache hierfür ist die geringere Fluidichte bei gleichem Druck.

3.4 Maximal zulässige Wandschubspannung

Geht man der Frage nach, welches physikalische Kriterium für die Fixierung von maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten herangezogen werden kann, dann soll von folgender Überlegung ausgegangen werden:

Ein strömendes Fluid wirkt hydraulisch auf die Rohrwandung ein und setzt diese einer mechanischen Beanspruchung aus. Es geht hier ausdrücklich nicht um die Einwirkung von mit dem Gasstrom mitgeführten Partikeln auf die Rohrwand, sondern um die erosive Wirkung des Fluidstroms, d. h. der Moleküle des strömenden Fluids selbst, auf die Rohrwandung. Diese mechanische Beanspruchung der Leitungswandung durch das strömende Fluid gilt es zu begrenzen. Hierzu dient letztlich die Festlegung einer Grenzggeschwindigkeit für den Leitungsbetrieb. Die vom strömenden Fluid auf die Leitungswandung ausgeübte mechanische Beanspruchung ist für Erdgas bei Strömungsgeschwindigkeiten zwischen (10 ... 20) m/s aus Erfahrung offenbar akzeptabel.

Hieraus ergibt sich dann sofort der Lösungsansatz für die Beantwortung der Frage, welche Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen, die mit Wasserstoff oder beliebigen anderen Gasen betrieben werden, einzuhalten wären: Eine physikalische Größe, die als Maß für die mechanische Beanspruchung der Rohrwandung durch das strömende Fluid herangezogen werden kann, ist die sog. Wandschubspannung (τ_w); siehe hierzu die Standardliteratur zur Strömungsmechanik bzw. -lehre, z. B. [42–60]. Um die hydraulische Wirkung des Stoffstroms auf die Rohrwandung zu limitieren, dürfen die Wandschubspannungen beim gegenwärtigen Betrieb der Leitung mit Erdgas ($\tau_{w,EG}$) und beim künftigen Betrieb mit Erdgas-Wasserstoff-Gemischen bzw. Wasserstoff ($\tau_{w,EG/H_2}$) maximal gleich sein:

$$\tau_{w,EG/H_2} \leq \tau_{w,EG}$$

Die Wandschubspannung lässt sich mit den aus der Druckverlustberechnung bekannten Größen (Rohrreibungsbeiwert, Staudruck) wie folgt ermitteln [50, S. 260]:

$$\tau_w = \frac{\lambda}{4} \cdot \left(\frac{\rho_G}{2} \cdot w_G^2 \right) \tag{10}$$

$$\tau_w = \frac{\lambda}{8} \cdot (\rho_G \cdot w_G^2) \tag{11}$$

Gemäß Gl. (10)/(11) hängt die mechanische Wirkung der Fluidströmung auf die Rohrwandung sowohl von der Strömungsgeschwindigkeit als auch von der Fluidichte ab.

In diesem Kontext soll eine weitere Überlegung angestellt werden: Die größte mechanische Wirkung wird vom strömenden Fluid auf die Rohrwandung bei hoher Strömungsgeschwindigkeit und hohen Drücken, resp. hohen Dichten entfaltet. Das entspricht den Bedingungen der Fortleitung von Gasen im Hochdruckbereich bei hoher Netzlast. Unter diesen Bedingungen stellt sich der Strömungszustand typischerweise im hydraulisch rauen Bereich ein (rechte Seite des *Moody*-Diagramms). Unter diesen Maßgaben ist der Rohrreibungsbeiwert lediglich von der relativen Rauigkeit der Leitung (k/D_p) und nicht mehr von der Re-Zahl abhängig, so dass der Rohrreibungsbeiwert für den Betrieb der Leitung mit Erdgas und der Rohrreibungsbeiwert für den Betrieb der Leitung mit Erdgas-Wasserstoff-Gemisch identisch sind und somit stets gilt:

$$\lambda_{EG} \approx \lambda_{EG/H_2} \tag{12}$$

Formuliert man als Bemessungsbedingung in Anlehnung an Gl. (9) nunmehr formal das Kriterium „gleiche Wandschubspannung beim Leitungsbetrieb“, dann ist folgender Grundansatz zu wählen:

$$\tau_{w,EG} = \tau_{w,EG/H_2} \tag{13}$$

Dieser Ansatz kann wie folgt entwickelt werden:

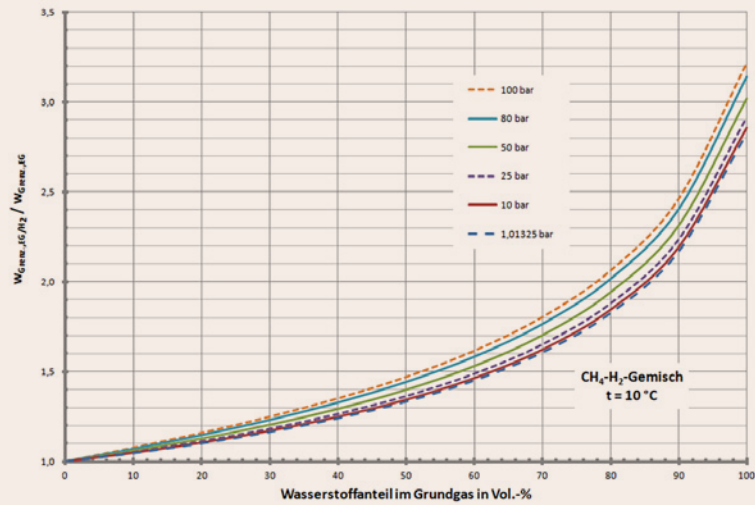
$$\left[\frac{\lambda}{8} \cdot (\rho \cdot w^2) \right]_{EG} = \left[\frac{\lambda}{8} \cdot (\rho \cdot w^2) \right]_{EG/H_2}$$

$$\frac{\lambda_{EG}}{8} \cdot (\rho_{EG} \cdot w_{EG}^2) = \frac{\lambda_{EG/H_2}}{8} \cdot (\rho_{EG/H_2} \cdot w_{EG/H_2}^2)$$

$$\rho_{EG} \cdot w_{EG}^2 = \rho_{EG/H_2} \cdot w_{EG/H_2}^2$$

Nunmehr lässt sich für das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten bei gleicher Wandschubspannung, also bei gleicher mechanischer Wirkung der Fluidströmung auf die Rohrwandung, schreiben:

Bild 10: Verhältnis der Grenzgeschwindigkeiten in Gasleitungen für den Betrieb mit Erdgas-Wasserstoff-Gemischen; Parameter: Betriebsdruck



$$\left(\frac{W_{EG/H_2}}{W_{EG}} \right)^2 = \frac{\rho_{EG}}{\rho_{EG/H_2}}$$

$$\frac{W_{EG/H_2}}{W_{EG}} = \sqrt{\frac{\rho_{EG}}{\rho_{EG/H_2}}}$$

Will man dieses Verhältnis nun für die zulässigen Grenzgeschwindigkeiten notieren, gilt Gl. (14) bzw. Gl. (15):

$$\frac{W_{Grenz,EG/H_2}}{W_{Grenz,EG}} = \sqrt{\frac{\rho_{EG}}{\rho_{EG/H_2}}} \quad (14)$$

$$W_{Grenz,EG/H_2} = W_{Grenz,EG} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{EG}}{\rho_{EG/H_2}}} \quad (15)$$

Diese Beziehung lässt sich etwas praktikabler und verallgemeinerbarer aufbereiten, indem anstelle der Dichten im Betriebszustand die Normdichten verwendet werden:

$$\rho_{EG} = \rho_{n,EG} \cdot \frac{p_G}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T_G} \cdot \frac{1}{K_{EG}} \quad (16)$$

$$\rho_{EG/H_2} = \rho_{n,EG/H_2} \cdot \frac{p_G}{p_n} \cdot \frac{T_n}{T_G} \cdot \frac{1}{K_{EG/H_2}} \quad (17)$$

Nach Einsetzen der Beziehungen gemäß Gl. (16) und Gl. (17) in Gl. (14)/(15) erhält man abschließend:

$$\frac{W_{Grenz,EG/H_2}}{W_{Grenz,EG}} = \underbrace{\sqrt{\frac{\rho_{n,EG}}{\rho_{n,EG/H_2}}}}_{f_{W_{Grenz}}} \cdot \sqrt{\frac{K_{EG/H_2}}{K_{EG}}} \quad (18)$$

mit

$$f_{W_{Grenz}} = \sqrt{\frac{\rho_{n,EG}}{\rho_{n,EG/H_2}}} \cdot \sqrt{\frac{K_{EG/H_2}}{K_{EG}}} \quad (19)$$

Es gilt natürlich auch:

$$\begin{aligned} W_{Grenz,EG/H_2} &= f_{W_{Grenz}} \cdot W_{Grenz,EG} = \\ &= \left(\sqrt{\frac{\rho_{n,EG}}{\rho_{n,EG/H_2}}} \cdot \sqrt{\frac{K_{EG/H_2}}{K_{EG}}} \right) \cdot W_{Grenz,EG} \quad (20) \end{aligned}$$

Demgemäß kann von der für Erdgas geltenden maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeit auf die – bei gleicher mechanischer Wirkung auf die Rohrwandung – zulässige Strömungsgeschwindigkeit bei Betrieb der Leitung mit Erdgas-Wasserstoff-Gemischen geschlossen werden. Der Betrag des Umrechnungsfaktors $f_{W_{Grenz}}$ ist primär abhängig vom Wasserstoffanteil; den Einfluss des Druckes gilt es zusätzlich zu berücksichtigen. Die entsprechende Abhängigkeit ist in **Bild 10** grafisch aufbereitet worden. Die Werte des Korrektur- bzw. Anpassungsfaktors werden zusätzlich in **Tabelle 7** angegeben.

Geht man konservativ von einer zulässigen Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s in Erdgasleitungen aus, dann ergeben sich auf der Grundlage des oben ausgeführten Gedankenganges für Erdgas-Wasserstoff-Gemische angepasste zulässige Strömungsgeschwindigkeiten gemäß **Bild 11**. Würde man in Erdgasnetzen zulässige Strömungsgeschwindigkeiten druckabhängig fixiert haben, so dass bei niedrigeren Betriebsdrücken (ca. 5 bar) 10 m/s gelten, bei höheren Betriebsdrücken (bis 100 bar) hingegen 25 m/s, dann würden sich bei einer etwa linearen Abhängigkeit der zulässigen Strömungsgeschwindigkeit vom Betriebsdruck Verhältnisse gemäß **Bild 12** ergeben.

Die Diskussion möglicher Grenzgeschwindigkeiten für den Betrieb von Gasleitungen auf der Basis einer maximal zulässigen Wandschubspannung, die bislang interessan-

Tabelle 7: Faktor zur Umrechnung der Grenzgengeschwindigkeiten „Erdgas“ auf „Erdgas-Wasserstoff-Gemische“; Parameter: Betriebsdruck, Erdgas = Methan

	H ₂ -Anteil	f _{wGrenz.}					
	Vol.-%	1 bar	10 bar	25 bar	50 bar	80 bar	100 bar
CH ₄	0	1	1	1	1	1	1
	5	1,023	1,024	1,026	1,030	1,035	1,038
	10	1,047	1,049	1,053	1,061	1,071	1,077
	20	1,101	1,105	1,113	1,128	1,147	1,159
	30	1,164	1,171	1,182	1,204	1,232	1,249
	40	1,240	1,249	1,264	1,293	1,328	1,351
	50	1,333	1,344	1,364	1,399	1,443	1,470
	60	1,450	1,464	1,488	1,531	1,583	1,616
	70	1,606	1,622	1,651	1,703	1,765	1,804
	80	1,824	1,845	1,880	1,942	2,017	2,063
H ₂	90	2,167	2,193	2,237	2,313	2,405	2,462
	100	2,823	2,858	2,917	3,019	3,143	3,219

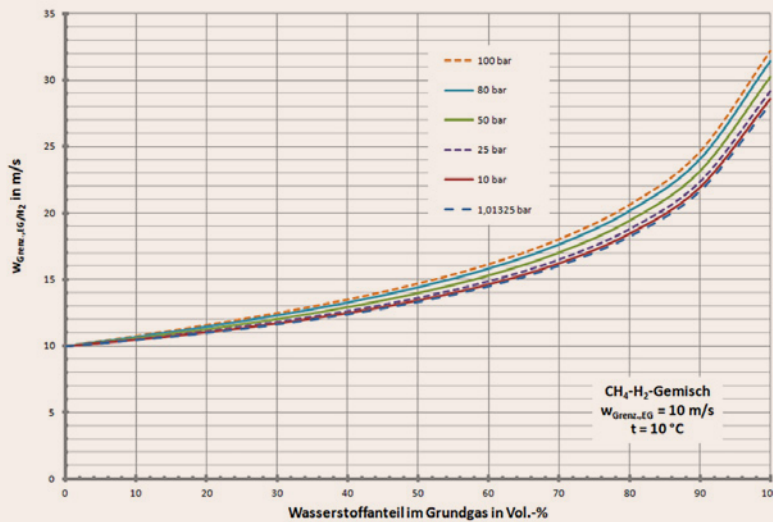


Bild 11: Maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeiten in Leitungen für Erdgas-Wasserstoff-Gemische bei $w_{\text{Grenz,EG}} = 10 \text{ m/s}$; Parameter: Betriebsdruck

