
Bedienanleitung für das Rechenprogramm "Druckverlust_Rohr"

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd Glück, Februar 2013, Version Oktober 2019

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	2
1 Allgemeine Hinweise zum Rechenprogramm	2
1.1 Laden und Start des Rechenprogramms	2
1.2 Bearbeitung des Programmlistings	3
1.3 Beispielabarbeitung	3
2 Eingaben für die zu berechnende Rohrleitung	4
<i>Festlegung des Durchflussmediums und dessen Kenngrößen</i>	4
<i>Fundamentale Teilstreckendaten: $imax$, Massestromregime</i>	5
<i>Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen</i>	5
<i>Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an/von Umgebung</i>	6
3 Anzeige der berechneten Ergebnisse	7
4 Arbeitsweise des Algorithmus	8
5 Beispiel_1: Druckverlustberechnung für inkompressible Flüssigkeit (allgemein)	10
6 Beispiel_2: Druckverlustberechnung für Wasser bei Wärmeaustausch mit der Umgebung	14
7 Beispiel_3: Druckverlustberechnung für Luft	18
8 Beispiel_4: Druckverlustberechnung für Wasserdampf	22
Literaturverzeichnis	27
Anhang	28
A 1. Hauptsatz für stoffdichte Systeme	28
B 1. Hauptsatz für stoffdurchlässige (offene) Systeme mit stationärem Durchfluss	29
C Anwendung auf Stromröhren	30
C1 Eindimensionale Theorie	31
C2 Verbesserte eindimensionale Theorie	32
D Praktische Berechnungsvorschläge für Rohrströmungen	32

Wichtige Hinweise:

Alle in diesem Bericht und dem zugehörigen Rechenprogramm enthaltenen Angaben, Daten, Berechnungsverfahren usw. wurden vom Autor mit bestem Wissen erstellt und sorgfältig geprüft. Dennoch sind inhaltliche Fehler nicht vollständig auszuschließen, deshalb erfolgen alle Angaben usw. ohne jegliche Verpflichtung und Garantie des Autors. Er übernimmt keinerlei Verantwortung und Haftung für etwaige inhaltliche Unrichtigkeiten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Autors unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen und Einspeicherung sowie Verarbeitung in elektronischen Systemen, die über die Eigennutzung hinausgehen, sowie für Übersetzungen und Mikroverfilmungen.

Das vorgestellte Berechnungsmodell ist als Testfassung zu verstehen. Alle Interessierten sind eingeladen, an der Weiterentwicklung mitzuwirken.

Viel Erfolg bei der Anwendung!

Vorbemerkung

Die Grundlagen der Druckverlustberechnung in einer Rohrleitung

- für inkompressible Fluide (Flüssigkeiten)
- für kompressible Fluide (Gase und Wasserdampf)

und zugehörige Beispiele sind Bestandteil des Buches "Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung – Druckverluste" [1], das kostenlos downloadbar ist. Im Buch werden die thermodynamischen Grundgleichungen als bekannt vorausgesetzt. Wegen Rückfragen interessierter Leser sind die speziellen Zusammenhänge im [Anhang](#) der vorliegenden Bedienanleitung ausführlich abgeleitet und die unterschiedlichen Abstraktionsstufen dargelegt.

1 Allgemeine Hinweise zum Rechenprogramm

Das Rechenprogramm wurde in der Programmierumgebung [MICROSOFT Visual Basic 2010 Express](#) unter [WINDOWS 10](#) entwickelt. Erfolgt die Programmabarbeitung in der Programmierumgebung, sind mögliche Fehlbedienungen und/oder noch vorhandene Programmfehler durch Nutzung des Debuggers relativ leicht auffindbar.

Auf jegliche Spezialsoftware, die einige wesentliche Programmiererleichterungen – beispielsweise bei der Erzeugung von Ausgabetabellen – bewirkt hätten, wurde bewusst verzichtet. Es werden lediglich Verbindungen zu MICROSOFT WORD hergestellt.

Allgemeine Hinweise zur Installation und Handhabung meiner Programme sind [hier](#) zu finden. Die Anzeigen sind optimal bei einer Bildschirmauflösung von 1920×1080 und einer Skalierung der Hauptanzeige von 100 % oder maximal 125 %.

1.1 Laden und Start des Rechenprogramms

Die komprimierte Datei "[Druckverlust.zip](#)" ist in ein eigenes Verzeichnis (Ordner) auf die Festplatte zu kopieren und zu entpacken. Im genannten Ordner befinden sich:

- [Druckverlust_Rohr](#) (Rechenprogramm)
- [Beispiel_1](#) (Flüssigkeitsleitung mit vorgegebenen Stoffwerten)
- [Beispiel_2](#) (Wasserleitung)
- [Beispiel_3](#) (Luftleitung)
- [Beispiel_4](#) (Wasserdampfleitung)

Die Programmabarbeitung kann generell auf zweierlei Weise erfolgen.

I. Beispielhafte Abarbeitung ohne Entwicklungsumgebung:

Ordner " Druckverlust_Rohr " öffnen \Rightarrow Datei " bin " öffnen \Rightarrow " Druckverlust_Rohr.exe " Doppelklick

II. Beispielhafte Abarbeitung mit Entwicklungsumgebung:

Visual Basic 2010 Express starten ⇒ Menüleiste "Datei" ⇒ "Öffnen" ⇒ "Projekt" Einfachklick
⇒ Ordner "Druckverlust_Rohr" auswählen ⇒ "Druckverlust_Rohr.sin" Doppelklick
⇒ Menüleiste "Debuggen" Einfachklick ⇒ "Starten" Einfachklick

Zu Beginn wird in einem Fenster ein Pfad für das zu bearbeitende Beispiel angegeben. Dieser Vorschlag ist in der Regel mit dem selbst gewählten Pfad zu überschreiben! Ist das Beispiel noch nicht vorhanden, so muss der Ordner dafür **vorher** angelegt werden.

1.2 Bearbeitung des Programmlistings

Im Ordner "Druckverlust_Rohr" sind nachfolgende Quellcodes enthalten:

- Form1 für die Eingabe, Grobprüfung, Berechnung und Ausgabe
- Form 2 für die grafische Ergebnisdarstellung.

Die Formen können mit Hilfe des Projektmappen-Explorers geöffnet werden. Aus den darin enthaltenen Programmlistings sind alle inhaltlichen Details – gut strukturiert und mit zahlreichen Kommentaren versehen – ersichtlich.

1.3 Beispielabarbeitung

1. **START** drücken und Beispiel mit Pfad und Ordner eingeben.
2. Eventuell vorhandenes Beispiel **LADEN** oder Zahleneingabe gemäß Beschreibung auf der Bedienoberfläche vornehmen.
3. **EINGABE prüfen/speichern** aktivieren. Eventuell festgestellte Fehler durch veränderte oder ergänzende Eingaben beseitigen und erneut den Eingabebutton betätigen. Alle Eingabedaten können überschrieben werden.
4. **RECHNEN und SPEICHERN** drücken.
5. Eventuell **DRUCK** der Eingaben und Ergebnisse mit WORD und **ZEICHNEN** des Diagramms in der Bedienoberfläche bewirken.

Die Gestaltungen der **Bedienoberfläche**, **des Ausdrucks und der Grafik** sind den beigelegten Beispielen zu entnehmen.

2 Eingaben für die zu berechnende Rohrleitung

Die Rohrleitung kann aus maximal 10 hintereinander geschalteten Teilstrecken bestehen (Bild 2.1).

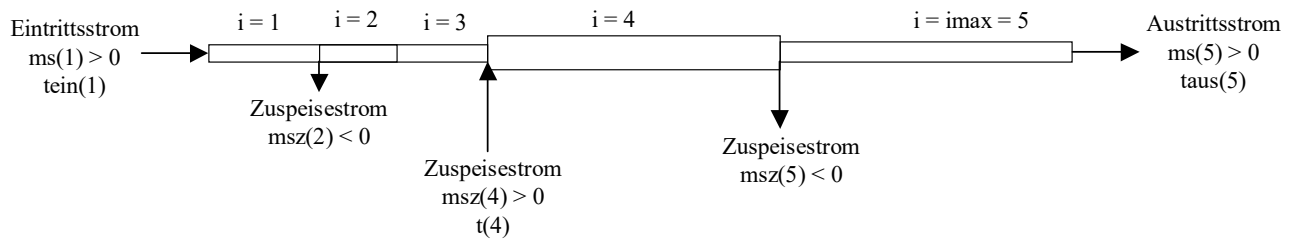


Bild 2.1 Rohrleitung mit 5 hintereinander geschalteten Teilstrecken und 3 Zuspaisungen

Im Weiteren werden die Eingabegrößen mit den programminternen Kurznamen genannt, sodass eventuelle Arbeiten im Programmlisting leichter durchführbar sind. Die bei den Eingaben verwendete Reihenfolge und die Kurznamen sind jedoch eindeutig.

Festlegung des Durchflussmediums und dessen Kenngrößen

Inkompressible Flüssigkeit (allgemein)	einfachster Berechnungsablauf ohne Ermittlung des Temperaturverlaufs längs der Rohrleitung Dichte ρ_0 und kinematische Viskosität ν_0 sind vorzugeben. Sie bleiben für alle Teilstrecken sowie Zuflüsse konstant.
Wasser *	Stoffwertapproximationen für 10 ... 200 °C
Sole Tyfocor L mit 25 % (Vol) *	Stoffwertapproximationen für -10 ... 100 °C
Sole Tyfocor L mit 40 % (Vol) *	Stoffwertapproximationen für -20 ... 100 °C
Luft *	Stoffwertapproximationen für -50 ... 200 °C
Sauerstoff *	Stoffwertapproximationen für -50 ... 500 °C
Stickstoff *	Stoffwertapproximationen für -50 ... 500 °C
Kohlendioxid *	Stoffwertapproximationen für -50 ... 500 °C
Schwefeldioxid *	Stoffwertapproximationen für -50 ... 500 °C
Argon *	Stoffwertapproximationen für 0 ... 500 °C
Wasserdampf **	Stoffwertapproximationen für $t_{\text{Sattdampf}}$... 400 °C; 1 ... 16 bar

* Stoffwerte werden programmintern innerhalb des genannten Temperaturbereiches für die mittlere Teilstreckentemperatur ohne Beachten des möglichen Druckeinflusses ermittelt, wobei der Druckeinfluss auf die betrachteten Stoffwerte in der Regel gering ist.

** Stoffwerte werden programmintern innerhalb der genannten Grenzen für die mittlere Teilstreckentemperatur und den mittleren Teilstreckendruck bestimmt.

Temperatur am Eintritt (i = 1)	°C	Bei allen Fluiden mit * oder ** erforderlich.
Druck am Eintritt (i = 1)	bar	Bei Gasen und Wasserdampf Eingabe als Absolutdruck erforderlich. Falls für Flüssigkeiten der Druckverlauf längs der Rohrleitung ebenfalls berechnet und angezeigt werden soll, ist die Druckeingabe auch bei diesen Fluiden erforderlich. Da die Drücke bei Flüssigkeiten nicht zur Stoffwertberechnung Verwendung finden, können hierbei die Drücke auch als Überdrücke verstanden werden.

Fundamentale Teilstreckendaten: imax, Massestromregime

imax		maximal zu betrachtende Teilstreckenanzahl (imax = 1 ... 10); siehe Beispiel Bild 2.1 Kennzeichnend für eine Teilstrecke sind: konstante Innen- und Außendurchmesser, Rohrrauigkeit, Umgebungstemperatur, Dämmdicken, Wärmeleitfähigkeiten, äußere Wärmeübergangskoeffizienten.
Wahl der Massestromeinheit		kg/s (programmintern: Masseinheit = 1) kg/h (programmintern: Masseinheit = 2)
ms(i = 1)	kg/s oder kg/h	Massestrom am Rohrleitungseintritt
msz(i > 1)	kg/s oder kg/h	Massestromzufluss ab Teilstrecke i = 2 (Abströmung: msz(i) < 0)
tz(i > 1)	°C	Temperatur des Zuflusses (bei Abströmung keine Eingabe) Bei allen Fluiden * und ** wird an der Zuspisestelle mittels Enthalpiebilanz aus $\text{taus}(i-1)$ und $\text{tz}(i)$ die neue Teilstreckeneintrittstemperatur $\text{tein}(i)$ bestimmt. Der Druck des Zustromes an der Einspisestelle entspricht stets $\text{paus}(i-1) = \text{pein}(i)$. Bei Wasserdampf (Fluid **) wird angenommen, dass der zuströmende Dampf trockengesättigt oder überhitzt ist. Bei inkompressibler Flüssigkeit (allgemein) ist keine Eingabe erforderlich.

Bei der weiteren Eingabe erfolgt zur Erleichterung ein **teilautomatisches Füllen** bis imax. Wenn nach einer Teilstreckeneingabe bis zur nächsten Eingabe die Teilstreckenfelder nicht gefüllt werden, obwohl es einer Eingabe bedarf, werden die fehlenden Felder mit den Werten der jeweils letzten Eingabe automatisch gefüllt. Beispiel für imax = 8:

Nutzen des vereinfachten Ausfüllens:

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen

Durchmesser da mm

Nach dem Aktivieren **EINGABE prüfen/speichern** erfolgt die automatische Datenergänzung:

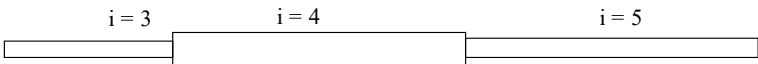
Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen

Durchmesser da mm

Die aufgefüllten Felder sind zu kontrollieren und ggf. durch Überschreiben zu korrigieren.

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen

da(i)	mm	Rohraußendurchmesser
di(i)	mm	Rohrinnendurchmesser
eps(i)	mm	Rohrrauigkeit
l(i)	m	Teilstreckenlänge
HH(i)	m	Höhe am Ende der Teilstrecke i Es handelt sich hierbei um eine Höhendifferenz zur Bezugshöhe H0.
H0	m	Höhe am Anfang der Teilstrecke i = 1 Sie stellt die Bezugshöhe für alle Höheneingaben HH(i) dar. Programmintern gilt $H0 \equiv HH(i = 0)$.
Zeta(i)	-	Summe aller Einzelwiderstandsbeiwerte in der Teilstrecke Hinweise: [1] Seiten 60, 66ff., 162, 458ff., 482. Nach Seite 61 gelten: <ul style="list-style-type: none"> Bei Verengungen (Blenden, Ventilen usw.) wird auf die Geschwindigkeit im Rohrquerschnitt bezogen. Bei Durchmesseränderungen wird der ζ-Wert stets der Rohrteilstre-

		<p>cke mit dem kleineren Durchmesser zugeordnet. (Im Bild die Erweiterung der Teilstrecke $i = 3$ und die Verkleinerung der Teilstrecke $i = 5$).</p>  <ul style="list-style-type: none"> Bei Verzweigungen oder Vereinigungen beziehen sich die ζ-Werte stets auf die abgehenden bzw. zuführenden Rohrteilstrecken und nicht auf die Hauptrohrleitung.
Kv-Wert(i)	mm ² oder m ³ /h	<p>Durchflussbeiwert (siehe [1] Seiten 61/62)</p> <p>Der 1953 von der Firma Mason-Neilan Regulator Co., Bosten eingeführte Ventilkoeffizient Cv hat sich im Bereich der Regelungstechnik mit metrischen Maßeinheiten als kv-Wert rasch durchgesetzt und fand Eingang in einschlägigen Normen als zugeschnittene Größengleichung. Er gibt den Wasserdurchfluss m³/h bei einer Dichte von 1000 kg/m³ und einer Druckdifferenz von 1 bar an.</p> <p>In der allgemeinen Strömungslehre ist er nicht gebräuchlich. Setzt man die Größen in SI-Einheiten in eine allgemeingültige Druckverlustgleichung ein, so hat der kv-Wert die Dimension einer Fläche. Physikalisch ist darunter eine korrigierte Durchströmfläche zu verstehen, die durch Strahleinschnürung, Wirbelbildung usw. kleiner als der geometrisch engste Querschnitt ist. Jedoch hat sich auch mit Einführung der SI-Einheiten diese allgemeingültige, wissenschaftlich korrekte Darstellung nicht durchgesetzt.</p> <p>Zwischen dem oben definierten kv-Wert in m³/h und dem allgemeingültigen kv-Wert in mm² gilt die Umrechnung: $kv_{mm^2} = 27,8 kv_{m^3/h}$.</p> <p>Bei der vorliegenden Eingabe sind beide Varianten möglich, wobei die Darstellungsvariante als kveinheit auszuwählen ist.</p>
Wahl der kveinheit		<p>mm² (programmintern: kveinheit = 1)</p> <p>m³/h (programmintern: kveinheit = 2)</p>

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an/von Umgebung

<p>Wenn eine wärmetechnische Berechnung erfolgen soll, ist ein Häkchen in der CheckBox zu setzen (Programmintern: Waermeberechnung = 1). Nur dann sind die folgenden Eingabegrößen zu benennen.</p> <ul style="list-style-type: none"> Bei einer inkompressiblen Flüssigkeit (allgemein) erfolgt nie eine wärmetechnische Berechnung, da ohnehin mit den Stoffwerten gemäß Eingabe gearbeitet wird. Bei anderen Flüssigkeiten werden auch konstante Stoffwerte (einschließlich der Dichte) längs der Teilstrecke angenommen. Ihre Ermittlung erfolgt programmintern bezogen auf die mittlere Teilstreckentemperatur, die iterativ bestimmt wird. Bei nahezu gleicher Temperatur von Flüssigkeit und Umgebung und/oder adiabater Dämmung der Rohrleitung kann die wärmetechnische Berechnung ohne Genauigkeitsverlust unterbleiben. Bei gas- und dampfförmigen Fluiden wird außer den mittleren Stoffwerten die Änderung der Dichte und somit die Änderung der kinetischen Energie längs der Teilstrecken direkt beachtet, weshalb aus Genauigkeitsgründen die wärmetechnische Berechnung stets durchzuführen ist. 		
tU(i)	°C	Umgebungstemperatur der Teilstrecke
lamR(i)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand
dD1(i)	mm	Dicke einer ersten Dämmschicht um das Rohr
lamD1(i)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der ersten Dämmschicht
dD2(i)	mm	Dicke einer zweiten Dämmschicht um das Rohr
lamD2(i)	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit der zweiten Dämmschicht

alphaa(i)	W/(m²K)	Wärmeübergangskoeffizient von der Dämmschichtoberfläche zur Umgebung
-----------	---------	--

3 Anzeige der berechneten Ergebnisse

Wiederum werden die programminternen Kurznamen für die Teilstreckenergebnisse in vorgegebener Reihenfolge verwendet.

ms(i)	kg/s oder kg/h	Massestrom in der Rohrteilstrecke
tein(i)	°C	Eintrittstemperatur in die Teilstrecke
taus(i)	°C	Austrittstemperatur aus der Teilstrecke
pein(i)	bar	Eintrittsdruck in die Teilstrecke
paus(i)	bar	Austrittsdruck aus der Teilstrecke
DP(i)	Pa	Druckänderung in der Teilstrecke $DP(i) = paus(i) - pein(i)$ und Anzeige der Summe aller Druckänderungen in der Rohrleitung
Q(i)	W	Wärmestrom längs der Teilstrecke vom Fluid an die Umgebung
mK(i)	kg/s oder kg/h	Kondensatstrom (Kondensatanfall in der Teilstrecke) bei dem Fluid Wasserdampf
w	m/s	mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Weiterhin können die Eingaben und die berechneten Ergebnisse durch Aktivieren von **DRUCKEN** als WORD-Dokument gedruckt werden.

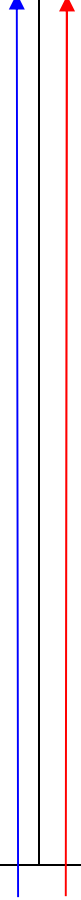
Mit **ZEICHNEN** gelangt man in ein neu geöffnetes Fenster in dem interessierende Parameter längs der Rohrleitung darstellbar sind.

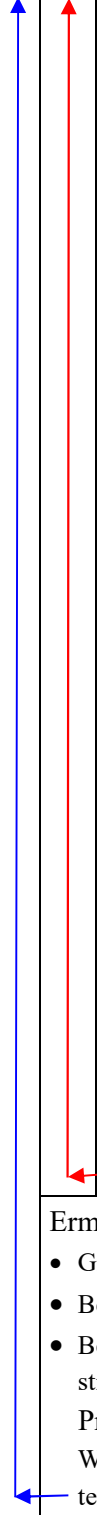
4 Arbeitsweise des Algorithmus

Der Grobablaufplan soll nachfolgend das grundlegende Arbeitsprinzip des Algorithmus verdeutlichen, aber auch die vom Medium und der Eingabesteuerung bedingten Ablaufänderungen übersichtlich zeigen.

Die Teilstrecken werden von $i = 1$ bis i_{\max} im Berechnungskern in stets gleicher Weise abgearbeitet, weshalb im Weiteren nur eine Teilstreckenbetrachtung zum Verständnis erforderlich ist. Weiterhin werden die Berechnungsgleichungen nicht im Einzelnen wiedergegeben, sondern die Literaturbezüge angegeben. Dies erscheint sinnvoll, da dort weiterführende Erklärungen abgegeben werden, die der Leser je nach Kenntnisstand vertiefen kann.

Alle weiteren Details sind aus dem Programmlisting zu entnehmen.

Formale Fixierung der Teilstreckenaustrittsdaten (werden je nach Programmablauf später überschrieben): $p_{\text{aus}}(i) = p_{\text{ein}}(i)$ in bar; $t_{\text{aus}}(i) = t_{\text{ein}}(i)$ in °C Für die interne Betrachtung der Teilstrecke i gilt am Eintritt: $m(i)$ Massestrom in der Teilstrecke in kg/s $P1 = p_{\text{ein}}(i) \cdot 10^5$ (Druckberechnung in Pa); $t1 = t_{\text{ein}}(i)$ (Temperaturberechnung in °C) Annahmen zum Beginn der Iteration: $\text{Itera} = 0$ (Iterationszähler) $P2 = P1 \cdot 0,95$ (1. Schätzung des Austrittsdruckes) $t2 = t1$ (1. Schätzung der Austrittstemperatur); $t_m = t1$ (1. Schätzung der mittleren Teilstreckentemperatur)	
Beginn der Iteration (Anpassung der Größen: $P2$ und t_m)	
	Differenzierte Ermittlung der Stoff- und Zustandswerte: ρ Dichte; v spez. Volumen; η dynamische Viskosität; ν kinematische Viskosität; λ Wärmeleitfähigkeit; c spez. Wärmekapazität; Pr Prandtlzahl (Appendix m bedeutet Teilstreckenmittelwert; 1 Eintritt der Teilstrecke; 2 Austritt der Teilstrecke) <ul style="list-style-type: none"> Bei inkompressibler Flüssigkeit (allgemein) werden nur die Eingabedaten verwendet: $\nu_m = 1/\rho_{m0}$; $\nu_m = \eta_{m0}$ Bei Flüssigkeiten Wasser und Sole Berechnung nach [2, 3] in Funktion von t_m (Einfluss des Druckes wird vernachlässigt): ρ_m; $\nu_m = 1/\rho_m$; η_m; λ_m; c_m; Pr_m Bei Gasen z. B. Luft Berechnung als ideales Gas nach [4] in Funktion von t_m (Einfluss des Druckes im Bereich 1 bar ... 10 bar wird vernachlässigt): η_m; c_m; λ_m; $Pr_m = \eta_m \cdot c_m / \lambda_m$ Berechnung von $\nu_1 = f(P1, t1)$ und $\nu_2 = f(P2, t2)$ Berechnung von $P_m = f(P1, P2/P1)$ nach [1, Gl. (7.44)]; bei $P2/P1 = 1$ Grenzwertbildung Berechnung von $\nu_m = f(\nu_1, \nu_2, P2/P1)$ nach [1, Gl. (7.31)]; bei $P2/P1 = 1$ Grenzwertbildung Berechnung von $\nu_m = \eta_m \cdot \nu_m$ (somit erfolgte indirekte Berücksichtigung des Druckes) Bei Wasserdampf Berechnung nach [2] getrennt für Sattdampf und Heißdampf (Differenzierung erfolgt mittels Dampfdruckkurve: z. B. $t_{\text{Sattdampf}} = f(P1)$, wenn $t_{\text{Sattdampf}} < t1$ dann Heißdampf) $\nu_1 = f(P1, t1)$; $h_1 = f(P1, t1)$; $\nu_2 = f(P2, t2)$ Berechnung von $P_m = f(P1, P2/P1)$ nach [1, Gl. (7.44)]; bei $P2/P1 = 1$ Grenzwertbildung Berechnung von $\nu_m = f(\nu_1, \nu_2, P2/P1)$ nach [1, Gl. (7.31)]; bei $P2/P1 = 1$ Grenzwertbildung Berechnung für Satt- bzw. Heißdampf von η_m; $\nu_m = \eta_m \cdot \nu_m$; c_m; λ_m; $Pr_m = \eta_m \cdot c_m / \lambda_m$
Berechnung der mittleren Geschwindigkeit w_m und der zugehörigen Reynoldszahl Re	

	<p>Bei gewünschter wärmetechnischer Berechnung (Waermeberechnung =1) erfolgen:</p> <ul style="list-style-type: none"> Ermittlung des fluidseitigen Wärmeübergangskoeffizienten α_F nach [5 bzw. 3, Seite 36ff.] und des Wärmedurchgangskoeffizienten bezogen auf die Rohrrinnenfläche k_i nach [5, Gl. (5.20)] Bei Itera = 1 erfolgen für Wasser, Sole, Gase und Wasserdampf als 1. Näherung die Berechnung der Austrittstemperatur t_2 nach [5, Gl. (7.39)], der neuen mittleren Teilstreckentemperatur tm_neu nach [5, Gl. (7.40)] und daraus der Wärmestrom vom Fluid an die Umgebung $Q(i)$. Bei Itera > 1 (weitere Iterationsschritte) wird der Wärmestrom $Q(i)$ mit tm bestimmt. tm ist hierbei das Ergebnis, welches am Ende des vorangegangenen Iterationsschrittes berechnet wurde. <p>Druckverlustberechnung nach Algorithmus [1]</p> <ul style="list-style-type: none"> Ermittlung des Rohrreibungsbeiwertes nach [1, Bild 3.1] und des Korrekturfaktors KE nach [1, Gln. (1.13) und (1.25) unter Verwenden der Gl. (1.21)] (vereinfachend wird nur ein mittleres KE beachtet!) Berechnung des Staudruckes für Flüssigkeiten nach [1, Gl. (3.2)] oder für Gase und Wasserdampf nach [1, Gl. (7.41)] Bestimmung des Druckverlustes DPR durch Rohrreibung und Einzelwiderstände <p>Berechnung der Austrittstemperatur t_2 und der mittleren Fluidtemperatur tm_neu</p> <ul style="list-style-type: none"> Für die inkompressible Flüssigkeit (allgemein) entfällt die Berechnung der Temperaturen t_2 sowie tm. Für Flüssigkeiten (Wasser und Sole) erfolgt die Berechnung von t_2 für eine konstante Teilstreckendichte, d. h. ohne Beachten der Änderung der kinetischen Energie innerhalb der Teilstrecke. Für Gase folgt die Austrittstemperatur t_2 nach Anhang dieses Berichtes aus Gl. (A16), wobei vereinfachend $h_1 = c_m \cdot t_1$ sowie $h_2 = c_m \cdot t_2$ gesetzt wird. Für Wasserdampf ergibt sich h_2 nach Anhang dieses Berichtes aus Gl. (A16). Die Ermittlung der Dampfaustrittstemperatur erfolgt in einer separaten Iterationsschleife, wobei zwischen Satt- und Heißdampf unterschieden wird. Bei einer Zustandsänderung ins bzw. im Sattedampfgebiet wird zusätzlich der anfallende Kondensatmassenstrom $mK(i)$ berechnet. Für t_1 und die neu ermittelte Austrittstemperatur t_2 wird die neue, mittlere logarithmische Teilstreckentemperatur tm_neu unter Beachtung möglicher Grenzwerte bestimmt. <p>Prüfung zur Temperaturiteration bezüglich tm</p> <p>Wenn $tm - tm_neu > 0,1 \text{ K}$, dann Rücksprung und erneute Iteration z. B. mit $tm = (tm + tm_neu)/2$</p> <p>Ermittlung des Austrittsdruckes P_2</p> <ul style="list-style-type: none"> Grundlage bildet nach Anhang dieses Berichtes die Gl. (A17). Bei Flüssigkeiten erfolgt die Berechnung des Austrittsdruckes P_2 iterationsfrei nach Gl. (A19). Bei kompressiblen Fluiden (Gase und Wasserdampf) ist der Austrittsdruck P_2_neu nach Gl. (A32) zu bestimmen. <p>Prüfung zur Druckiteration</p> <p>Wenn $P_2_neu - P_2 > 10 \text{ Pa}$, dann Rücksprung und erneute Iteration mit einem gemäß regula falsi bestimmten P_2.</p> <p>Umspeichern bzw. Ermittlung der Größen: $w(i) = w_m$; $taus(i) = t_2$; $tein(i+1) = taus(i)$; $paus(i) = P_2 \cdot 10^{-5}$ (Umrechnung in bar); $pein(i+1) = paus(i)$; Gesamtdruckänderung der bisher untersuchten Teilstrecken $DP(11)$ in Pa; bei Wasserdampf Bestimmung des eventuell reduzierten Massesstromes $m(i+1)$ infolge Kondensatausfall $mK(i)$</p> <p>Korrektur der neuen Teilstreckeneintrittstemperatur bei Massestromzufluss:</p> <ul style="list-style-type: none"> Bei inkompressibler Flüssigkeit (allgemein) keine Aktion, da vorgegebene Stoffwerte stets gelten. Bei Wasser, Sole oder Gasen Bestimmung der Mischtemperatur in zwei Stufen <ul style="list-style-type: none"> Bestimmung der Mischtemperatur bei Annahme gleicher spez. Wärmekapazitäten Bestimmung der Mischtemperatur bei Beachten der zu den Temperaturen gehörigen spez. Wärmekapazitäten Bei Wasserdampf Ermittlung der Enthalpie am Eintritt der Teilstrecke $i+1$ und iterative Bestimmung der zugehörigen Dampftemperatur, wobei zwischen Heiß- und Sattedampf unterschieden wird.
--	--

5 Beispiel_1: Druckverlustberechnung für inkompressible Flüssigkeit (allgemein)

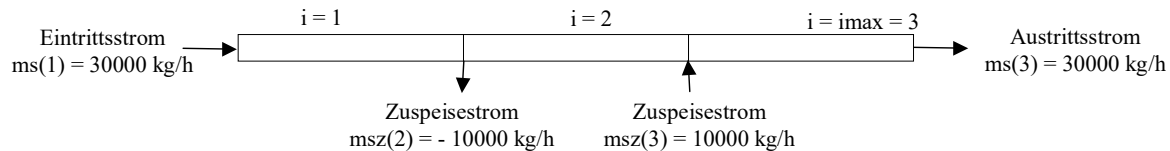


Bild 5.1 Rohrleitung mit drei Teilstrecken konstanten Durchmessers

Druckverlustberechnung für eine Rohrströmung (Flüssigkeit, ideales Gas, Wasserdampf)

Festlegung des Durchflussmediums (Fluids) und dessen Kenngrößen
☐ Wasser ☐ Sole TL 25 ☐ Sole TL 40 ☐ Luft ☐ Sauerstoff ☐ Schwefeldioxid ☐ Stickstoff ☐ Kohlendioxid ☐ Argon ☐ Wasserdampf ☒ Inkompressible Flüssigkeit (allgemein)*

Temperatur am Eintritt (i = 1) °C Druck am Eintritt (i = 1) *** 5 bar rho_0 1000 kg/m³ ny_0 1,308 10⁻⁶ m/s

Teilstrecke i: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 imax = 3

Massestrom am Eintritt (i = 1) und Zuflüsse (Abflüsse mit Minuszeichen eingeben) zu Beginn einer Teilstrecke (i > 1)

Temperatur des Zuflusses

Bei den Zuflüssen > 0 gelten die Annahmen:

- Der Druck des Zuflusses ist so geregelt, dass er dem Druck des Hauptstromes an der Zuflussstelle entspricht.
- Die Temperatur des Zuflusses wird bei der Enthalpiebilanz berücksichtigt und daraus eine neue Teilstreckeneintrittstemperatur gebildet.
- Bei Wasserdampf wird von trockengesättigtem oder überhitztem Dampf ausgegangen.
- Bei Flüssigkeit (allgemein) gilt die eingetragene Dichte für das gesamte System. Eine Temperatureingabe ist nicht erforderlich.