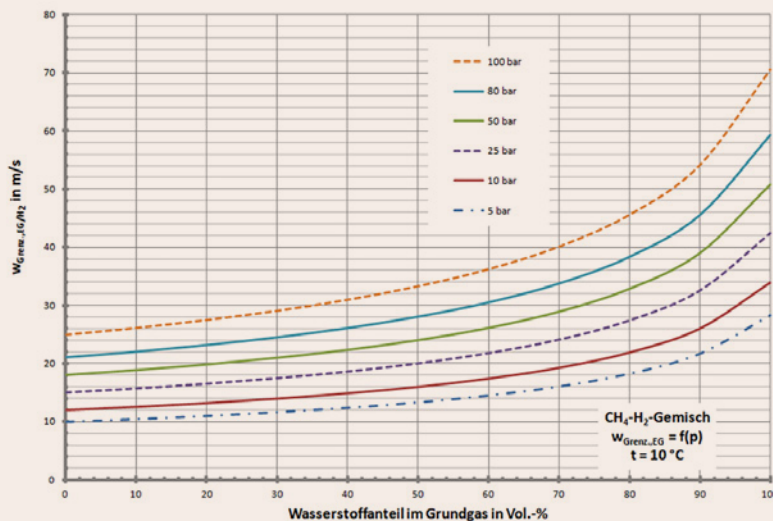


Bild 12: Maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeiten in Leitungen für Erdgas-Wasserstoff-Gemische bei $w_{\text{Grenz,EG}} = f(p)$; Parameter: Betriebsdruck; Parameter: Betriebsdruck

terweise nicht beziffert werden musste, führt zu folgenden Schlussfolgerungen:

- Die „maximal zulässige Wandschubspannung“ stellt eine geeignete physikalische Größe zur Charakterisierung der mechanischen Einwirkung einer Fluidströmung auf die Rohrwandung dar.
- Als mögliches Auslegungskriterium kann formuliert werden: Die mechanische Einwirkung, die von einem Erdgasstrom auf die Rohrwandung ausgeübt wird, darf auch von einer Erdgas-Wasserstoff-Gemisch-Strömung auf die Rohrwandung ausgehen. In beiden Betriebsfällen soll zwischen Fluidstrom und Rohrwandung dieselbe Wandschubspannung zulässig sein.
- Auf dieser Grundlage können Grenzggeschwindigkeiten für Erdgas-Wasserstoff-Gemische in Gasleitungen basierend auf bekannten Grenzggeschwindigkeiten für Erdgas gemäß Gl.(20)/(19) „umgerechnet“ werden. Die dafür maßgebenden physikalischen Zusammenhänge wurden dargelegt.
- In Wasserstoffnetzen sind somit deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten „zulässig“ als in Erdgasnetzen, wenn man von derselben mechanischen bzw. hydraulischen Einwirkung (resp. Wandschubspannung) des Wasserstoffstroms auf die Rohrwandung ausgeht wie in erdgasführenden Leitungen.

Es muss betont werden, dass alle in diesem Abschnitt angegebenen Grenzwerte der Strömungsgeschwindigkeiten für Erdgas-Wasserstoff-Gemische lediglich auf der Grundlage empirisch gesicherter Werte für Erdgas „hochgerechnet“ bzw. „umgerechnet“ worden sind. Diese „Hoch- bzw. Umrechnung“ erfolgt zweifelsfrei physikalisch korrekt. Basis aller Überlegungen waren jedoch stets die Angaben für erdgasbasierte Grenzwerte. Diese wurden nicht theoretisch abgesichert bzw. belegt. Es liegt somit noch kein theoretisch fundiertes Verfahren für eine wirkliche gasbeschaffenheitsabhängige echte Vorausberechnung von maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen vor.

3.5 Maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit \approx „Erosional Velocity“

Die hier entwickelten Überlegungen können weitergeführt und recht zwanglos hin zur sog. „Erosional Velocity“ entwickelt werden, die in der englischsprachigen Literatur (siehe beispielsweise [60-64]) eingeführt ist. Die hier gewählte Vorgehensweise geht in der Grundidee auf [65] zurück.

Für die Wandschubspannung gilt weiter Gl. (11). Es soll versucht werden, die grobe Größenordnung der bislang gängigen, demgemäß „zulässigen“ Wandschubspannung abzuschätzen. Das lässt sich über den Rohrreibungsbeiwert bewerkstelligen. Für dessen Berechnung

soll auf die im Bereich des Gastransports etablierte Gleichung von *Chodanowitsch-Odischarija* (siehe [66] bzw. ggf. auch [7, 21, 67-69]) zurückgegriffen werden:

$$\lambda = 0,067 \cdot \left(\frac{158}{Re} + \frac{2 \cdot k}{D_R} \right)^{0,20} \quad (21)$$

Für die Abschätzung des Rohrreibungsbeiwertes kann vom hydraulisch rauhen Betriebsfall (siehe Abschnitt 3.4) ausgegangen werden. Der betreffende Rohrreibungsbeiwert ergibt sich dann als Grenzwert für hohe Re-Zahlen aus

$$\lambda_{\text{rau}} = \lim_{Re \rightarrow \infty} \lambda \left(Re, \frac{k}{D_R} \right)$$

letztlich nach Gl. (22):

$$\lambda = \lambda_{\text{rau}} = 0,067 \cdot \left(\frac{2 \cdot k}{D_R} \right)^{0,20} \quad (22)$$

Nimmt man eine Rauigkeit $k = 0,1$ mm gemäß DVGW-G 303-1 [70] an und variiert den Rohrleitungsdurchmesser im Bereich $100 \text{ mm} \leq D_R \leq 1000$, dann ergeben sich Rohrreibungsbeiwerte in der Größenordnung $0,012 \leq \lambda \leq 0,019$. Zur Abschätzung der maximal zulässigen Wandschubspannung für Erdgas soll zudem von einer Dichte von $\rho_G = \rho_{\text{CH}_4}(90 \text{ bar}, 10^\circ\text{C}) \approx 80 \text{ kg/m}^3$ ausgegangen werden. Unterstellt man nunmehr Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich $w_G = (10 \dots 15) \text{ m/s}$, dann ergeben sich für diese Verhältnisse Wandschubspannungen gemäß Gl. (11) im Bereich $15 \text{ N/m}^2 \leq \tau_W \leq 45 \text{ N/m}^2$. Der Verfasser schlägt vor, einen Wert in der Größenordnung von

$$\bar{\tau}_{W,\text{zul}} = 35 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (23)$$

als repräsentativen Mittelwert für die weitere Rechnung zu verwenden. Nunmehr kann durch Umstellen von Gl. (11) die zulässige Strömungsgeschwindigkeit direkt berechnet werden:

$$w_{G,\text{zul}} = \sqrt{\frac{8 \cdot \bar{\tau}_{W,\text{zul}}}{\lambda \cdot \rho_G}} \quad (24)$$