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	imax = 3
Durchmesser da	139,7	139,7	139,7								
Durchmesser di	131,7	131,7	131,7								
Rauigkeit eps	0,045	0,045	0,045								
Länge l	100	100	100								
Höhe (i-Ende)	0	10	0								
Zeta-Wert	5		5								
Kv-Wert		100									

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an/von Umgebung ☐ Ja, wärmetechnische Berechnung durchführen!

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	imax = 3
Temperatur tU											
Lambda Rohr											
Dicke Dämm1											
Lambda Dämm1											
Dicke Dämm2											
Lambda Dämm2											
Alpha außen											

Ergebnisse

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	imax = 3
Massestrom	30000	20000	30000								
tein											
taus											
pein	5,000										
paus											
Druckänderung											
Wärmestrom											
Kondensatstrom											
Geschwindigkeit											

START LADEN EINGABE prüfen/speichern

RECHNEN + SPEICHERN DRUCKEN ZEICHNEN ENDE

Erst EINGABE prüfen/speichern!

Bild 5.2 Eingaben

Druckverlustberechnung für eine Rohrströmung (Flüssigkeit, ideales Gas, Wasserdampf)

Festlegung des Durchflussmediums (Fluids) und dessen Kenngrößen
☐ Wasser ☐ Sole TL 25 ☐ Sole TL 40 ☐ Luft ☐ Sauerstoff ☐ Schwefeldioxid ☐ Stickstoff ☐ Kohlendioxid ☐ Argon ☐ Wasserdampf ☒ Inkompressible Flüssigkeit (allgemein)*

Temperatur am Eintritt (i = 1) °C Druck am Eintritt (i = 1) *** 5 bar rho_0 1000 kg/m³ ny_0 1,308 10⁻⁶ m/s

Teilstrecke i: 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 imax = 3

Massestrom am Eintritt (i = 1) und Zuflüsse (Abflüsse mit Minuszeichen eingeben) zu Beginn einer Teilstrecke (i > 1)

Temperatur des Zuflusses

Bei den Zuflüssen > 0 gelten die Annahmen:

- Der Druck des Zuflusses ist so geregelt, dass er dem Druck des Hauptstromes an der Zuflussstelle entspricht.
- Die Temperatur des Zuflusses wird bei der Enthalpiebilanz berücksichtigt und daraus eine neue Teilstreckeneintrittstemperatur gebildet.
- Bei Wasserdampf wird von trockengesättigtem oder überhitztem Dampf ausgegangen.
- Bei Flüssigkeit (allgemein) gilt die eingetragene Dichte für das gesamte System. Eine Temperatureingabe ist nicht erforderlich.

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	imax = 3
Durchmesser da	139,7	139,7	139,7								
Durchmesser di	131,7	131,7	131,7								
Rauigkeit eps	0,045	0,045	0,045								
Länge l	100	100	100								
Höhe (i-Ende)	0	10	0								
Zeta-Wert	5		5								
Kv-Wert		100									

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an/von Umgebung ☐ Ja, wärmetechnische Berechnung durchführen!

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	imax = 3
Temperatur tU											
Lambda Rohr											
Dicke Dämm1											
Lambda Dämm1											
Dicke Dämm2											
Lambda Dämm2											
Alpha außen											

Ergebnisse

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	imax = 3
Massestrom	30000	20000	30000								
tein											
taus											
pein	5,000	4,960	3,925								
paus	4,960	3,925	4,867								
Druckänderung	-3955	-103539	94145								
Wärmestrom											
Kondensatstrom											
Geschwindigkeit	0,61	0,41	0,61								

START LADEN EINGABE prüfen/speichern

RECHNEN + SPEICHERN DRUCKEN ZEICHNEN ENDE

Erst EINGABE prüfen/speichern!

Bild 5.3 Eingaben und Ergebnisse der Berechnung

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\DRUCKVERLUSTE\BEISPIEL_1\

Druckverluste einer Rohrströmung: Inkompressible Flüssigkeit (allgemein)

Eintrittsparameter des Mediums:

Druck $p_{\text{ein}(1)}$ 5,000 barDichte $\rho_{0\ 1000,00}$ kg/m³ kinematische Viskosität $\nu_{y\ 0}$ 1,308 10⁻⁶ m²/s

Die Rohrleitung besitzt 3 hintereinander liegende Teilstrecken.

Massestrom m_s am Eintritt $i=1$ und Massestromzuflüsse m_{sz} an den Eintritten $i=2$ bis $i=10$:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_s/m_{sz} kg/h	30000	-10000	10000							

für $i=1$: m_s Massestrom am Rohrleitungseintrittfür $i>1$: m_{sz} Massestrom, der am Anfang der Teilstrecke i zusätzlich eintritt (bei negativem Vorzeichen austritt)

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
da mm	139,7	139,7	139,7							
di mm	131,7	131,7	131,7							
eps mm	0,045	0,045	0,045							
l m	100,00	100,00	100,00							
HH m	0,000	10,000	0,000							
H0 m	0,000									
Zeta -	5,00		5,00							
kv m ³ /h		100,00								

da Rohraußendurchmesser

di Rohrrinnendurchmesser

eps Rohrrauigkeit

l Teilstreckenlänge

Zeta Einzelwiderstandsbeiwert

kv Durchflusskoeffizient

HH Höhe am Ende der Teilstrecke bezogen auf H0

H0 Höhe am Anfang der Teilstrecke 1 (Bezugshöhe)

Ergebnisse:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m_s kg/h	30000	20000	30000							
t_{ein} °C										
t_{aus} °C										
p_{ein} bar	5,000	4,960	3,925							
p_{aus} bar	4,960	3,925	4,867							
Δp Pa	-3955	-103539	94145							
Gesamtdruckänderung:		-13348 Pa								
Q W										
m_K kg/h										
w m/s	0,61	0,41	0,61							

 t_{ein} Temperatur am Teilstreckenanfang t_{aus} Temperatur am Teilstreckenende p_{ein} Druck am Teilstreckenanfang p_{aus} Druck am Teilstreckenende Δp Druckänderung in der Teilstrecke

Q Wärmestrom von der Teilstrecke an die Umgebung

 m_K Kondensatausfall in der Teilstrecke

w mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Bild 5.4 Ausdruck der Eingaben und der Berechnungsergebnisse

Pfad und Dateiname:

F:\SD\FE_TGA\Druckverluste\Beispiel_1\

Druckverlauf in bar

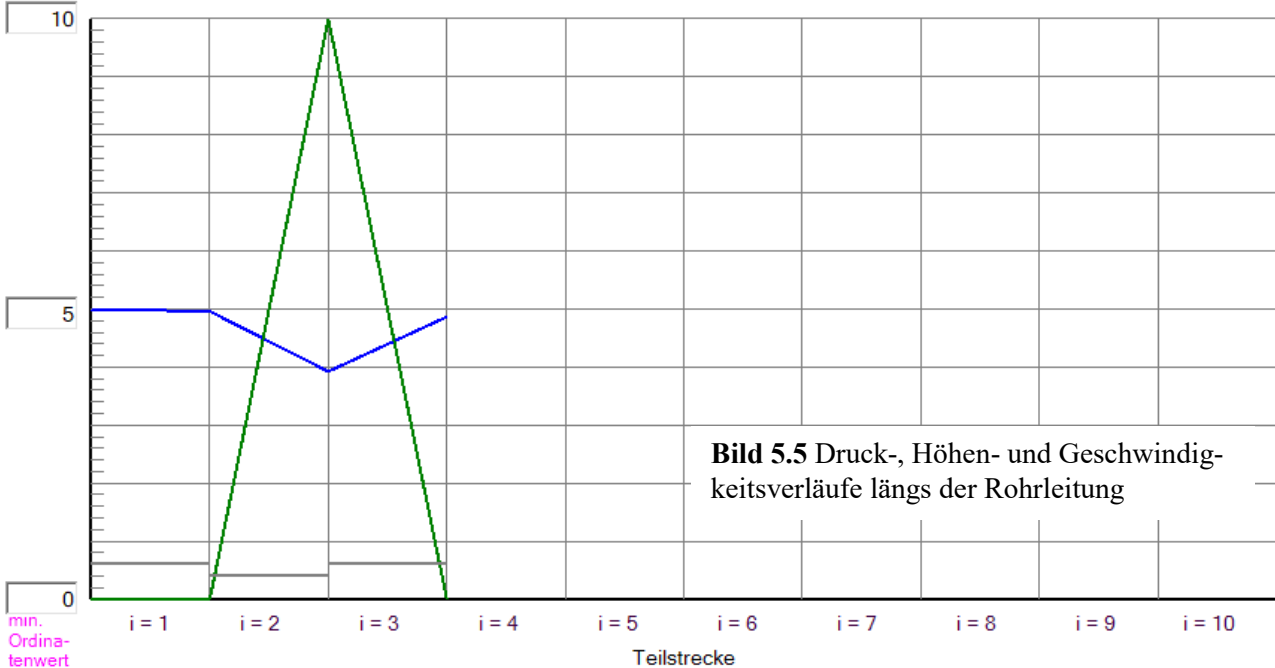
Höhenverlauf in m

Geschwindigkeit in m/s

Teilung der Ordinate:

10

max. Ordinatenwert



- ☒ Druckverlauf längs der Rohrleitung
- ☒ Höhenverlauf längs der Rohrleitung
- ☐ Temperaturverlauf längs der Rohrleitung
- ☐ Druckänderung in der Teilstrecke
- ☐ Masseströme in den Teilstrecken
- ☒ Mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Pfad und Dateiname:

F:\SD\FE_TGA\Druckverluste\Beispiel_1\

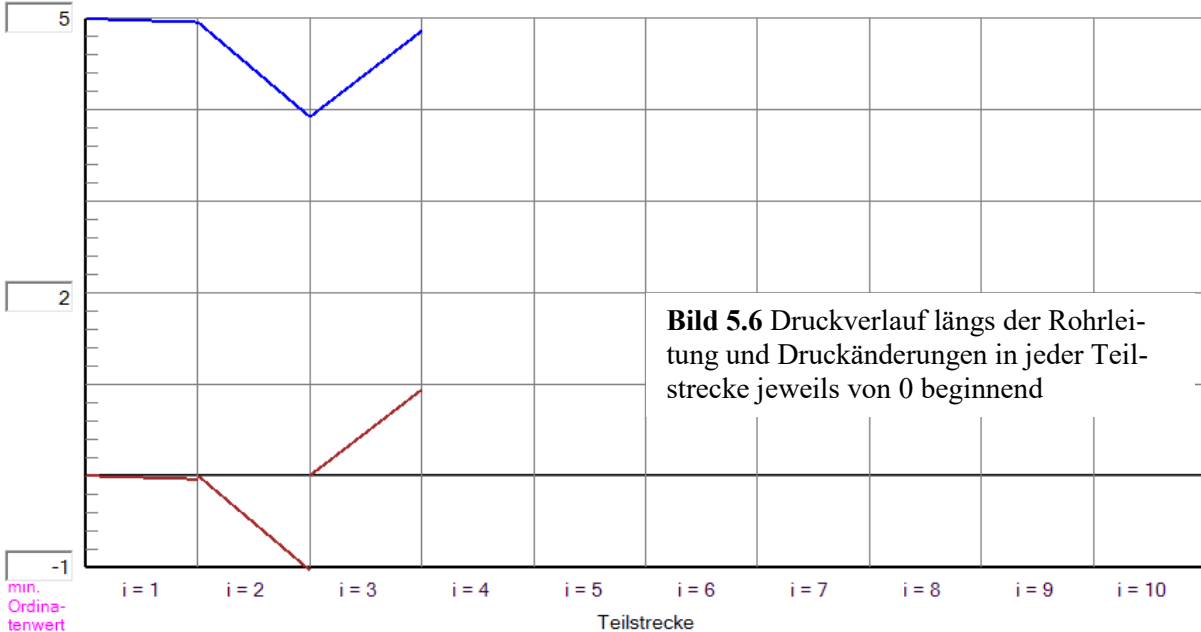
Druckverlauf in bar

Druckänderung in bar

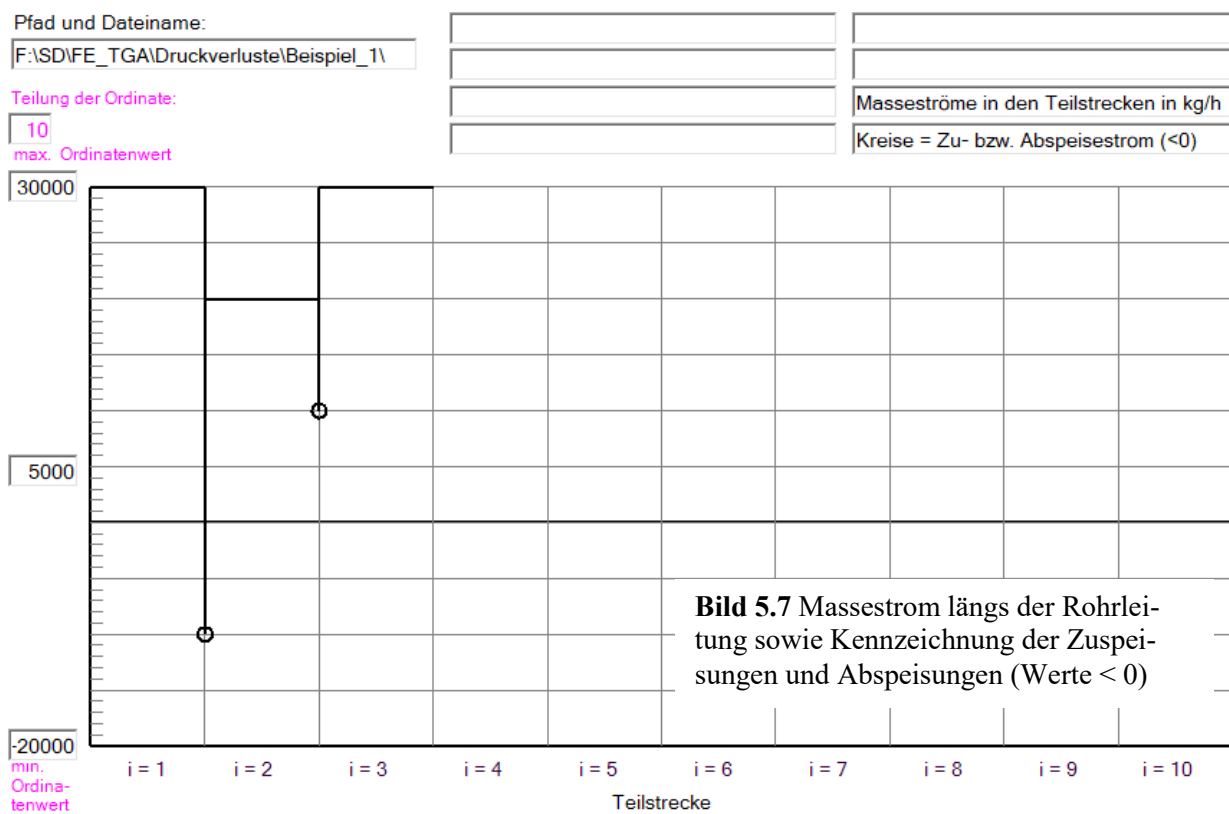
Teilung der Ordinate:

6

max. Ordinatenwert



- ☒ Druckverlauf längs der Rohrleitung
- ☐ Höhenverlauf längs der Rohrleitung
- ☐ Temperaturverlauf längs der Rohrleitung
- ☒ Druckänderung in der Teilstrecke
- ☐ Masseströme in den Teilstrecken
- ☐ Mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke



- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Druckverlauf längs der Rohrleitung | <input type="checkbox"/> Druckänderung in der Teilstrecke |
| <input type="checkbox"/> Höhenverlauf längs der Rohrleitung | <input checked="" type="checkbox"/> Masseströme in den Teilstrecken |
| <input type="checkbox"/> Temperaturverlauf längs der Rohrleitung | <input type="checkbox"/> Mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke |

6 Beispiel_2: Druckverlustberechnung für Wasser bei Wärmeaustausch mit der Umgebung

Druckverlustberechnung für eine Rohrströmung (Flüssigkeit, ideales Gas, Wasserdampf)

Festlegung des Durchflussmediums (Fluids) und dessen Kenngrößen

Wasser Sole TL 25 Sole TL 40 Luft Sauerstoff Schwefeldioxid Stickstoff Kohlendioxid Argon Wasserdampf Inkompressible Flüssigkeit (allgemein)*

Temperatur am Eintritt (i = 1) 100 °C Druck am Eintritt (i = 1) *** 10 bar rho_0 kg/m³ ny_0 10⁻⁶ m/s

Erklärungen * , ** , *** >>>

Teilstrecke i 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 imax = 9

Massestrom am Eintritt (i = 1) und Zuflüsse (Abflüsse mit Minuszeichen eingeben) zu Beginn einer Teilstrecke (i > 1)

Temperatur des Zuflusses

Bei den Zuflüssen > 0 gelten die Annahmen:

1. Der Druck des Zuflusses ist so geregelt, dass er dem Druck des Hauptstromes an der Zuflussstelle entspricht.

2. Die Temperatur des Zuflusses wird bei der Enthalpiebilanz berücksichtigt und daraus eine neue Teilstreckeneintrittstemperatur gebildet.

3. Bei Wasserdampf wird von trockengesättigtem oder überhitztem Dampf ausgegangen.

4. Bei Flüssigkeit (allgemein) gilt die eingetragene Dichte für das gesamte System. Eine Temperatureingabe ist nicht erforderlich.

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Durchmesser da	168.3	168.3	168.3	168.3	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	mm
Durchmesser di	159.3	159.3	159.3	159.3	107.1	107.1	107.1	107.1	107.1	107.1	mm
Rauigkeit eps	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	mm
Länge l	100	50	50	50	50	100	20	50	50	50	m
Hohe (i-Ende)	0	5	5	5	10	10	10	0	0	0	m
Zeta-Wert	2		1.5	3	4	1	0.5	2	2	2	m³/h
Kv-Wert											mm²

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an/von Umgebung ☒ Ja, wärmetechnische Berechnung durchführen!

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Temperatur tU	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	°C
Lambda Rohr	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	W/(m K)
Dicke Dämm1	0	50	0	25	50	50	50	50	50	50	mm
Lambda Dämm1		0.04		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	W/(m K)
Dicke Dämm2	0	0	50	25	0	0	0	0	0	0	mm
Lambda Dämm2			0.04	0.04							W/(m K)
Alpha außen	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	W/(m² K)

Ergebnisse

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Massestrom	8,1000	8,1000	8,1000	8,1000	6,1000	6,1000	6,1000	7,1000	7,1000		kg/s
tein	100.0										°C
taus											°C
pein	10,000										bar
paus											bar
Druckänderung											Pa
Wärmestrom											W
Kondensatstrom											kg/s
Geschwindigkeit											m/s

Die Bedienanleitung für das Rechenprogramm "Druckverlust_Rohr" ist Bestandteil des Gesamtpaketes Rechenprogramm und Beispiele. Die Eingabegrößen werden dort ausführlich erläutert. Außerdem enthält die Anleitung auch detaillierte Hinweise auf das Buch "Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung - Druckverluste", das die theoretischen Grundlagen für den Algorithmus lieferte.

Kurzanleitung zur Programmbedienung:

1. Anlegen eines Pfades und Ordners für das zu berechnende Beispiel.
2. START drücken und in das neu geöffnete Fenster den gewählten Pfad und Ordner für das Beispiel eingeben. Die Datei Eingabe.dat wird automatisch angelegt.
3. Wird auf ein bereits vorhandenes Beispiel zurückgegriffen, dann LADEN betätigen.
4. Alle Eingaben können überschrieben werden. Nur Zahlen und Komma verwenden (keine Leerzeichen).
5. Welche Eingaben notwendig sind, ist abhängig vom Durchflussmedium (Fluid). Für die inkompressible Flüssigkeit (allgemein) werden alle Teilstrecken bei konstanter Dichte und Viskosität betrachtet. Bei allen anderen Fluiden erfolgen programminterne Stoffwert- und Zustandsermittlungen. Sie sind bei Flüssigkeiten temperaturabhängig, bei Gasen und Wasserdampf temperatur- und größtenteils auch druckabhängig.
6. Es können maximal 10 hintereinander liegende Teilstrecken betrachtet werden. Ab Anfang der zweiten Teilstrecke können Zu- und Abflüsse (negatives Vorzeichen) Beachtung finden. Außer bei der inkompressiblen Flüssigkeit sind bei Zuflüssen auch deren Temperaturen zu benennen.
7. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung kann bei Flüssigkeiten, Gasen und Wasserdampf berechnet werden. Die wärmetechnischen Kenndaten für das Rohr, die evtl. Dämmung (maximal zweischichtig) und die Umgebung sind zu benennen.
8. EINGABE prüfen/speichern aktivieren! Mögliche Fehlerausschriften im rechten oberen Feld sind zu beachten und entsprechende Korrekturen vorzunehmen.
9. RECHNEN + SPEICHERN betätigen!
10. Evt. DUCKEN aktivieren (Ausdruck als WORD-Datei).
11. Evt. ZEICHNEN drücken, um zu einer zweiten Bildschirmmaske zu gelangen. Dort können interessierende Parameter längs der durchströmten Rohrleitung dargestellt werden.

START LADEN EINGABE prüfen/speichern

RECHNEN + SPEICHERN DRUCKEN ZEICHNEN ENDE

Erst EINGABE prüfen/speichern!

Bild 6.1 Eingaben

Druckverlustberechnung für eine Rohrströmung (Flüssigkeit, ideales Gas, Wasserdampf)

Festlegung des Durchflussmediums (Fluids) und dessen Kenngrößen

Wasser Sole TL 25 Sole TL 40 Luft Sauerstoff Schwefeldioxid Stickstoff Kohlendioxid Argon Wasserdampf Inkompressible Flüssigkeit (allgemein)*

Temperatur am Eintritt (i = 1) 100 °C Druck am Eintritt (i = 1) *** 10 bar rho_0 kg/m³ ny_0 10⁻⁶ m/s

Erklärungen * , ** , *** >>>

Teilstrecke i 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 imax = 9

Massestrom am Eintritt (i = 1) und Zuflüsse (Abflüsse mit Minuszeichen eingeben) zu Beginn einer Teilstrecke (i > 1)

Temperatur des Zuflusses

Bei den Zuflüssen > 0 gelten die Annahmen:

1. Der Druck des Zuflusses ist so geregelt, dass er dem Druck des Hauptstromes an der Zuflussstelle entspricht.

2. Die Temperatur des Zuflusses wird bei der Enthalpiebilanz berücksichtigt und daraus eine neue Teilstreckeneintrittstemperatur gebildet.

3. Bei Wasserdampf wird von trockengesättigtem oder überhitztem Dampf ausgegangen.

4. Bei Flüssigkeit (allgemein) gilt die eingetragene Dichte für das gesamte System. Eine Temperatureingabe ist nicht erforderlich.

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Durchmesser da	168.3	168.3	168.3	168.3	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	114.3	mm
Durchmesser di	159.3	159.3	159.3	159.3	107.1	107.1	107.1	107.1	107.1	107.1	mm
Rauigkeit eps	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	0.045	mm
Länge l	100	50	50	50	50	100	20	50	50	50	m
Hohe (i-Ende)	0	5	5	5	10	10	10	0	0	0	m
Zeta-Wert	2		1.5	3	4	1	0.5	2	2	2	m³/h
Kv-Wert											mm²

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an/von Umgebung ☒ Ja, wärmetechnische Berechnung durchführen!

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Temperatur tU	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	°C
Lambda Rohr	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	W/(m K)
Dicke Dämm1	0	50	0	25	50	50	50	50	50	50	mm
Lambda Dämm1		0.04		0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	W/(m K)
Dicke Dämm2	0	0	50	25	0	0	0	0	0	0	mm
Lambda Dämm2			0.04	0.04							W/(m K)
Alpha außen	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	W/(m² K)

Ergebnisse

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Massestrom	8,1000	8,1000	8,1000	8,1000	6,1000	6,1000	6,1000	7,1000	7,1000		kg/s
tein	100.0	97.0	96.9	96.9	96.8	96.7	96.6	96.9	96.9		°C
taus	97.0	96.9	96.9	96.8	96.7	96.6	96.6	96.9	96.9		°C
pein	10,000	9,889	9,513	9,507	9,500	8,999	8,956	8,947	8,954		bar
paus	9,989	9,513	9,507	9,500	8,999	8,956	8,947	8,954	8,921		bar
Druckänderung	-1110	-47602	-598	-727	-50100	-4253	-922	90728	-3331		Pa
Wärmestrom	102475	2021	2019	2018	1499	2994	598	1580	1580		W
Kondensatstrom											kg/s
Geschwindigkeit	0.42	0.42	0.42	0.42	0.70	0.70	0.70	0.82	0.82		m/s

Die Bedienanleitung für das Rechenprogramm "Druckverlust_Rohr" ist Bestandteil des Gesamtpaketes Rechenprogramm und Beispiele. Die Eingabegrößen werden dort ausführlich erläutert. Außerdem enthält die Anleitung auch detaillierte Hinweise auf das Buch "Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung - Druckverluste", das die theoretischen Grundlagen für den Algorithmus lieferte.

Kurzanleitung zur Programmbedienung:

1. Anlegen eines Pfades und Ordners für das zu berechnende Beispiel.
2. START drücken und in das neu geöffnete Fenster den gewählten Pfad und Ordner für das Beispiel eingeben. Die Datei Eingabe.dat wird automatisch angelegt.
3. Wird auf ein bereits vorhandenes Beispiel zurückgegriffen, dann LADEN betätigen.
4. Alle Eingaben können überschrieben werden. Nur Zahlen und Komma verwenden (keine Leerzeichen).
5. Welche Eingaben notwendig sind, ist abhängig vom Durchflussmedium (Fluid). Für die inkompressible Flüssigkeit (allgemein) werden alle Teilstrecken bei konstanter Dichte und Viskosität betrachtet. Bei allen anderen Fluiden erfolgen programminterne Stoffwert- und Zustandsermittlungen. Sie sind bei Flüssigkeiten temperaturabhängig, bei Gasen und Wasserdampf temperatur- und größtenteils auch druckabhängig.
6. Es können maximal 10 hintereinander liegende Teilstrecken betrachtet werden. Ab Anfang der zweiten Teilstrecke können Zu- und Abflüsse (negatives Vorzeichen) Beachtung finden. Außer bei der inkompressiblen Flüssigkeit sind bei Zuflüssen auch deren Temperaturen zu benennen.
7. Der Wärmeaustausch mit der Umgebung kann bei Flüssigkeiten, Gasen und Wasserdampf berechnet werden. Die wärmetechnischen Kenndaten für das Rohr, die evtl. Dämmung (maximal zweischichtig) und die Umgebung sind zu benennen.
8. EINGABE prüfen/speichern aktivieren! Mögliche Fehlerausschriften im rechten oberen Feld sind zu beachten und entsprechende Korrekturen vorzunehmen.
9. RECHNEN + SPEICHERN betätigen!
10. Evt. DUCKEN aktivieren (Ausdruck als WORD-Datei).
11. Evt. ZEICHNEN drücken, um zu einer zweiten Bildschirmmaske zu gelangen. Dort können interessierende Parameter längs der durchströmten Rohrleitung dargestellt werden.

START LADEN EINGABE prüfen/speichern

RECHNEN + SPEICHERN DRUCKEN ZEICHNEN ENDE

Erst EINGABE prüfen/speichern!

Bild 6.2 Eingaben und Ergebnisse der Berechnung

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\DRUCKVERLUSTE\BEISPIEL_2\

Druckverluste einer Rohrströmung: Wasser

Eintrittsparameter des Mediums:

Temperatur tein(1) 100,0 °C

Druck pein(1) 10,000 bar

Die Rohrleitung besitzt 9 hintereinander liegende Teilstrecken.

Massestrom ms am Eintritt i=1 und Massestromzuflüsse msz an den Eintritten i=2 bis i=10:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms/msz	kg/s	8,1000			-2,0000			1,0000		
tz	°C							120,0		

für i=1: ms Massestrom am Rohrleitungseintritt

für i>1: msz Massestrom, der am Anfang der Teilstrecke i zusätzlich eintritt (bei negativem Vorzeichen austritt)

tz Temperatur des zusätzlich eintretenden Massestromes am Anfang der Teilstrecke i

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
da	mm	168,3	168,3	168,3	168,3	114,3	114,3	114,3	114,3	114,3
di	mm	159,3	159,3	159,3	159,3	107,1	107,1	107,1	107,1	107,1
eps	mm	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
l	m	100,00	50,00	50,00	50,00	50,00	100,00	20,00	50,00	50,00
HH	m	0,000	5,000	5,000	5,000	10,000	10,000	10,000	0,000	0,000
H0	m	0,000								
Zeta	-	2,00		1,50	3,00	4,00	1,00	0,50	2,00	2,00
kv	mm ²									

da Rohraußendurchmesser

di Rohrinneindurchmesser

eps Rohrrauigkeit

l Teilstreckenlänge

Zeta Einzelwiderstandsbeiwert

kv Durchflusskoeffizient

HH Höhe am Ende der Teilstrecke bezogen auf H0

H0 Höhe am Anfang der Teilstrecke 1 (Bezugshöhe)

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an bzw. bei <0 von Umgebung:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tU	°C	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
lR	W/(m K)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0
dD1	mm	0	50	0	25	50	50	50	50	50
lD1	W/(m K)		0,0400		0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400	0,0400
dD2	mm	0	0	50	25	0	0	0	0	0
lD2	W/(m K)			0,0400	0,0400					
aa	W/(m ² K)	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0

tU Umgebungstemperatur der Teilstrecke

lR Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand

dD1 Dämmschichtdicke der ersten Lage

lD1 Wärmeleitfähigkeit der ersten Lage

dD2 Dämmschichtdicke der zweiten Lage

lD2 Wärmeleitfähigkeit der zweiten Lage

aa Wärmeübergangskoeffizient an der Rohr- bzw Dämmschichtaußenseite

Ergebnisse:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms	kg/s	8,1000	8,1000	8,1000	8,1000	6,1000	6,1000	6,1000	7,1000	7,1000
tein	°C	100,0	97,0	96,9	96,9	96,8	96,7	96,6	99,9	99,9
taus	°C	97,0	96,9	96,9	96,8	96,7	96,6	96,6	99,9	99,9
pein	bar	10,000	9,989	9,513	9,507	9,500	8,999	8,956	8,947	9,854
paus	bar	9,989	9,513	9,507	9,500	8,999	8,956	8,947	9,854	9,821
Dp	Pa	-1110	-47602	-598	-727	-50100	-4253	-922	90728	-3331
Gesamtdruckänderung:			-17915	Pa						
Q	W	102475	2021	2019	2018	1499	2994	598	1560	1560
mK	kg/s									
w	m/s	0,42	0,42	0,42	0,42	0,70	0,70	0,70	0,82	0,82