Gl. (24) lässt sich weiter bearbeiten:

$$w_{G,\text{zul}} = \frac{\sqrt{8 \cdot \bar{\tau}_{W,\text{zul}}}}{\sqrt{\lambda \cdot \rho_G}}$$

Mit

$$C = \sqrt{\frac{8 \cdot \bar{\tau}_{W,\text{zul}}}{\lambda}} \quad (25)$$

ergibt sich als Gebrauchsgleichung für die Berechnung der zulässigen Strömungsgeschwindigkeit in Gasleitungen die einfache Beziehung

Tabelle 8: Konstante C zur Berechnung der maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen

Leitungstyp	C
Gastransport- und -verteilungen: Stahl	125
Gastransport- und -verteilungen: Stahl innenbeschichtet, Kunststoff	200

$$w_{G,zul.} = \frac{C}{\sqrt{\rho_G}} \quad (26)$$

In Gl. (26) ist lediglich die Betriebsdichte des Gases und eine noch zu bestimmende Konstante C enthalten. Verwendet man zur Abschätzung der Konstanten C wieder die oben angegebenen Werte für den Rohrreibungsbeiwert, dann erhält man Werte im Bereich $118 \leq C \leq 132$. Der Verfasser verwendet in diesem Falle als repräsentativen Mittelwert für C

$$\bar{C} = 125 \quad (27)$$

Die hier getroffenen Annahmen treffen als Mittelwerte recht gut auf typische Stahlleitungen für den Gastransport und die Gasverteilung zu. Auf dieser Grundlage folgt pragmatisch:

$$w_{G,zul.} = \frac{125}{\sqrt{\rho_G}} \quad (28)$$

Wiederholt man die oben angestellten Überlegungen für höhere zulässige Strömungsgeschwindigkeiten im Bereich $w_G = (20 \dots 25) \text{ m/s}$ und bei sonst gleichen Prämissen,

dann wären die Mittelwerte für die zulässigen Wandschubspannungen neu mit

$$\bar{\tau}_{w,zul.} = 80 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \quad (29)$$

anzusetzen. Daraus ergibt sich hier für die oben bereits eingeführte Konstante C ein mittlerer Wert von

$$\bar{C} = 200 \quad (30)$$

Die hier analysierte Situation mit höheren Fließgeschwindigkeiten (resp. höheren zulässigen Wandschubspannungen) für Erdgasbetrieb der Leitung ist physikalisch einer Betriebsituation mit geringerer Wandrauigkeit, also glatterem Rohr äquivalent.

Gl. (26) ist de facto identisch mit der Bestimmungsgleichung für die sog. „erosional velocity“ ([60] bis [64]). Über den Betrag der Konstanten C wird in der Literatur z. T. lebhaft diskutiert; Überlegungen zur Festlegung dieses Wertes finden sich beispielsweise in [71], [72]. Der Verfasser schlägt vor, zunächst von C-Werten gemäß **Tabelle 8** auszugehen. Diese Angaben lassen sich unter Berücksichtigung von Erfahrungen der künftigen betrieblichen Praxis weiter spezifizieren und differenzieren. Möglicherweise kann dieser Grundansatz nicht nur für Gastransport- und -verteilungen, sondern auch für Rohrleitungen in Gasanlagen, z. B. in Gasdruckregelanlagen, verwendet werden. Künftige Anpassungen bzw. Präzisierungen erfolgen dann aber auf einer transparent formulierten Ausgangsbasis, physikalisch abgesichert und jederzeit (kritisch) reproduzier-, resp. revidierbar.

Der abgeleitete Berechnungsansatz gemäß Gl. (26) ist sowohl auf Erdgase als auch auf Erdgas-Wasserstoff-Gemische bzw. reinen Wasserstoff anwendbar, da die Bezie-

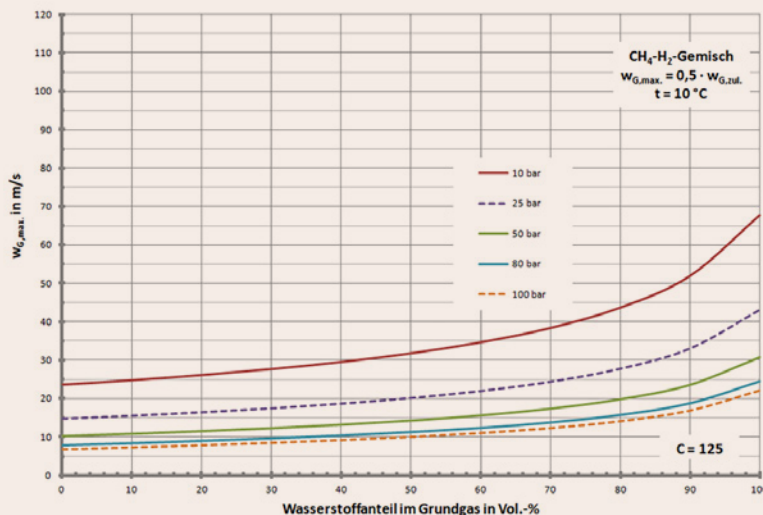


Bild 13: Maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeiten in Leitungen für Erdgas-Wasserstoff-Gemische bei $w_{G,max.}$ gemäß Gl. (31) mit $C = 125$; Parameter: Betriebsdruck

hung nur die Gasdichte enthält und in der Konstanten C keinerlei Limitierungen bezüglich der Gasbeschaffenheit fixiert sind.