tein Temperatur am Teilstreckenanfang

taus Temperatur am Teilstreckenende

pein Druck am Teilstreckenanfang

paus Druck am Teilstreckenende

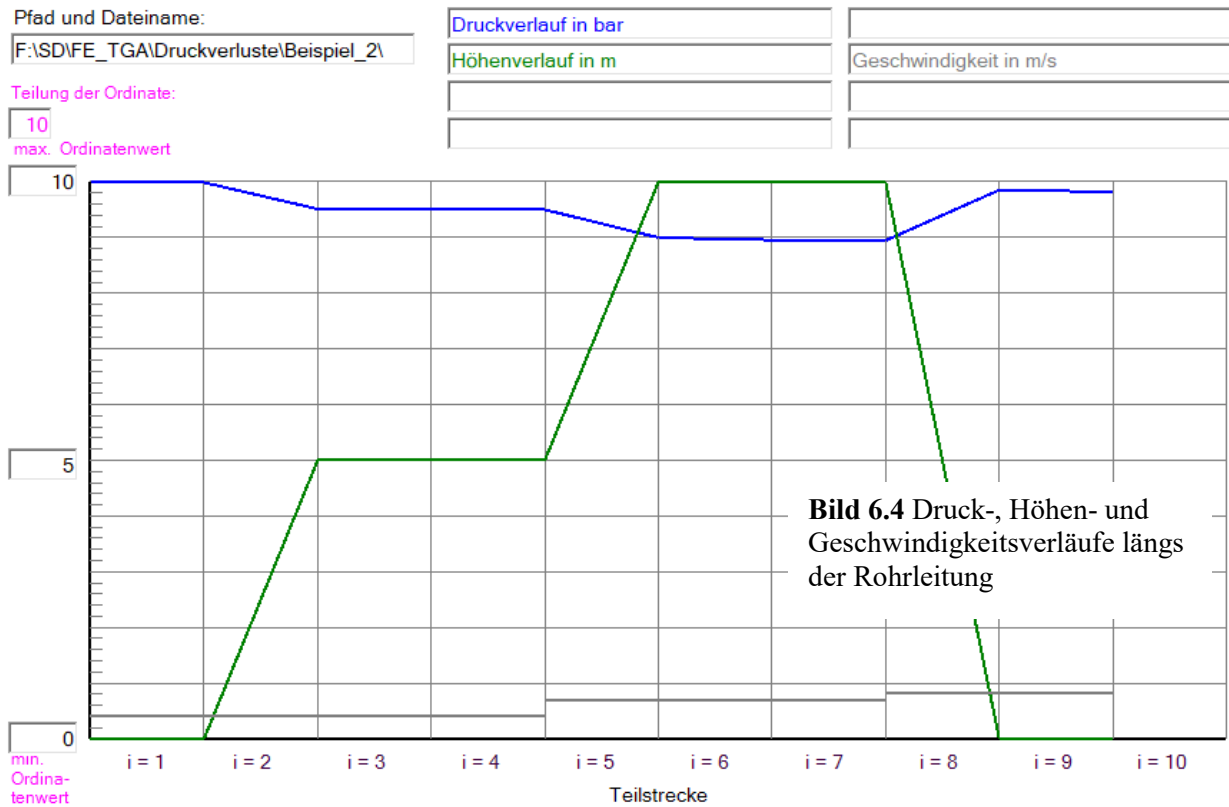
Dp Druckänderung in der Teilstrecke

Q Wärmestrom von der Teilstrecke an die Umgebung

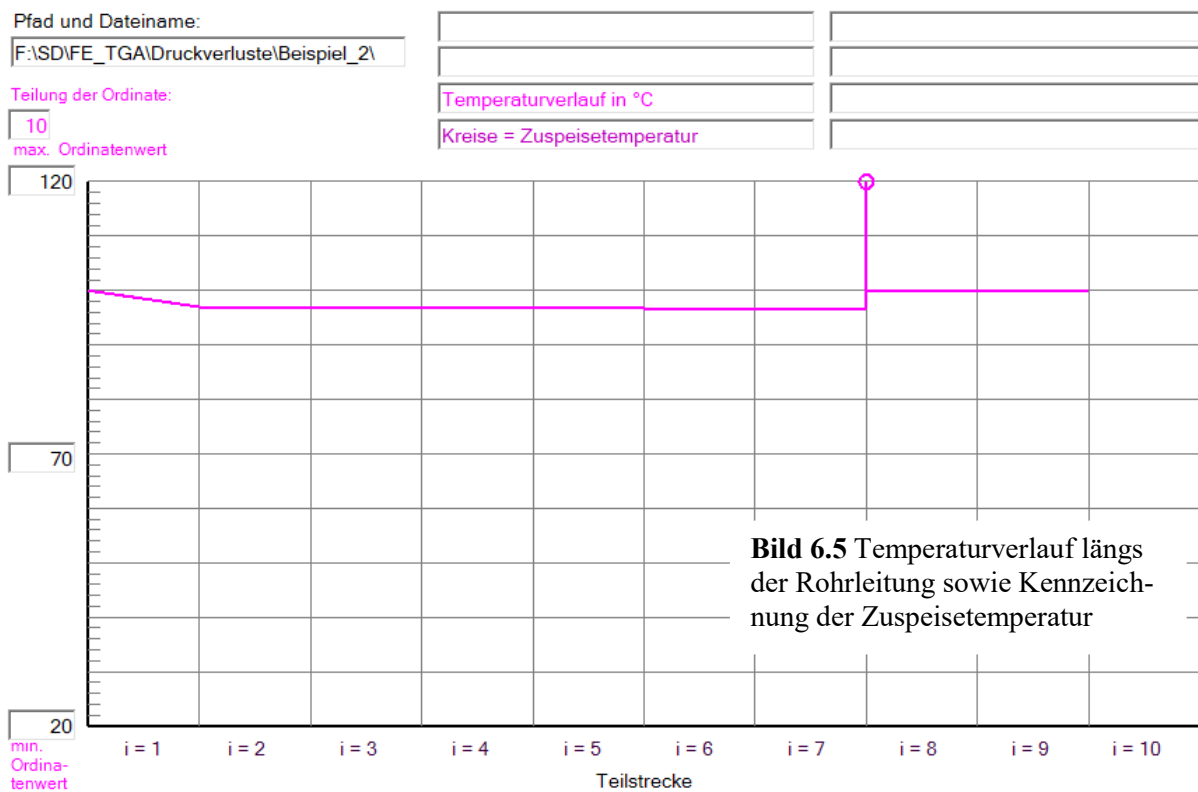
mK Kondensatausfall in der Teilstrecke

w mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Bild 6.3 Ausdruck der Eingaben und der Berechnungsergebnisse



- | | |
|--|---|
| <input checked="" type="checkbox"/> Druckverlauf längs der Rohrleitung | <input type="checkbox"/> Druckänderung in der Teilstrecke |
| <input checked="" type="checkbox"/> Höhenverlauf längs der Rohrleitung | <input type="checkbox"/> Masseströme in den Teilstrecken |
| <input type="checkbox"/> Temperaturverlauf längs der Rohrleitung | <input checked="" type="checkbox"/> Mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke |



- | | |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Druckverlauf längs der Rohrleitung | <input type="checkbox"/> Druckänderung in der Teilstrecke |
| <input type="checkbox"/> Höhenverlauf längs der Rohrleitung | <input type="checkbox"/> Masseströme in den Teilstrecken |
| <input checked="" type="checkbox"/> Temperaturverlauf längs der Rohrleitung | <input type="checkbox"/> Mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke |

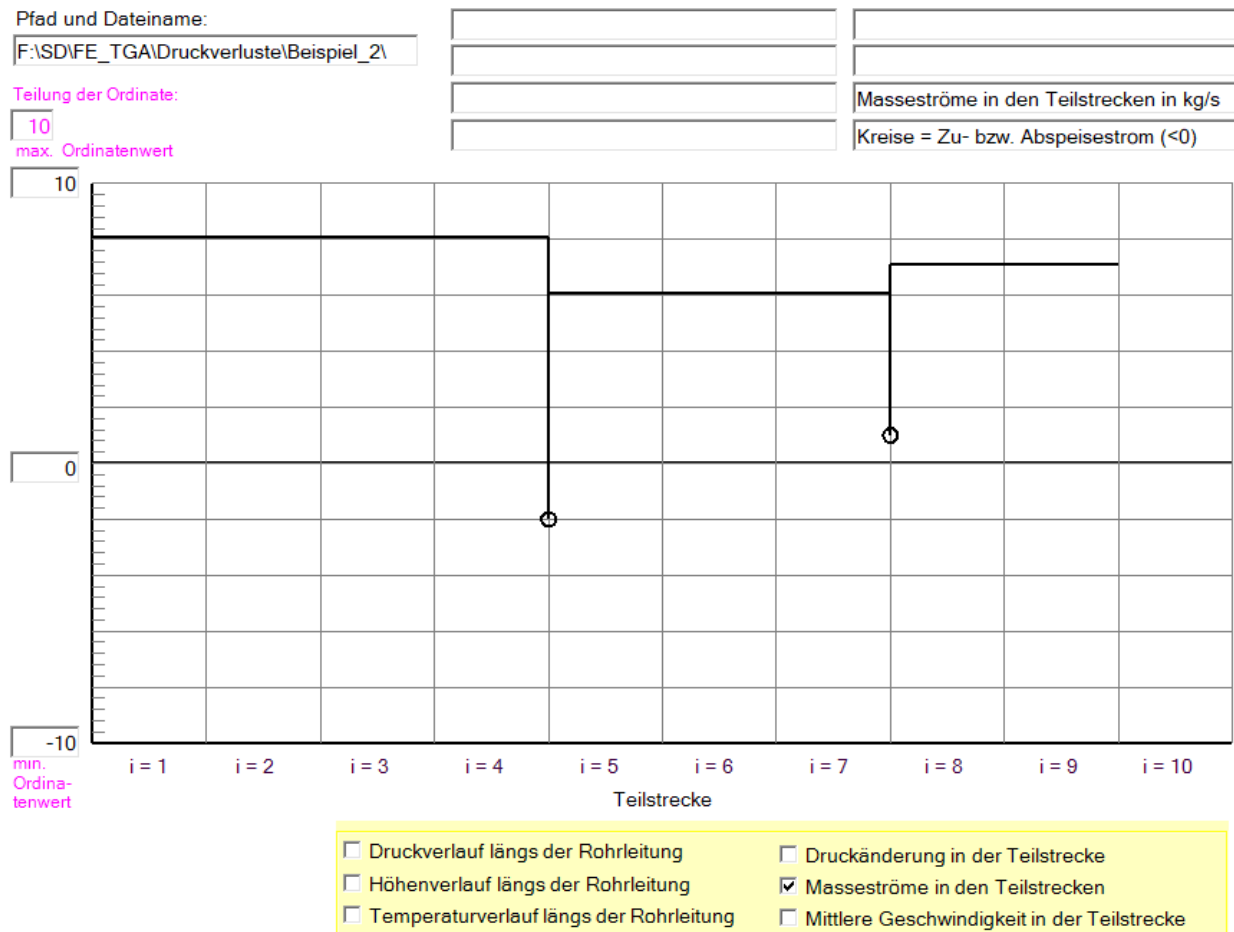


Bild 6.6 Massestrom längs der Rohrleitung sowie Kennzeichnung der Zuspeisungen und Abspeisungen (Werte < 0)

Hinweise:

- Die Dämmdicken der Teilstrecken 2, 3 und 4 sind praktisch identisch. Es wurden aber unterschiedliche Eingaben realisiert. Die Wärmeströme unterscheiden sich nur wegen der abnehmenden Fluidtemperatur geringfügig voneinander.
- Die Temperaturerhöhung des Fluids zwischen Austritt der Teilstrecke 7 und dem Eintritt der Teilstrecke 8 wird durch den Zufluss höherer Temperatur bewirkt.

7 Beispiel_3: Druckverlustberechnung für Luft

Druckverlustberechnung für eine Rohrströmung (Flüssigkeit, ideales Gas, Wasserdampf)

Festlegung des Durchflussmediums (Fluids) und dessen Kenngrößen

Wasser Sole TL 25 Sole TL 40 **Luft** Sauerstoff Schwefeldioxid Stickstoff Kohlendioxid Argon Wasserdampf Inkompressible Flüssigkeit (allgemein)*

Temperatur am Eintritt (i = 1) 20 °C Druck am Eintritt (i = 1) 6 bar rho_0 kg/m³ ny_0 10⁻⁶ m²/s

Teilstrecke i 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 imax = 5

Massenstrom am Eintritt (i = 1) und Zuflüsse (Abflüsse mit Minuszeichen eingeben) zu Beginn einer Teilstrecke (i > 1)

Temperatur des Zuflusses 1.4 °C

Bei den Zuflüssen > 0 gelten die Annahmen:

- Der Druck des Zuflusses ist so geregelt, dass er dem Druck des Hauptstromes an der Zuflussstelle entspricht.
- Die Temperatur des Zuflusses wird bei der Enthalpiebilanz berücksichtigt und daraus eine neue Teilstreckeneintrittstemperatur gebildet.
- Bei Wasserdampf wird von trockengesättigtem oder überhitztem Dampf ausgegangen.
- Bei Flüssigkeit (allgemein) gilt die eingegebene Dichte für das gesamte System. Eine Temperatureingabe ist nicht erforderlich.

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Durchmesser da	108	108	108	108	108						mm
Durchmesser di	100	100	100	100	100						mm
Rauigkeit eps	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1						mm
Länge l	100	100	100	100	100						m
Höhe (i-Ende)	0	0	0	0	0						0 m
Zeta-Wert											*Bezugshöhe i=1, Anf.
Kv-Wert											m³/h m²

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an/von Umgebung ☒ Ja, wärmetechnische Berechnung durchführen!

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Temperatur tU	20	20	20	20	20						°C
Lambda Rohr	50	50	50	50	50						W/(m K)
Dicke Dämm1	0	0	0	0	0						mm
Lambda Dämm1											W/(m K)
Dicke Dämm2	0	0	0	0	0						mm
Lambda Dämm2											W/(m K)
Alpha außen	15	15	15	15	15						W/(m² K)

Ergebnisse

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Massenstrom	1.4000	1.4000	1.4000	1.4000	1.4000						kg/s
tein	20,0	19,9	19,9	19,8	19,6						°C
taus	19,9	19,9	19,8	19,6	19,2						°C
pein	6,000	5,534	5,024	4,454	3,798						bar
paus	5,534	5,024	4,454	3,798	2,994						bar
Druckänderung	-46624	-51010	-56949	-65651	-80355						Pa
Wärmestrom		-28	-58	-50	-95						W
Kondensatstrom											kg/s
Geschwindigkeit	26,03	28,43	31,68	36,40	44,29						m/s

Die Bedienanleitung für das Rechenprogramm "Druckverlust_Rohr" ist Bestandteil des Gesamtpaketes Rechenprogramm und Beispiele. Die Eingabegrößen werden dort ausführlich erläutert. Außerdem enthält die Anleitung auch detaillierte Hinweise auf das Buch "Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung - Druckverluste", das die theoretischen Grundlagen für den Algorithmus liefert.

Kurzanleitung zur Programmbedienung:

- Anlegen eines Pfades und Ordners für das zu berechnende Beispiel.
- START drücken und in das neu geöffnete Fenster den gewählten Pfad und Ordner für das Beispiel eingeben. Die Datei Eingabe.dat wird automatisch angelegt.
- Wird auf ein bereits vorhandenes Beispiel zurückgegriffen, dann LADE/N betätigen.
- Alle Eingaben können überschrieben werden. Nur Zahlen und Komma verwenden (keine Leerzeichen).
- Welche Eingaben notwendig sind, ist abhängig vom Durchflussmedium (Fluid). Für die inkompressible Flüssigkeit (allgemein) werden alle Teilstrecken bei konstanter Dichte und Viskosität betrachtet. Bei allen anderen Fluiden erfolgen programmierte Stoffwert- und Zustandsermittlungen. Sie sind bei Flüssigkeiten temperaturabhängig, bei Gasen und Wasserdampf temperatur- und größtenteils auch druckabhängig.
- Es können maximal 10 hintereinander liegende Teilstrecken betrachtet werden. Ab Anfang der zweiten Teilstrecke können Zu- und Abflüsse (negatives Vorzeichen) Beachtung finden. Außer bei der inkompressiblen Flüssigkeit sind bei Zuflüssen auch deren Temperaturen zu benennen.
- Der Wärmeaustausch mit der Umgebung kann bei Flüssigkeiten, Gasen und Wasserdampf berechnet werden. Die wärmetechnischen Kenngrößen für das Rohr, die evtl. Dämmung (maximal zweischichtig) und die Umgebung sind zu benennen.
- EINGABE prüfen/speichern aktivieren! Mögliche Fehlerausdrücke im rechten oberen Feld sind zu beachten und entsprechende Korrekturen vorzunehmen.
- RECHNEN + SPEICHERN betätigen!
- Evt. DUCKEN aktivieren (Ausdruck als WORD-Datei).
- Evtl. ZEICHNEN drücken, um zu einer zweiten Bildschirmmaske zu gelangen. Dort können interessierende Parameter längs der durchströmten Rohrleitung dargestellt werden.

START LADEN EINGABE prüfen/speichern

RECHNEN + SPEICHERN DRUCKEN ZEICHNEN ENDE

Erst EINGABE prüfen/speichern!

Bild 7.1 Eingaben und Ergebnisse der Berechnung

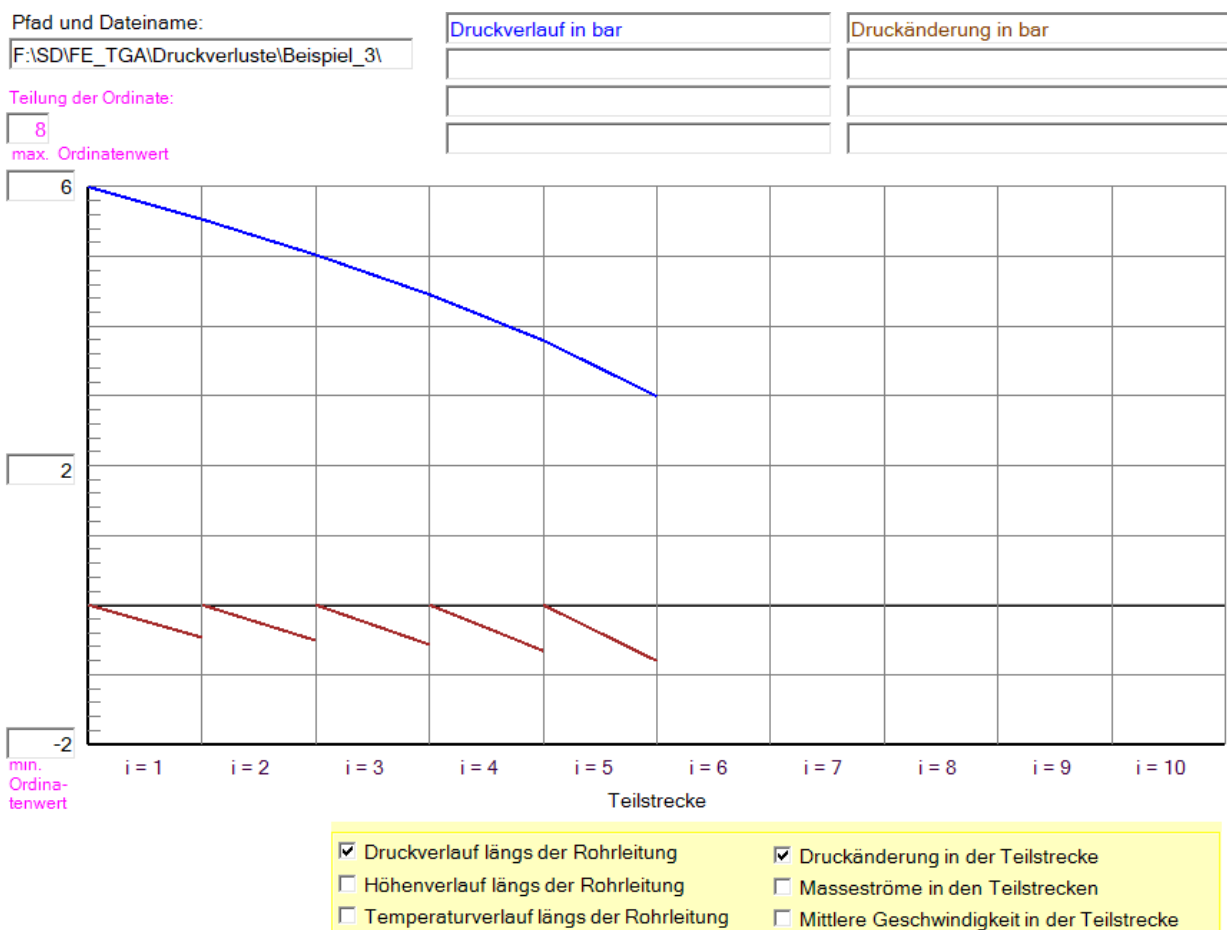


Bild 7.2 Druckverlauf längs der Rohrleitung und Druckänderungen in jeder Teilstrecke jeweils von 0 beginnend

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\DRUCKVERLUSTE\BEISPIEL_3\

Druckverluste einer Rohrströmung: Luft

Eintrittsparameter des Mediums:

Temperatur tein(1) 20,0 °C

Druck pein(1) 6,000 bar

Die Rohrleitung besitzt 5 hintereinander liegende Teilstrecken.

Massestrom ms am Eintritt i=1 und Massestromzuflüsse msz an den Eintritten i=2 bis i=10:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms/msz	kg/s	1,4000								
tz	°C									

für i=1: ms Massestrom am Rohrleitungseintritt

für i>1: msz Massestrom, der am Anfang der Teilstrecke i zusätzlich eintritt (bei negativem Vorzeichen austritt)

tz Temperatur des zusätzlich eintretenden Massestromes am Anfang der Teilstrecke i

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
da	mm	108,0	108,0	108,0	108,0	108,0				
di	mm	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0				
eps	mm	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100				
l	m	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00				
HH	m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				
H0	m	0,000								
Zeta	-									
kv	mm ²									

da Rohraußendurchmesser

di Rohrinneindurchmesser

eps Rohrrauigkeit

l Teilstreckenlänge

Zeta Einzelwiderstandsbeiwert

kv Durchflusskoeffizient

HH Höhe am Ende der Teilstrecke bezogen auf H0

H0 Höhe am Anfang der Teilstrecke 1 (Bezugshöhe)

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an bzw. bei <0 von Umgebung:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tU	°C	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0				
lR	W/(m K)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0				
dD1	mm	0	0	0	0	0				
lD1	W/(m K)									
dD2	mm	0	0	0	0	0				
lD2	W/(m K)									
aa	W/(m ² K)	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0				

tU Umgebungstemperatur der Teilstrecke

lR Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand

dD1 Dämmschichtdicke der ersten Lage

lD1 Wärmeleitfähigkeit der ersten Lage

dD2 Dämmschichtdicke der zweiten Lage

lD2 Wärmeleitfähigkeit der zweiten Lage

aa Wärmeübergangskoeffizient an der Rohr- bzw Dämmschichtaußenseite

Ergebnisse:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms	kg/s	1,4000	1,4000	1,4000	1,4000	1,4000				
tein	°C	20,0	19,9	19,9	19,8	19,6				
taus	°C	19,9	19,9	19,8	19,6	19,2				
pein	bar	6,000	5,534	5,024	4,454	3,798				
paus	bar	5,534	5,024	4,454	3,798	2,994				
Dp	Pa	-46624	-51010	-56949	-65651	-80355				
Gesamtdruckänderung:			-300588 Pa							
Q	W		-28	-58	-50	-95				
mK	kg/s									
w	m/s	26,03	28,43	31,68	36,40	44,29				

tein Temperatur am Teilstreckenanfang

taus Temperatur am Teilstreckenende

pein Druck am Teilstreckenanfang

paus Druck am Teilstreckenende

Dp Druckänderung in der Teilstrecke

Q Wärmestrom von der Teilstrecke an die Umgebung

mK Kondensatausfall in der Teilstrecke

w mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Bild 7.3 Ausdruck der Eingaben und der Berechnungsergebnisse

Anmerkungen:

- Es wurde eine sehr lange luftdurchströmte Rohrleitung (500 m), unterteilt in fünf gleichlange Abschnitte, betrachtet.
- Aufgrund des Druckabfalls in der Leitung erfolgt eine Entspannung des Gases und die Ge-

geschwindigkeit steigt von Teilstrecke zu Teilstrecke an. (Es werden jeweils die mittleren Geschwindigkeiten angegeben.)

- Mit der Geschwindigkeitszunahme ist der Anstieg der Teilstrecken-"Druckverluste" logisch. Anschließend erfolgt die Berechnung der Rohrleitung in *einem* Abschnitt (Beispiel_3A).

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\DRUCKVERLUSTE\BEISPIEL_3A\

Druckverluste einer Rohrströmung: Luft

Eintrittsparameter des Mediums:

Temperatur tein(1) 20,0 °C

Druck pein(1) 6,000 bar

Die Rohrleitung besitzt 1 hintereinander liegende Teilstrecken.

Massestrom ms am Eintritt i=1 und Massestromzuflüsse msz an den Eintritten i=2 bis i=10:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms/msz	kg/s	1,4000								
tz	°C									

für i=1: ms Massestrom am Rohrleitungseintritt

für i>1: msz Massestrom, der am Anfang der Teilstrecke i zusätzlich eintritt (bei negativem Vorzeichen austritt)

tz Temperatur des zusätzlich eintretenden Massestromes am Anfang der Teilstrecke i

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
da	mm	108,0								
di	mm	100,0								
eps	mm	0,100								
l	m	500,00								
HH	m	0,000								
H0	m	0,000								
Zeta	-									
kv	mm ²									

da Rohraußendurchmesser di Rohrrinnendurchmesser eps Rohrrauigkeit
l Teilstreckenlänge Zeta Einzelwiderstandsbeiwert kv Durchflusskoeffizient
HH Höhe am Ende der Teilstrecke bezogen auf H0 H0 Höhe am Anfang der Teilstrecke 1 (Bezugshöhe)

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an bzw. bei <0 von Umgebung:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tU	°C	20,0								
lR	W/(m K)	50,0								
dD1	mm	0								
lD1	W/(m K)									
dD2	mm	0								
lD2	W/(m K)									
aa	W/(m ² K)	15,0								

tU Umgebungstemperatur der Teilstrecke lR Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand
dD1 Dämmschichtdicke der ersten Lage lD1 Wärmeleitfähigkeit der ersten Lage
dD2 Dämmschichtdicke der zweiten Lage lD2 Wärmeleitfähigkeit der zweiten Lage
aa Wärmeübergangskoeffizient an der Rohr- bzw Dämmschichtaußenseite

Ergebnisse:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms	kg/s	1,4000								
tein	°C	20,0								
taus	°C	19,0								
pein	bar	6,000								
paus	bar	2,985								
Dp	Pa	-301536								
Gesamtdruckänderung:		-301536 Pa								
Q	W									
mK	kg/s									
w	m/s	34,68								

tein Temperatur am Teilstreckenanfang taus Temperatur am Teilstreckenende
pein Druck am Teilstreckenanfang paus Druck am Teilstreckenende
Dp Druckänderung in der Teilstrecke Q Wärmestrom von der Teilstrecke an die Umgebung
mK Kondensatausfall in der Teilstrecke w mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Bild 7.4 Ausdruck der Eingaben und der Berechnungsergebnisse für Beispiel_3A (Rohrleitung: 500 m)

Auswertung:

- Der Unterschied der Gesamtdruckänderung für die beiden Berechnungsvarianten beträgt 0,3 %. Dies zeigt, dass die programminternen Mittelwertbildungen der Strömungsgrößen längs der Rohrleitung sehr gut sind.
- Die Summe der Wärmeströme von der Rohrleitung an die Umgebung ist aber unterschiedlich. Im Beispiel_3 treten in den letzten Teilstrecken insgesamt -231 W auf, während der Berechnung in einem Zug (Beispiel_3A) keine Wärmeverluste ausgewiesen werden. Dies liegt lediglich am gewählten Iterationsverfahren und den programmintern fixierten Schranken.

Wiederholt man die Berechnungen bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C, so folgen:

Ergebnisse für Beispiel_3:

i=		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms	kg/s	1,4000	1,4000	1,4000	1,4000	1,4000					
tein	°C	20,0	14,2	10,0	7,0	4,8					
taus	°C	14,2	10,0	7,0	4,8	3,1					
pein	bar	6,000	5,540	5,045	4,503	3,889					
paus	bar	5,540	5,045	4,503	3,889	3,159					
Dp	Pa	-46048	-49427	-54238	-61366	-73048					
Gesamtdruckänderung:			-284127 Pa								
Q	W	8149	5771	4072	2850	1915	Summe: 22757 W				
mK	kg/s										
w	m/s	25,76	27,60	30,23	34,10	40,39					

Ergebnisse für Beispiel_3A:

i=		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms	kg/s	1,4000									
tein	°C	20,0									
taus	°C	3,4									
pein	bar	6,000									
paus	bar	3,083									
Dp	Pa	-291738									
Gesamtdruckänderung:			-291738 Pa								
Q	W	22340									
mK	kg/s										
w	m/s	33,26									

Auswertung:

- Die Gesamtdruckänderung liegt bei der vereinfachten Berechnung um 2,7 % höher. Damit ist die Abweichung größer als bei den Originalbeispielen (0,3 % bei Umgebungstemperatur 20 °C).

Dies liegt in den verwendeten Näherungen für v_m nach [1, Gl. (7.31)] und P_m nach [1, Gl. (7.44)] begründet, die ursächlich für eine isotherme Zustandsänderung aufgestellt wurden. Die Originalbeispiele zeigen quasi einen konstanten Temperaturverlauf.

- Die berechneten Wärmeströme unterscheiden sich um ca. 2 %.
- Generell zeigt es sich, dass die programminternen Mittelwertbildungen der Strömungsgrößen längs der Rohrleitung sehr gut sind, wodurch die Nachbildung der Rohrleitung mit großen Teilstreckenlängen durchaus möglich ist.

8 Beispiel_4: Druckverlustberechnung für Wasserdampf

Druckverlustberechnung für eine Rohrströmung (Flüssigkeit, ideales Gas, Wasserdampf)

Festlegung des Durchflussmediums (Fluids) und dessen Kenngrößen
☐ Wasser ☐ Sole TL 25 ☐ Sole TL 40 ☐ Luft ☐ Sauerstoff ☐ Schwefeldioxid ☐ Stickstoff ☐ Kohlendioxid ☐ Argon ☒ Wasserdampf ☐ Inkompressible Flüssigkeit (allgemein)*

Temperatur am Eintritt (i = 1) 300 °C Druck am Eintritt (i = 1) *** 15 bar rho_0 kg/m³ ny_0 10⁻⁶ m/s

Teilstrecke i 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 imax = 6 Erläuterungen * ** ***

Massenstrom am Eintritt (i = 1) und Zuflüsse (Abflüsse mit Minuszeichen eingeben) zu Beginn einer Teilstrecke (i > 1)
 5 kg/s kg/h

Temperatur des Zuflusses
 1. Der Druck des Zuflusses ist so geregelt, dass er dem Druck des Hauptstromes an der Zuflussstelle entspricht.
 2. Die Temperatur des Zuflusses wird bei der Enthalpiebilanz berücksichtigt und daraus eine neue Teilstreckeneintrittstemperatur gebildet.
 3. Bei Wasserdampf wird von trocken gesättigtem oder überhitztem Dampf ausgegangen.
 4. Bei Flüssigkeit (allgemein) gilt die eingetragene Dichte für das gesamte System. Eine Temperatureingabe ist nicht erforderlich.

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen
 Durchmesser da 219,1 219,1 219,1 219,1 219,1 219,1 mm
 Durchmesser di 206,5 206,5 206,5 206,5 206,5 206,5 mm
 Rauigkeit eps 0,045 0,045 0,045 0,045 0,045 0,045 mm
 Länge l 100 100 100 100 100 100 m
 Höhe (r-Ende) 0 0 0 0 0 0 m
 Zeta-Wert 12 m
 Kv-Wert m³/h mm²

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an/von Umgebung ☒ Ja, wärmetechnische Berechnung durchführen!
 Temperatur tU -15 -15 -15 -15 -15 -15 °C
 Lambda Rohr 50 50 50 50 50 50 W/(m K)
 Dicke Dämm1 100 100 100 100 100 100 mm
 Lambda Dämm1 0,045 0,045 0,045 0,045 0,045 0,045 W/(m K)
 Dicke Dämm2 0 0 0 0 0 0 mm
 Lambda Dämm2 W/(m K)
 Alpha außen 23 23 23 23 23 23 W/(m² K)

Ergebnisse
Massenstrom 5,0000 5,0000 5,0000 5,0000 5,0000 5,0000 kg/s
 tein 300,0 298,3 296,9 295,5 294,1 292,7 °C
 taus 298,3 296,9 295,5 294,1 292,7 291,3 °C
 pein 15,000 14,635 14,498 14,360 14,220 14,080 bar
 paus 14,635 14,498 14,360 14,220 14,080 13,939 bar
Druckänderung -36516 -13719 -13815 -13914 -14016 -14121 Pa
 Wärmestrom 13477 13410 13350 13290 13230 13170 W
 Kondensatstrom kg/s
Geschwindigkeit 25,60 25,98 26,16 26,35 26,55 26,75 m/s

Die Bedienanleitung für das Rechenprogramm "Druckverlust_Rohr" ist Bestandteil des Gesamtpaketes Rechenprogramm und Beispiele. Die Eingabegrößen werden dort ausführlich erläutert. Außerdem enthält die Anleitung auch detaillierte Hinweise auf das Buch "Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung - Druckverluste", das die theoretischen Grundlagen für den Algorithmus liefert.