Hält man diese maximal zulässige Grenzgeschwindigkeit ein, sind gemeinhin keine unzulässigen strömungstechnischen Belastungen der Leitung, keine unerwünschten Schallemissionen usw. zu erwarten. Gemäß [60-64] wird als Richtwert für die maximale Strömungsgeschwindigkeit im Leitungsbetrieb die Hälfte des Grenzwertes empfohlen:

$$w_{G,max.} = \frac{1}{2} \cdot w_{G,zul.} \quad (31)$$

Gl. (31) wurde in **Bild 13** für Erdgas-Wasserstoff-Gemische und verschiedene Betriebsdrücke mit $C = 125$ und in **Bild 14** entsprechend mit $C = 200$ grafisch aufbereitet. Es ist zu beachten, dass in die bisherige Rechnung diverse Mittelungen und stets konservativ vorgenommene Größenabschätzungen eingegangen sind, so dass in den abgeleiteten Gleichungen gewisse Unsicherheiten enthalten sind. Der Verfasser würde diese in der Größenordnung von (2 ... 3) m/s schätzen, was in der Notation gemäß Gl. (32) berücksichtigt werden soll:

$$w_{G,max.} = \frac{1}{2} \cdot w_{G,zul.} + (2 \dots 3) \frac{m}{s} \quad (32)$$

Aus **Bild 13/Bild 14** wird erkennbar, dass die maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten beim Betrieb der Netze bzw. Leitungen mit Wasserstoff deutlich höher liegen als beim Betrieb mit Erdgas. Die maximal zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten sind auch druckabhängig. Schreibt man die zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten gemäß Gl. (31)/(28) nochmals explizit für Erdgas bzw. Erdgas-Wasserstoff-Gemische an, erhält man:

$$w_{G,max.,EG} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C}{\sqrt{\rho_{EG}}}$$

$$w_{G,max.,EG/H_2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C}{\sqrt{\rho_{EG/H_2}}}$$

Setzt man beide Gleichungen ins Verhältnis, folgt Gl. (33):

$$\frac{w_{G,max.,EG/H_2}}{w_{G,max.,EG}} = \frac{\sqrt{\rho_{EG}}}{\sqrt{\rho_{EG/H_2}}} = \sqrt{\frac{\rho_{EG}}{\rho_{EG/H_2}}} \quad (33)$$

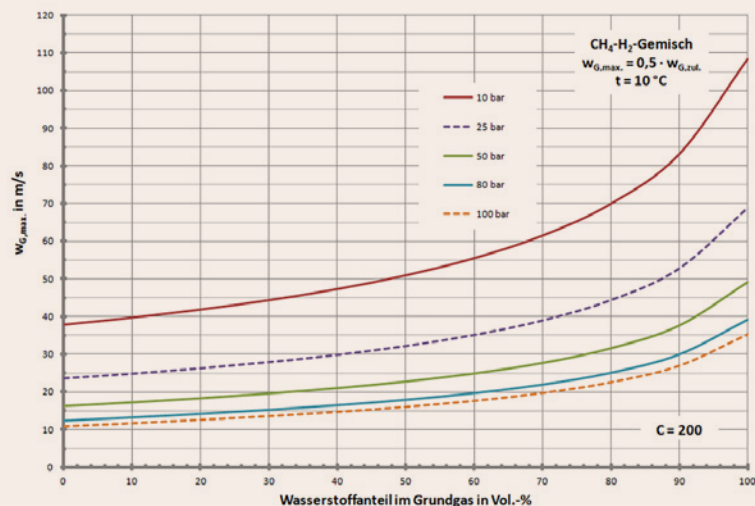
Gl. (33) ist interessanterweise identisch mit Gl. (15).

Es sei darauf verwiesen, dass in **Bild 13/14** kein Graph für Niederdruckleitungen eingetragen wurde. Dieser läge deutlich oberhalb des 10 bar-Kurvenzuges, also bei Strömungsgeschwindigkeiten, die so hoch ausfallen, dass diese aus hydraulischen Restriktionen (z. B. Einhaltung zulässiger Druckverluste) wohl kaum praktikabel wären. Für Wasserstoff würden dann formal Strömungsgeschwindigkeiten $w_{G,max.,H_2} > 40$ m/s vorstellbar sein. Das geht durchaus konform mit Daten aus [73].

4. Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag wurden Fragen der analytischen Berechnung von zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten in Gasleitungen erörtert. Hintergrund der Fragestellung ist die anstehende Umstellung von Gasversorgungssystemen von Erdgas auf Wasserstoff. Es konnte herausgearbeitet werden, dass beim Betrieb von Gasleitungen mit Wasserstoff deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeiten zulässig sind als beim Betrieb mit Erdgas. Als Kriterium wurde eine „maximal zulässige Wandschubspannung“ vorgeschlagen. Diese wurde abgeschätzt. Vorschläge zur analytischen Berechnung der maximal

Bild 14: Maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeiten in Leitungen für Erdgas-Wasserstoff-Gemische bei $w_{G,max.}$ gemäß Gl. (31) mit $C = 200$; Parameter: Betriebsdruck



zulässigen Strömungsgeschwindigkeiten wurden unterbreitet. Diese berücksichtigen sowohl die Gasbeschaffenheit als auch spezifische Betriebsbedingungen der Rohrleitungen. Fragen des Mitreißen von Staubpartikeln und Flüssigkeitstropfen werden diskutiert.

Ein weiterer Gedanke sei gestattet. Möglicherweise wäre es sinnvoll, ähnlich wie für Systemdrücke (DP vs. MOP vs. OP), analoge Angaben für Strömungsgeschwindigkeiten in Rohrleitungen einzuführen und ggf. im technischen Regelwerk zu verankern. Man müsste dann entsprechend eine „DV“ (Design Velocity) als Prämisse für die Rohrleitungsdimensionierung fixieren, eine „MOV“ (Maximum Operating Velocity) als maximal zulässige Strömungsgeschwindigkeit für den Betrieb der jeweiligen Leitung festlegen und zusätzlich eine „OV“ (Operating Velocity) als (beispielsweise zeitlich-örtlich) mittlere Strömungsgeschwindigkeit in der Leitung angeben. Mit den in diesem Beitrag eingeführten Größen könnte z. B. gelten:

$$DV \geq MOV$$

$$MOV \leq w_{G,zul.}$$

$$OV \leq w_{G,max.}$$

Auf diese Weise wäre es möglich, sowohl selten auftretende, kurzzeitige extrem hohe Belastungen der Leitung als auch häufiger vorkommende bzw. reguläre, dauerhafte Betriebszustände bei unterschiedlichen Druckbeaufschlagungen abzubilden. Diese Angaben wären gemeinsam mit den korrespondierenden Druckdaten (DP, MOP, OP) im Sinne dieses Beitrags aber nur vollständig, wenn auch Angaben zur Gasbeschaffenheit (resp. der Dichte) des fortgeleiteten Gases vorlägen.

Der Verfasser könnte gut nachvollziehen, wenn der gewählte Ansatz „maximal zulässige Wandschubspannung“ von der Leserschaft als etwas ausgeprägt theoretisch bzw. zunächst „exotisch“ empfunden wird. Bei näherer Analyse werden für die praktischen Rechnungen jedoch nur im Grundsatz vertraute hydraulische Größen verwendet. Außerdem lässt sich die gewählte Vorgehensweise recht logisch aus dem gemeinhin verfügbaren gasfachlichen Wissensreservoir entwickeln, ohne besondere „Tricks und Kniffe“ anwenden zu müssen: „Auf eine einfache Formel gebracht ...: Biegen, Brechen und Verbinden. Das Neue geht aus dem Alten hervor, indem wir Vertrautes variieren, umkrepeln oder auf ungewohnte Weise mit anderem kombinieren.“ [74]. Im Grunde genommen ist der vorliegende Beitrag auf genau diese Weise entstanden. Vielleicht hilft diese Anmerkung, dem vorgeschlagenen Gedankengang zu folgen.

Dank

Der Verfasser dankt allen Fachkollegen, die diesen Beitrag in einer frühen, noch sehr rohen Fassung gelesen und kommentiert haben: Prof. Dr. H.-G. Fasold (Essen), B.Eng. M. Hoffmann (Leipzig), Dipl.-Ing. (FH) A. Huhn (Erfurt), M. Eng. B. Kraft (Erfurt), M.Eng. R. Stang (Erfurt). Die Verantwortung für den Inhalt des Beitrags und eventuelle Fehler liegen selbstredend ausschließlich beim Verfasser.

Literatur

- [1] *Cerbe, G. u. a.*: Grundlagen der Gastech. Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. 3., vollständig neubearbeitete und erweiterte Auflage. München; Wien: Hanser 1988
- [2] *Cerbe, G. u. a.*: Grundlagen der Gastech. Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. 4., bearbeitete und erweiterte Auflage. München; Wien: Hanser 1992
- [3] *Cerbe, G. u. a.*: Grundlagen der Gastech. Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. 5., vollständig neubearbeitete Auflage. München; Wien: Hanser 1999
- [4] *Cerbe, G. u. a.*: Grundlagen der Gastech. Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. 6., vollständig neu bearbeitete Auflage. München; Wien: Hanser 2004
- [5] *Cerbe, G. u. a.*: Grundlagen der Gastech. Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. 7., vollständig neu bearbeitete Auflage. München; Wien: Hanser 2008
- [6] *Cerbe, G. und Lendt, B.* (Hrsg.): Grundlagen der Gastech. Gasbeschaffung, Gasverteilung, Gasverwendung. 8., vollständig überarbeitete Auflage. München; Wien: Hanser 2017
- [7] *Mischner, J.*: Fluiddynamische Berechnung von Hochdruckgasleitungen. In: Horlacher, H.-B. und Helbig, U. (Hrsg.): Rohrleitungen 2: Einsatz, Verlegung, Berechnung, Rehabilitation. 2., neu bearbeitete Auflage. Berlin: Springer Vieweg 2018, S. 587-622
- [8] *Eberhard, R. und Hüning, R.* (Hrsg.): Handbuch der Gasversorgungstechnik. 2. Auflage. München; Wien: R. Oldenbourg 1990
- [9] Persönliche Mitteilung Prof. Dr. rer. nat. H.-G. Fasold (Gasplan Fasold, Essen): E-Mails 19.01.2021
- [10] Persönliche Mitteilung M.Eng. B. Kraft (Erfurt): E-Mails 27.01.2021 - 03.02.2021
- [11] Persönliche Mitteilung B.Eng. M. Hoffmann (DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig): E-Mails 19.01.2021 - 03.02.2021
- [12] *Kowaczek, J.; Kurth, K. und Schubert, H.*: Tabellenbuch für die Gastech. 3., durchgesehene Auflage. Leipzig: VEB Verlag für Grundstoffindustrie 1978
- [13] TGL 163-12000. Gruppe 313: Rohrleitungen: Durchflussgeschwindigkeiten. Richtlinien. August 1964
- [14] *Schmidt, Th.*: Wasserstofftechnik. Grundlagen, Systeme, Anwendung, Wirtschaft. München: Carl Hanser Verlag 2020
- [15] *Mischner, J.*: Zur hydraulischen Berechnung von Niederdruckleitungen für Erdgas-Wasserstoff-Gemische. Teil 1: gwf Gas + Energie 162 (2021) Nr. 3, S. 58-70
- [16] *Steiner, K.*: 20 m/s - über die Strömungsgeschwindigkeiten in der Gasinfrastruktur. ewp energie|wasser-praxis (2021) Nr. 3, S. 14-21
- [17] *Mischner, J. und Schley, P.*: System- und netzplanerische Aspekte der Wasserstoffeinspeisung in Erdgasnetze. Teil 1. gwf Gas/