Kurzanleitung zur Programmbedienung:
 1. Anlegen eines Pfades und Ordners für das zu berechnende Beispiel.
 2. START drücken und in das neu geöffnete Fenster den gewählten Pfad und Ordner für das Beispiel eingeben. Die Datei Eingabe.dat wird automatisch angelegt.
 3. Wird auf ein bereits vorhandenes Beispiel zurückgegriffen, dann LADEN betätigen.
 4. Alle Eingaben können überschrieben werden. Nur Zahlen und Komma verwenden (keine Leerzeichen).
 - Welche Eingaben notwendig sind, ist abhängig vom Durchflussmedium (Fluid). Für die inkompressible Flüssigkeit (allgemein) werden alle Teilstrecken bei konstanter Dichte und Viskosität betrachtet. Bei allen anderen Fluiden erfolgen programminterne Stoffwert- und Zustandsermittlungen. Sie sind bei Flüssigkeiten temperaturabhängig, bei Gasen und Wasserdampf temperatur- und druckabhängig.
 - Es können maximal 10 hintereinander liegende Teilstrecken betrachtet werden. Ab Anfang der zweiten Teilstrecke können Zu- und Abflüsse (negatives Vorzeichen) Beachtung finden. Außer bei der inkompressiblen Flüssigkeit sind bei Zuflüssen auch deren Temperaturen zu benennen.
 - Der Wärmeaustausch mit der Umgebung kann bei Flüssigkeiten, Gasen und Wasserdampf berechnet werden. Die wärmetechnischen Kenndaten für das Rohr, die evtl. Dämmung (maximal zweischichtig) und die Umgebung sind zu benennen.
 5. EINGABE prüfen/speichern aktivieren! Mögliche Fehlerausschriften im rechten oberen Feld sind zu beachten und entsprechende Korrekturen vorzunehmen.
 6. RECHNEN + SPEICHERN betätigen!
 7. Evt. DUCKEN aktivieren (Ausdruck als WORD-Datei).
 8. Evt. ZEICHNEN drücken, um zu einer zweiten Bildschirmmaske zu gelangen. Dort können interessierende Parameter längs der durchströmten Rohrleitung dargestellt werden.

START LADEN EINGABE prüfen/speichern
 RECHNEN + SPEICHERN DRUCKEN ZEICHNEN ENDE
 Erst EINGABE prüfen/speichern!

Bild 8.1 Eingaben und Ergebnisse der Berechnung

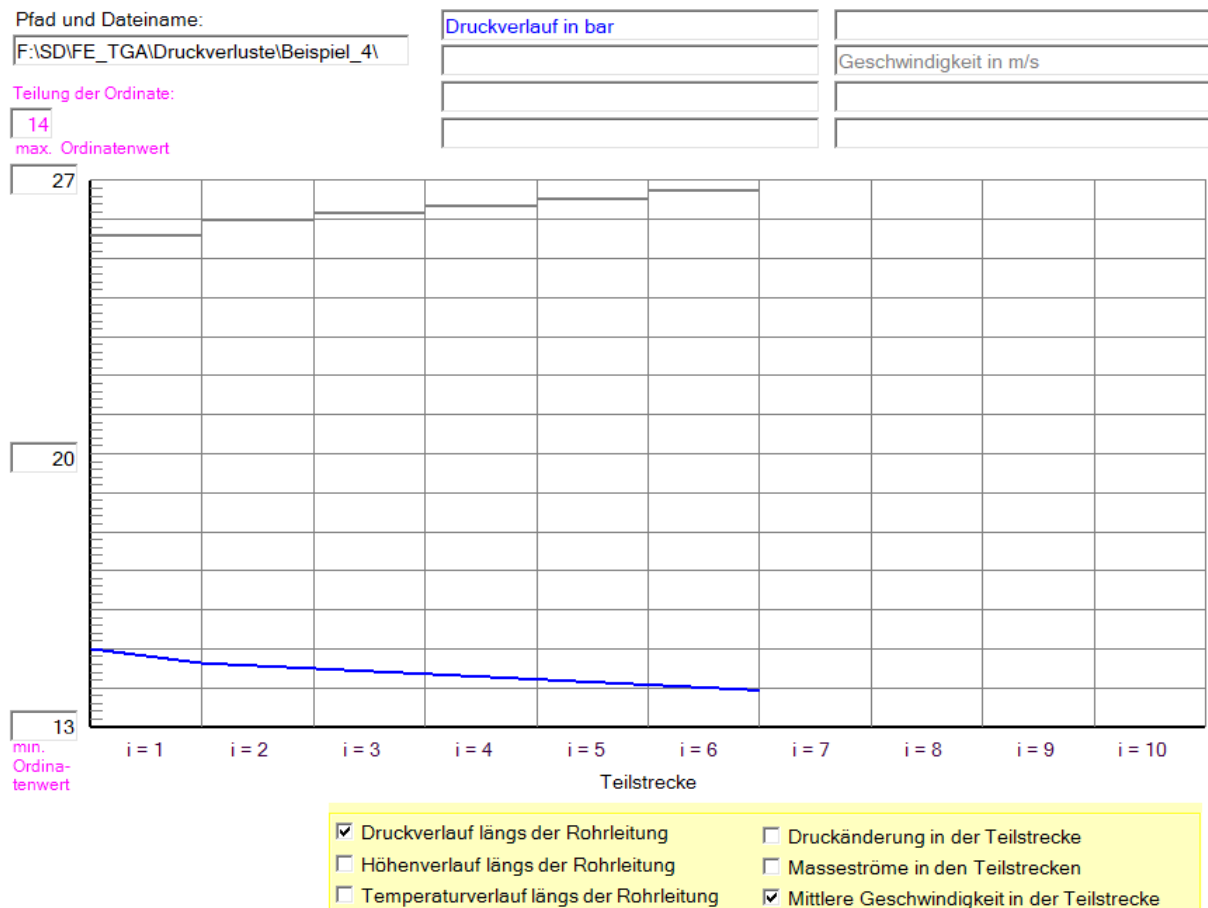


Bild 8.2 Druck- und Geschwindigkeitsverläufe längs der Rohrleitung

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\DRUCKVERLUSTE\BEISPIEL_4\

Druckverluste einer Rohrströmung: Wasserdampf

Eintrittsparameter des Mediums:

Temperatur tein(1) 300,0 °C

Druck pein(1) 15,000 bar

Die Rohrleitung besitzt 6 hintereinander liegende Teilstrecken.

Massestrom ms am Eintritt i=1 und Massestromzuflüsse msz an den Eintritten i=2 bis i=10:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms/msz	kg/s	5,0000								
tz	°C									

für i=1: ms Massestrom am Rohrleitungseintritt

für i>1: msz Massestrom, der am Anfang der Teilstrecke i zusätzlich eintritt (bei negativem Vorzeichen austritt)

tz Temperatur des zusätzlich eintretenden Massestromes am Anfang der Teilstrecke i

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
da	mm	219,1	219,1	219,1	219,1	219,1	219,1			
di	mm	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5			
eps	mm	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045			
l	m	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00			
HH	m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
H0	m	0,000								
Zeta	-	12,00								
kv	mm ²									

da Rohraußendurchmesser

di Rohrinneindurchmesser

eps Rohrrauigkeit

l Teilstreckenlänge

Zeta Einzelwiderstandsbeiwert

kv Durchflusskoeffizient

HH Höhe am Ende der Teilstrecke bezogen auf H0

H0 Höhe am Anfang der Teilstrecke 1 (Bezugshöhe)

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an bzw. bei <0 von Umgebung:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tU	°C	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0			
lR	W/(m K)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0			
dD1	mm	100	100	100	100	100	100			
lD1	W/(m K)	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450			
dD2	mm	0	0	0	0	0	0			
lD2	W/(m K)									
aa	W/(m ² K)	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0			

tU Umgebungstemperatur der Teilstrecke

lR Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand

dD1 Dämmschichtdicke der ersten Lage

lD1 Wärmeleitfähigkeit der ersten Lage

dD2 Dämmschichtdicke der zweiten Lage

lD2 Wärmeleitfähigkeit der zweiten Lage

aa Wärmeübergangskoeffizient an der Rohr- bzw Dämmschichtaußenseite

Ergebnisse:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms	kg/s	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000	5,0000			
tein	°C	300,0	298,3	296,9	295,5	294,1	292,7			
taus	°C	298,3	296,9	295,5	294,1	292,7	291,3			
pein	bar	15,000	14,635	14,498	14,360	14,220	14,080			
paus	bar	14,635	14,498	14,360	14,220	14,080	13,939			
Dp	Pa	-36516	-13719	-13815	-13914	-14016	-14121			
Gesamtdruckänderung:			-106101 Pa							
Q	W	13477	13410	13350	13290	13230	13170	Summe: 79927 W		
mK	kg/s									
w	m/s	25,60	25,98	26,16	26,35	26,55	26,75			

tein Temperatur am Teilstreckenanfang

taus Temperatur am Teilstreckenende

pein Druck am Teilstreckenanfang

paus Druck am Teilstreckenende

Dp Druckänderung in der Teilstrecke

Q Wärmestrom von der Teilstrecke an die Umgebung

mK Kondensatausfall in der Teilstrecke

w mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Bild 8.3 Ausdruck der Eingaben und der Berechnungsergebnisse

Es folgt die Berechnung der 600 m langen Rohrleitung als *eine* Teilstrecke.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\DRUCKVERLUSTE\BEISPIEL_4A\

Druckverluste einer Rohrströmung: Wasserdampf

Eintrittsparameter des Mediums:

Temperatur tein(1) 300,0 °C

Druck pein(1) 15,000 bar

Die Rohrleitung besitzt 1 hintereinander liegende Teilstrecken.

Massestrom ms am Eintritt i=1 und Massestromzuflüsse msz an den Eintritten i=2 bis i=10:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms/msz	kg/s	5,0000								
tz	°C									

für i=1: ms Massestrom am Rohrleitungseintritt

für i>1: msz Massestrom, der am Anfang der Teilstrecke i zusätzlich eintritt (bei negativem Vorzeichen austritt)

tz Temperatur des zusätzlich eintretenden Massestromes am Anfang der Teilstrecke i

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
da	mm	219,1								
di	mm	206,5								
eps	mm	0,045								
l	m	600,00								
HH	m	0,000								
H0	m	0,000								
Zeta	-	12,00								
kv	mm ²									

da Rohraußendurchmesser

di Rohrinneindurchmesser

eps Rohrrauigkeit

l Teilstreckenlänge

Zeta Einzelwiderstandsbeiwert

kv Durchflusskoeffizient

HH Höhe am Ende der Teilstrecke bezogen auf H0

H0 Höhe am Anfang der Teilstrecke 1 (Bezugshöhe)

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an bzw. bei <0 von Umgebung:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tU	°C	-15,0								
lR	W/(m K)	50,0								
dD1	mm	100								
lD1	W/(m K)	0,0450								
dD2	mm	0								
lD2	W/(m K)									
aa	W/(m ² K)	23,0								

tU Umgebungstemperatur der Teilstrecke

lR Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand

dD1 Dämmschichtdicke der ersten Lage

lD1 Wärmeleitfähigkeit der ersten Lage

dD2 Dämmschichtdicke der zweiten Lage

lD2 Wärmeleitfähigkeit der zweiten Lage

aa Wärmeübergangskoeffizient an der Rohr- bzw Dämmschichtaußenseite

Ergebnisse:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms	kg/s	5,0000								
tein	°C	300,0								
taus	°C	291,3								
pein	bar	15,000								
paus	bar	13,940								
Dp	Pa	-105976								
Gesamtdruckänderung:		-105976 Pa								
Q	W	79964								
mK	kg/s									
w	m/s	26,07								

tein Temperatur am Teilstreckenanfang

taus Temperatur am Teilstreckenende

pein Druck am Teilstreckenanfang

paus Druck am Teilstreckenende

Dp Druckänderung in der Teilstrecke

Q Wärmestrom von der Teilstrecke an die Umgebung

mK Kondensatausfall in der Teilstrecke

w mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Bild 8.4 Ausdruck der Eingaben und der Berechnungsergebnisse für Beispiel_4A (Rohrleitung: 600 m)

Die Unterschiede in den Berechnungsergebnissen sind klein:

- Die Gesamtdruckänderungen zeigen eine Abweichung von nur 0,1 %.
- Die Wärmeströme an die Umgebung unterscheiden sich praktisch nicht.

Im nachfolgenden Beispiel werden eine Dampfzuleitung und eine Dampfzuspisung demonstriert.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SDAFE_TGA\DRUCKVERLUSTE\BEISPIEL_4B\

DRUCKVERLUSTE EINER ROHRSTRÖMUNG: WASSERDAMPF

Eintrittsparameter des Mediums:

Temperatur tein(1) 300,0 °C

Druck pein(1) 15,000 bar

Die Rohrleitung besitzt 6 hintereinander liegende Teilstrecken.

Massestrom ms am Eintritt i=1 und Massestromzuflüsse msz an den Eintritten i=2 bis i=10:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms/msz kg/s	5,0000		-2,0000		2,0000					
tz °C					350,0					

für i=1: ms Massestrom am Rohrleitungseintritt

für i>1: msz Massestrom, der am Anfang der Teilstrecke i zusätzlich eintritt (bei negativem Vorzeichen austritt)

tz Temperatur des zusätzlich eintretenden Massestromes am Anfang der Teilstrecke i

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
da mm	219,1	219,1	219,1	219,1	219,1	219,1				
di mm	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5				
eps mm	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045				
l m	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00				
HH m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000				
H0 m	0,000									
Zeta	-12,00									
kv mm ²										

da Rohraußendurchmesser di Rohrrinnendurchmesser eps Rohrrauigkeit

l Teilstreckenlänge Zeta Einzelwiderstandsbeiwert kv Durchflusskoeffizient

HH Höhe am Ende der Teilstrecke bezogen auf H0 H0 Höhe am Anfang der Teilstrecke 1 (Bezugshöhe)

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an bzw. bei <0 von Umgebung:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tU °C	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0				
lR W/(m K)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0				
dD1 mm	100	100	100	100	100	100				
lD1 W/(m K)	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450				
dD2 mm	0	0	0	0	0	0				
lD2 W/(m K)										
aa W/(m ² K)	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0				

tU Umgebungstemperatur der Teilstrecke

lR Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand

dD1 Dämmschichtdicke der ersten Lage

lD1 Wärmeleitfähigkeit der ersten Lage

dD2 Dämmschichtdicke der zweiten Lage

lD2 Wärmeleitfähigkeit der zweiten Lage

aa Wärmeübergangskoeffizient an der Rohr- bzw Dämmschichtaußenseite

Ergebnisse:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms kg/s	5,0000	5,0000	3,0000	3,0000	5,0000	5,0000				
tein °C	300,0	298,3	296,9	294,8	315,5	314,1				
taus °C	298,3	296,9	294,8	292,7	314,1	312,6				
pein bar	15,000	14,635	14,498	14,447	14,396	14,252				
paus bar	14,635	14,498	14,447	14,396	14,252	14,106				
Dp Pa	-36516	-13719	-5063	-5058	-14465	-14576				
Gesamtdruckänderung:		-89397 Pa								
Q W	13477	13410	13327	13237	14148	14085				
mK kg/s										
w m/s	25,60	25,98	15,64	15,63	27,35	27,56				

tein Temperatur am Teilstreckenanfang

taus Temperatur am Teilstreckenende

pein Druck am Teilstreckenanfang

paus Druck am Teilstreckenende

Dp Druckänderung in der Teilstrecke

Q Wärmestrom von der Teilstrecke an die Umgebung

mK Kondensatausfall in der Teilstrecke

w mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Bild 8.5 Ausdruck der Eingaben und der Berechnungsergebnisse für Beispiel_4B (Ab- und Zuspisung)

Die Zuspisung von Heißdampf mit 350 °C bewirkt eine Anhebung der Teilstreckeneintrittstemperatur tein(5) um ca. 23 °C. Diese Temperaturänderung von taus(4) auf tein(5) folgt aus einer Enthalpiebilanz.

Im Weiteren wird das Ursprungsbeispiel bei Schwachlast (geringerer Durchfluss, niedrigere Dampfeintrittstemperatur) und bei geringerer Dämmdicke untersucht.

OBJEKTBEZEICHNUNG: F:\SD\FE_TGA\DRUCKVERLUSTE\BEISPIEL_4C\

Druckverluste einer Rohrströmung: Wasserdampf

Eintrittsparameter des Mediums:

Temperatur tein(1) 200,0 °C

Druck pein(1) 15,000 bar

Die Rohrleitung besitzt 6 hintereinander liegende Teilstrecken.