- Erdgas 156 (2015) Nr. 1-2, S. 64-73; Teil 2: gwf Gas/Erdgas 156 (2015) Nr. 3-4, S. 156-163
- [18] *Mischner, J. und Fasold, H.-G.*: Gasbeschaffenheiten in Deutschland: Was zum Wobbe-Index noch gesagt werden sollte. gwf Gas + Energie 160 (2019) Nr. 5, S. 52-62
- [19] *Leicher, J.; Giese, A. und Petermann, H.* (Hrsg.): Gasqualitäten im veränderten Energiemarkt. Herausforderungen und Chancen für die häusliche, gewerbliche und industrielle Anwendung. 2. Auflage. Essen: Vulkan Verlag 2021
- [20] *Naendorf, B.; Ollesch, V.; Sagurna, K. und Tali, E.*: Betriebsgrenzenbetrachtung und Kapazitätsberechnung des Gesamtsystems von Gas-Druckregel- und Messanlagen (Gas- und Wärme-Institut Essen e. V., Essen). Abschlussbericht (Studie im Auftrag des DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e. V.; DVGW-Förderkennzeichen G 4-01-14). Bonn: November 2020
- [21] *Mischner, J.; Fasold, H.-G. und Heymer, J.*: gas2energy.net: Systemplanerische Grundlagen der Gasversorgung. 2., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Deutscher Industrieverlag 2015
- [22] GasCalc: Software zur Berechnung physikalischer Erdgaskennwerte. Version 2.6.0. SmartSim GmbH, Essen; Internet: <https://www.smartsim.energy/gascal/> (28.10.2020)
- [23] *Wagner, W. und Overhoff, U.*: ThermoFluids. Interaktive Software für die Berechnung thermodynamischer Eigenschaften für mehr als 60 reine Stoffe. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag 2006
- [24] DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH: Ergebnisse der Untersuchungen zur Problematik Staub im Verbundnetz im Winterhalbjahr 1995/96. Auftraggeber: Verbundnetz Gas AG. Leipzig 1996 (Bericht lediglich auszugsweise verfügbar; unveröffentlicht)
- [25] Persönliche Mitteilung Dipl.-Chem. *U. Lubenau* (DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Leipzig): E-Mails 07.01.2021 ff.
- [26] *Meyer, H.*: Allgemeine Gesetzmäßigkeiten bei der pneumatischen Förderung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Fakultät für Allgemeine Wissenschaften. Dissertation. Aachen 1959
- [27] *Ostertag, K.*: Anwendung des Mischungswegansatzes auf die turbulente Bewegung von Luft-Korn-Gemischen bei der pneumatischen Förderung. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Fakultät für Allgemeine Wissenschaften. Dissertation. Aachen 1961
- [28] *Hackeschmidt, M.*: Grundlagen der Strömungstechnik. Band 1: Einführung. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1969
- [29] *Vollheim, R.*: Pneumatischer Transport. Beitrag zur Theorie und Anwendung feststoffbeladener Gasströmungen. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1971
- [30] *Selig, H.-J.*: Technik der pneumatischen Förder- und Mischverfahren (Band 3: Buchreihe „verfahrenstechnik“. Hrsg.: Krauskopf, O. K.). Mainz: Krauskopf-Verlag 1972
- [31] *Molerus, O.*: Fluid-Feststoff-Strömungen. Strömungsverhalten feststoffbeladener Fluide und kohäsiver Schüttgüter. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag 1982
- [32] *Pajer, G.; Kuhnt, H. und Kurth, F.*: Stetigförderer (Buchreihe Fördererntechnik, Hrsg.: Kurth, F.). 5., stark bearbeitete Auflage. Berlin: VEB Verlag Technik 1988
- [33] *Buhrke, H.; Kecke, H. J. und Richter, H.*: Strömungsförderer. Hydraulischer und pneumatischer Transport in Rohrleitungen. Braunschweig; Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn 1989 bzw. Berlin: VEB Verlag Technik 1989
- [34] *Siegel, W.*: Pneumatische Förderung. Grundlagen, Auslegung, Anlagenbau, Betrieb. Würzburg: Vogel Buchverlag 1991
- [35] *Hilgraf, P.*: Pneumatische Förderung. Grundlagen, Auslegung und Betrieb von Anlagen. Berlin: Springer Vieweg 2019
- [36] *Kutateladze, S.S. und Styrikovič, M.A.*: Gidrodinamika gažoschidkostnych sistem. lžd. 2-e, pereg. i dop. (Hydrodynamik von Gas-Flüssigkeitssystemen. 2., überarbeitete und ergänzte Auflage). Moskva: Energija 1976
- [37] *Kutateladze, S.S. und Nakorjakov, V.Je.*: Teplomassoobmen i volny v gažoschidkostnych sistem (Wärme- und Stoffübertragung und Wellen in Gas-Flüssigkeits-Systemen). Novosibirsk: Nauka, Sibirskoje otdelenije 1984
- [38] *Kutateladze, S.S. und Sorokin, Ju.L.*: O gidrodinamičeskoj ustojčivosti nekotorych gažoschidkostnych sistem (Über die hydraulische Stabilität einiger Gas-Flüssigkeits-Systeme). In: Kutateladze, S.S.: lžbrannyje trudy. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoje otdelenije 1989, S. 125-133
- [39] *Kutateladze, S.S. und Sorokin, Yu.L.*: The Hydrodynamic Stability of Vapour-Liquid-Systems. In: Kutateladze, S.S. (Editor): Problems of Heat Transfer and Hydraulics of Two-Phase Media. Oxford; London; Edinburgh; New York; Toronto; Sydney; Paris; Braunschweig: Pergamon Press 1969
- [40] *Vargaftik, N.B.; Vinogradov, Y.K. und Yargin, V.S.*: Handbook of Physical Properties of Liquids and Gases. Pure Substances and Mixtures. 3rd Augmented and Revised Edition. New York; Wallingford, U.K.: begell house 1996
- [41] VDI-Wärmeatlas (Hrsg.: Stephan, P.; Kabelac, St.; Kind, M.; Meses, D.; Schaber, K. und Wetzel, Th.; Fachlicher Träger: VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen) 12. Auflage. Berlin; Heidelberg: Springer Vieweg 2019
- [42] *Newton, I.*: Mathematische Prinzipien der Naturlehre. Mit Bemerkungen und Erläuterungen. Herausgegeben von J. Ph. Wolfers. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft 1963⁵
- [43] *Prandtl, L. und Betz, A.* (Hg.): Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen. III. Lieferung (Band 6, Reihe „Göttinger Klassiker der Strömungsmechanik“). Göttingen: Universitätsverlag Göttingen 2009
- [44] *Prandtl, L. und Betz, A.* (Hg.): Ergebnisse der Aerodynamischen Versuchsanstalt Göttingen. IV. Lieferung (Band 7, Reihe „Göttinger Klassiker der Strömungsmechanik“). Göttingen: Universitätsverlag Göttingen 2009
- [45] *Prandtl, L.*: Abriß der Strömungslehre. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn 1931
- [46] *Prandtl, L.; Oswatitsch, K. und Wieghardt, K.*: Führer durch die Strömungslehre. 9., verbesserte und erweiterte Auflage. Braunschweig: Vieweg 1993
- [47] *Eck, B.*: Technische Strömungslehre. Fünfte Auflage. Berlin; Göttingen; Heidelberg: Springer-Verlag 1957
- [48] *Richter, H.*: Rohrhydraulik. Ein Handbuch zur praktischen Strömungsberechnung. 5., neubearbeitete Auflage. Berlin; Heidelberg; New York: Springer-Verlag 1971

⁵ Der Verfasser konnte der Versuchung nicht widerstehen, wenigstens einmal im akademischen Leben einen der bedeutendsten Wissenschaftler der Neuzeit in einem Fachbeitrag sachbezogen zu zitieren, wozu man in den angewandten Ingenieurwissenschaften eher selten die Gelegenheit hat.

- [49] *Zoebel, H. und Kruschik, J.*: Strömung durch Rohre und Ventile. Tabellen und Berechnungsverfahren zur Dimensionierung von Rohrleitungssystemen. Zweite, neubearbeitete Auflage. Wien; New York: Springer Verlag 1982
- [50] *Albring, W.*: Angewandte Strömungslehre. 6., bearb. Auflage. Berlin: Akademie-Verlag 1990
- [51] *Hackeschmidt, M.*: Grundlagen der Strömungstechnik. Band II: Felder. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1970
- [52] *Hackeschmidt, M.*: Strömungstechnik. Ähnlichkeit-Analogie-Modell. Wissenschaftliche Grundlagen des Experimentierens. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1972
- [53] *Wagner, W.*: Strömung und Druckverlust. 7. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag 2012
- [54] *Sigloch, H.*: Technische Fluidmechanik. 10., aktualisierte Auflage. Berlin; Heidelberg: Springer 2017
- [55] *Kalide, W.*: Einführung in die Technische Strömungslehre. 7., durchgesehene Auflage. München; Wien: Carl Hanser Verlag 1990
- [56] *Bohl, W. und Elmendorf, W.*: Technische Strömungslehre. 13., überarbeitete und erweiterte Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag 2005
- [57] *Jogwisch, A. und Jogwisch, M.*: Technische Strömungsmechanik für Studium und Praxis. 2. Auflage. München: Oldenbourg Industrieverlag 2009
- [58] *v. Böckh, P. und Saumweber, Ch.*: Fluidmechanik. Einführendes Lehrbuch. 3., bearbeitete und ergänzte Auflage. Berlin; Heidelberg: Springer Vieweg 2013
- [59] *Glück, B.*: Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung. Druckverluste (Bausteine der Heizungstechnik. Berechnung und Software). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1988
- [60] *Menon, E.S.*: Gas Pipeline Hydraulics. Boca Raton; London; New York; Singapore: CRC Press/Taylor & Francis Group 2005
- [61] *Mohitpour, M.; Botros, K.K. und Van Hardeveld, T.*: Pipeline Design and Construction: A Practical Approach. 3rd Edition. New York: ASME Press 2007
- [62] *Menon, E.S.*: Pipeline Planning and Construction Field Manual. Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sidney; Tokyo: Gulf Professional Publishing 2011
- [63] *Mokhatab, S. und Poe, W.A.*: Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. Second Edition. Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sidney; Tokyo: Gulf Professional Publishing 2012
- [64] *Menon, E.S.*: Transmission Pipeline Calculation and Simulation Manual. Amsterdam; Boston; Heidelberg; London; New York; Oxford; Paris; San Diego; San Francisco; Singapore; Sidney; Tokyo: Gulf Professional Publishing 2015
- [65] *Toghraei, M.*: Origin of Erosional Velocity Formula in Pipes Rev. 1. Internet: <https://pdf4pro.com/amp/view/origin-of-erosional-velocity-formula-engedu-ca-53cf85.html> (25.01.2021)
- [66] *Chodanowitsch, I.Je. und Odischarija, G.E.*: Analiž žavisimosti dlja koefizienta gidravličeskogo soprotivlenija (Analyse der Abhängigkeit des Rohrreibungskoeffizienten). Gažovaja Promyšlennost' 9 (1964) Nr. 11, S. 38-42
- [67] *Mischner, J. und Novgorodskij, Je.Je.*: Zur Ermittlung der Rohrreibungszahl. gwf Gas/Erdgas 141 (2000) Nr. 8, S. 532-539.
- [68] *Mischner, J.*: Zur Berechnung des Druckverlaufs in Gasrohrleitungen. gwf Gas/Erdgas 150 (2009) Nr. 5, S. 266-277
- [69] *Mischner, J.*: Notizen zur hydraulischen Berechnung von Gasleitungen. gwf Gas/Erdgas 153 (2012) Nr. 4, S. 258-272
- [70] DVGW-GW 303-1: Berechnung von Gas- und Wasserrohrnetzen - Teil 1: Hydraulische Grundlagen, Netzmodellierung und Berechnung. Oktober 2006
- [71] *Madani Sania, F.; Huizingab, S.; Esaklulc, K.A. und Nesica, S.*: Review of the API RP 14E erosional velocity equation: Origin, applications, misuses, limitations and alternatives. Wear 426–427 (2019) 620–636
- [72] *Arabnejad, H.; Shirazi, S.A.; McLaury, B.S. und Shadley, J.R.*: A Guideline to Calculate Erosional Velocity due to Liquid Droplets for Oil and Gas Industry. SPE Annual Technical Conference and Exhibition held in Amsterdam, The Netherlands, 27–29 October 2014; SPE-170951-MS
- [73] *Sadler, D.; Cargill, A.; Crowther, M.; Rennie, A.; Watt, J.; Burton, St.; Haines, M. et al.*: h21 Leeds City Gate. : Projektbericht 2018; H21-Leeds-City-Gate-Report.pdf: <https://www.h21.green/projects/h21-leeds-city-gate/> (25.01.2021)
- [74] *Amann, D.*: Die beste Idee kommt in der Badewanne. Woher nehmen Schriftsteller eigentlich ihre Einfälle? Die Antwort erstaunt - und ist zugleich fast banal. NZZ Neue Zürcher Zeitung (Internationale Ausgabe) 242. Jg., Nr. 30, Samstag, 6. Februar 2021, S. 21

Formelzeichen, Indizes

Formelzeichen

C	Konstante
d	Durchmesser, relative Dichte
D	Durchmesser, Konstante
DP	Auslegungsdruck
DV	Auslegungsgeschwindigkeit
k	Rohrrauigkeit
K	Kompressibilitätszahl
L	Länge
M	molare Masse
MOP	Maximal zulässiger Betriebsdruck
MOV	Maximal zulässige Betriebsgeschwindigkeit
OP	Betriebsdruck
OV	Betriebsgeschwindigkeit
p	Druck
q	Mengenstrom
r	Raumanteil
T	Temperatur in K
t	Temperatur in °C
\dot{V}	Volumenstrom
w	Strömungsgeschwindigkeit
Z	Realgasfaktor
λ	Rohrreibungszahl
η	(dynamische) Viskosität
ρ	Dichte
σ	Oberflächenspannung

τ Schubspannung
 Δ Differenz

pu Pickup
 R Rohr-
 u upstream
 W Wand-
 zul. zulässig

Indizes

1 Leitungsanfang
 2 Leitungsende
 A Ausgang
 Aufw. Aufwirbelung
 d downstream
 E Eingang
 EG Erdgas
 EG/H₂ Erdgas-Wasserstoff-Gemisch
 G Gas
 H₂ Wasserstoff
 Grenz. Grenz-
 i integrale
 krit. kritisch
 L Flüssigkeit, Liquid
 max. Maximalwert
 n Normzustand
 P Partikel

Autor



Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. **Jens Mischner** VDI
 Fachhochschule Erfurt |
 Fakultät Gebäudetechnik und Informatik |
 Fachrichtung Gebäude- und Energietechnik |
 Erfurt |
 Tel.: +49 (0) 361 - 6700357 |
 mischner@fh-erfurt.de

**GEDRUCKT. DIGITAL. LIVE.
 FACHWISSEN MIT MEHRWERT.**



GEHÖREN SIE SCHON DAZU?

Als Abonnent
 kostenlos registrieren.

**Freier Zugang zum
 Online-Archiv mit allen
 Ausgaben ab 2008.**

VULKAN VERLAG. FÜR ALLE, DIE MEHR WISSEN WOLLEN.

Mit Ihrem All-in-one-Abo lesen Sie flexibel:
 Print oder digital, online oder offline. Jederzeit und überall.

Registrieren Sie sich jetzt und nutzen Sie alle Optionen.

Einfach mit Ihrer persönlichen Abnummer unter abo.vulkan-verlag.de freischalten.