Massestrom ms am Eintritt i=1 und Massestromzuflüsse msz an den Eintritten i=2 bis i=10:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms/msz	kg/s	2,0000								
tz	°C									

Für i=1: ms Massestrom am Rohrleitungseintritt

Für i>1: msz Massestrom, der am Anfang der Teilstrecke i zusätzlich eintritt (bei negativem Vorzeichen austritt)
tz Temperatur des zusätzlich eintretenden Massestromes am Anfang der Teilstrecke i

Geometrische und strömungstechnische Kenngrößen:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
da	mm	219,1	219,1	219,1	219,1	219,1	219,1			
di	mm	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5	206,5			
eps	mm	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045			
l	m	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00			
HH	m	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000			
H0	m	0,000								
Zeta	-	12,00								
kv	mm ²									

da Rohraußendurchmesser

di Rohrinneindurchmesser

eps Rohrrauigkeit

l Teilstreckenlänge

Zeta Einzelwiderstandsbeiwert

kv Durchflusskoeffizient

HH Höhe am Ende der Teilstrecke bezogen auf H0

H0 Höhe am Anfang der Teilstrecke 1 (Bezugshöhe)

Wärmetechnische Kenngrößen zur Berechnung des Wärmeflusses an bzw. bei <0 von Umgebung:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
tU	°C	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0	-15,0			
lR	W/(m K)	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0	50,0			
dD1	mm	50	50	50	50	50	50			
lD1	W/(m K)	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450	0,0450			
dD2	mm	0	0	0	0	0	0			
lD2	W/(m K)									
aa	W/(m ² K)	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0	23,0			

tU Umgebungstemperatur der Teilstrecke

lR Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand

dD1 Dämmschichtdicke der ersten Lage

lD1 Wärmeleitfähigkeit der ersten Lage

dD2 Dämmschichtdicke der zweiten Lage

lD2 Wärmeleitfähigkeit der zweiten Lage

aa Wärmeübergangskoeffizient an der Rohr- bzw Dämmschichtaußenseite

Ergebnisse:

i=	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ms	kg/s	2,0000	1,9999	1,9944	1,9888	1,9833	1,9778			
tein	°C	200,0	198,2	198,1	198,1	198,0	198,0			
taus	°C	198,2	198,1	198,1	198,0	198,0	197,9			
pein	bar	15,000	14,955	14,937	14,920	14,903	14,886			
paus	bar	14,955	14,937	14,920	14,903	14,886	14,869			
Dp	Pa	-4544	-1718	-1711	-1703	-1696	-1689			
Gesamtdruckänderung:			-13061 Pa							
Q	W	15514	15448	15443	15439	15435	15431			
mK	kg/s	0,0001	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055			
w	m/s	7,89	7,88	7,87	7,85	7,84	7,83			

tein Temperatur am Teilstreckenanfang

taus Temperatur am Teilstreckenende

pein Druck am Teilstreckenanfang

paus Druck am Teilstreckenende

Dp Druckänderung in der Teilstrecke

Q Wärmestrom von der Teilstrecke an die Umgebung

mK Kondensatausfall in der Teilstrecke

w mittlere Geschwindigkeit in der Teilstrecke

Bild 8.6 Ausdruck der Eingaben und der Berechnungsergebnisse für Beispiel_4C (Schwachlast)

Die Dampfleitung wird mit schwach überhitztem Dampf (15 bar (abs); $t_{\text{Sattdampf}} = 198,3 \text{ °C} < 200 \text{ °C}$) betrieben. Bereits in der ersten Teilstrecke beginnt die Kondensatbildung.

Literaturverzeichnis

- [1] Glück, B.: Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung; Druckverluste (Reihe: Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1988, ISBN 3-345-00222-1
<http://www.berndglueck.de/Druckverluste>
- [2] Glück, B.: Zustands- und Stoffwerte; Verbrennungsrechnung (Reihe: Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1986, ISBN 3-345-00228-0; Berlin: Marhold-Verlag 1986
2. überarbeitete und erweiterte Auflage
Berlin: Verlag für Bauwesen 1991, ISBN 3-345-00487-9
<http://www.berndglueck.de/Stoffwerte>
- [3] Glück, B.: Heizen und Kühlen mit Niedrigexergie (LowEx) – Innovative Wärmeübertragung und Wärmespeicherung.
Forschungsbericht der Fa. Clina Heiz- und Kühlelemente GmbH Berlin und der Westsächsischen Hochschule Zwickau (FH); Projektträger Jülich 2008
eBook, 302 Seiten plus 6 Rechenprogramme und 7 Testbeispiele
<http://www.berndglueck.de/LowEx>
- [4] VDI-Wärmeatlas, 10. Auflage. Berlin und Heidelberg: Springer-Verlag 2006, Abschnitt Dca
- [5] Wärmeübertragung; Wärmeabgabe von Raumheizflächen und Rohren (Reihe: Bausteine der Heizungstechnik). Berlin: VEB Verlag für Bauwesen 1989, ISBN 3-345-00310-4
2. Auflage Berlin: Verlag für Bauwesen 1990, ISBN 3-345-00426-7
<http://www.berndglueck.de/Waermeuebertragung>

Anhang

Im Buch: "Hydrodynamische und gasdynamische Rohrströmung – Druckverluste" wird von zwei grundlegenden Energiegleichungen ([1], Seiten 25 bis 27) ausgegangen, die dann im Weiteren analytisch und numerisch gelöst werden. Bezüglich ihrer Herkunft gab und gibt es von interessierten Lesern wiederholt Anfragen. Nachfolgend seien deshalb diese beiden Gleichungen detailliert abgeleitet. Sie entstammen dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik. Im Gegensatz zum Buch werden die heute üblichen Formelbuchstaben der Thermodynamik verwendet, so w für die spezifische Arbeit, c für die Geschwindigkeit und T für die Temperatur. Im Buch stehen dafür l , w , t .

Der 1. Hauptsatz der Thermodynamik formuliert in spezieller Weise den Energieerhaltungssatz, wobei typische technische Systeme zur Energieumwandlung berücksichtigt werden.

Formulierung des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik (Energieerhaltungssatz):

In einem abgeschlossenen System ist die Summe aller Energien konstant. (R. Mayer und J. P. Joule 1842, H. v. Helmholtz 1847)

A 1. Hauptsatz für stoffdichte Systeme

Die Zufuhr an Wärme q , Volumenänderungsarbeit w_v und dissipativer Energie w_R bewirkt eine entsprechende Erhöhung der inneren Energie u , sodass der Energieerhaltungssatz erfüllt ist:

$$q_{12} + w_{v,12} + w_{R,12} = u_2 - u_1 \quad (\text{A1})$$

Die Darstellung bezieht sich auf die spezifischen Größen. Diese gelten beispielsweise pro kg Stoffmasse m , wie $q_{12} = Q_{12} / m$ usw.

Die innere Energie u ist eine kalorische Zustandsgröße, die den "Energievorrat" des thermodynamischen Systems kennzeichnet.

Für die gesamte Volumenänderungsarbeit gilt:

$$W_{v,12} = - \int_1^2 p \, dV. \quad (\text{A2})$$

Im nebenstehenden Bild sind die Zusammenhänge für einen Zylinder mit reibungsfrei beweglichen Kolben, auf den die Kraft F wirkt, veranschaulicht. Das Integral ist < 0 und somit die Volumenänderungsarbeit $W_{v,12} > 0$, d. h., die Arbeit ist dem System zuzuführen.

Die Division durch die Masse m ergibt mit dem spezifischen Volumen $v = V/m$ die spezifische Volumenänderungsarbeit.

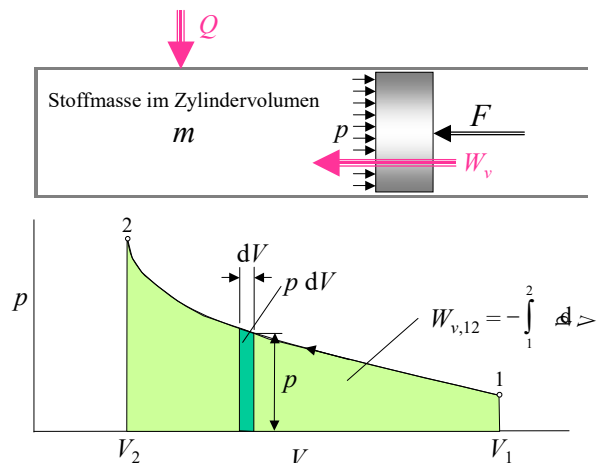
$$w_{v,12} = - \int_1^2 p \, dv. \quad (\text{A3})$$

Gl. (A1) kann für eine differenziell kleine Zustandsänderung geschrieben werden:

$$dq + dw_v + dw_R = du \quad (\text{A4})$$

bzw.

$$dq - p \, dv + dw_R = du. \quad (\text{A5})$$



Diese Zustandsänderungen sind bei Kolbenmaschinen im Zeitraum geschlossener Ein- und Austrittsventile technisch sehr bedeutungsvoll.

Hinweis:

Erfolgt die Zustandsänderung reversibel, dann ist $dw_R = 0$. Die Irreversibilität wirkt immer wie eine Wärmezufuhr während der Zustandsänderung, d. h. für die Reibungsarbeit gilt stets $dw_R > 0$.

B 1. Hauptsatz für stoffdurchlässige (offene) Systeme mit stationärem Durchfluss

Bei Energieumwandlungsmaschinen mit einem kontinuierlichen, stationärem Stoffdurchsatz ist es zweckmäßig die Gl. (A1) so umzuformen, dass eine rationelle Nutzung für diesen Anwendungsfall möglich wird. Eine symbolische Darstellung zeigt das untenstehende Bild. Da es sich am Stoffeintritt und -austritt um unterschiedliche Zustandsgrößen handelt, sind die spezifischen Energien e_1 und e_2 zu berücksichtigen. Sie setzen sich jeweils aus der inneren Energie, der kinetischen Energie und der potenziellen Energie zusammen. Es gelten:

$$e_1 = u_1 + \frac{c_1^2}{2} + g z_1; \quad e_2 = u_2 + \frac{c_2^2}{2} + g z_2. \quad (\text{A6})$$

Der Zusammenhang zwischen den Energieströmen und den spezifischen Energien ist gegeben durch $\dot{E}_1 = \dot{m} e_1$; $\dot{Q} = \dot{m} q$ usw.

Eine besondere Ableitung ist für die am System vollzogene Leistung (Arbeit / Zeit) erforderlich. Während der Zeit $\Delta \tau$ wird die sogenannte technische Arbeit (auch Wellenarbeit genannt)

$\dot{W}_t \Delta \tau$ dem System zugeführt und gleichzeitig tritt auch Volumenänderungsarbeit auf. So wird am Eintritt durch das Einschieben des Volumenelementes ΔV_1 die Volumenänderungsarbeit $p_1 \Delta V_1$ dem System zugeführt und am Austritt entsprechend die Volumenänderungsarbeit $p_2 \Delta V_2$ abgeführt. Im betrachteten stationären Fall gelten $\Delta V_1 = v_1 \dot{m} \Delta \tau$ und $\Delta V_2 = v_2 \dot{m} \Delta \tau$. Damit kann die Gesamtleistung P benannt werden, wobei die Reibungsarbeit in \dot{W}_t eingeschlossen ist:

$$P = \dot{W}_t + p_1 v_1 \dot{m} - p_2 v_2 \dot{m}. \quad (\text{A7})$$

Die Energiebilanz mit den spezifischen Größen analog Gl. (A1) lautet somit:

$$q_{12} + w_{t,12} + p_1 v_1 - p_2 v_2 = e_2 - e_1$$

bzw.

$$q_{12} + w_{t,12} = (u_2 + p_2 v_2) + \frac{c_2^2}{2} + g z_2 - (u_1 + p_1 v_1) - \frac{c_1^2}{2} - g z_1. \quad (\text{A8})$$

Als Abkürzung wurde in der Thermodynamik die Zustandsgröße *spezifische Enthalpie*

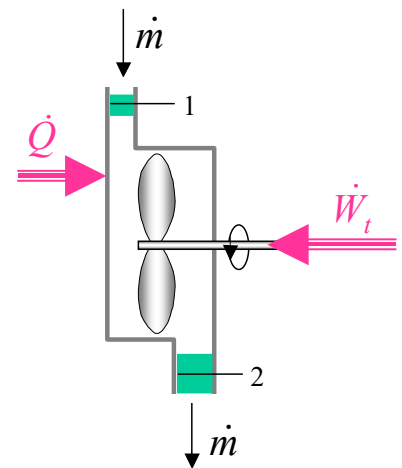
$$h = u + p v \quad (\text{A9})$$

eingeführt, wodurch sich Gl. (A8) vereinfacht:

$$q_{12} + w_{t,12} = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1). \quad (\text{A10})$$

Diese Gleichung lautet in differenzieller Form:

$$dq + dw_t = dh + c dc + g dz. \quad (\text{A11})$$



Sind die Änderungen der kinetischen und der potenziellen Energie vernachlässigbar, dann gilt:

$$dq + dw_t = dh. \quad (\text{A12})$$

Man ist bestrebt die technische Arbeit in Analogie zur Volumenänderungsarbeit zu veranschaulichen. Aus diesem Grund werden die Gln. (A1) und (A8) gegenübergestellt, wobei im letzten Fall die Änderungen der kinetischen und potenziellen Energie vernachlässigt werden:

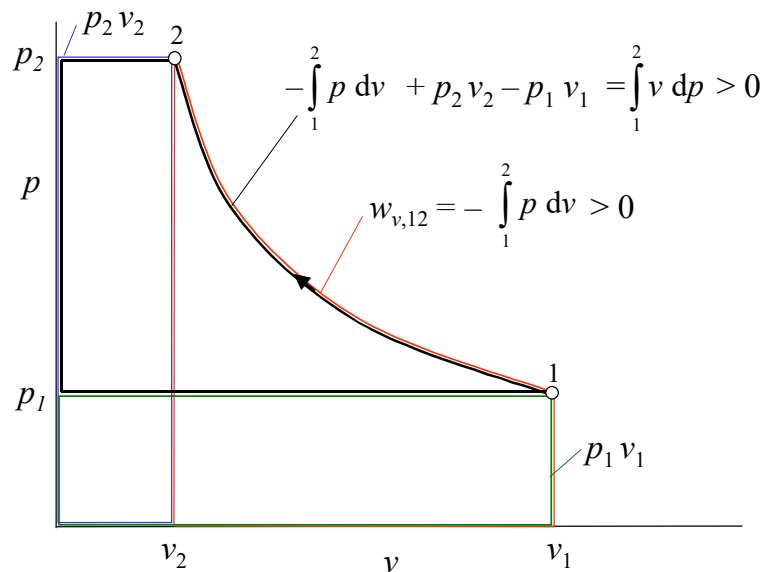
$$q_{12} + w_{v,12} + w_{R,12} = u_2 - u_1 \quad q_{12} + w_{t,12} = u_2 + p_2 v_2 - u_1 - p_1 v_1.$$

Die Substitution liefert

$$w_{v,12} + w_{R,12} = w_{t,12} - p_2 v_2 + p_1 v_1, \text{ womit nach Einsetzen von Gl. (A3)}$$

$$w_{t,12} = - \int_1^2 p \, dv + p_2 v_2 - p_1 v_1 + w_{R,12} = \int_1^2 v \, dp + w_{R,12} \quad (\text{A13})$$

folgt, was der Flächenvergleich in der nebenstehenden Skizze beweist.



Die vergleichende Ableitung kann auch ausgehend von den Gln. (A5) und (A12) erfolgen:

$$dq + dw_R - p \, dv = du \quad \text{und} \quad dq + dw_t = dh \quad \text{liefert} \quad du + p \, dv - dw_R = dh - dw_t;$$

$$\text{mit } dh = du + d(p \, v) \quad \text{folgt} \quad p \, dv - dw_R = d(p \, v) - dw_t = p \, dv + v \, dp - dw_t \quad \text{und schließlich} \\ dw_t = v \, dp + dw_R \quad \text{bzw.}$$

$$w_{t,12} = \int_1^2 v \, dp + w_{R,12}. \quad (\text{A14})$$

Werden die Änderungen der kinetischen und der potenziellen Energie berücksichtigt, so gilt:

$$w_{t,12} = \int_1^2 v \, dp + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + w_{R,12}. \quad (\text{A15})$$

C Anwendung auf Stromröhren

Es werden Stromröhren betrachtet, die keine Pumpen, Turbinen oder Ventilatoren enthalten, so dass keine technische Arbeit zu- oder abgeführt wird. Somit gelten gemäß Gl. (A10) und Gl. (A15)

$$q_{12} = h_2 - h_1 + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (\text{A16})$$

$$\int_1^2 v \, dp + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + w_{R,12} = 0. \quad (\text{A17})$$

Anmerkungen:

- Gl. (A16) enthält nur Größen, die an den Grenzen des Strömungskanals bestimmbar sind. Die Reibungsverluste finden bei der Gesamtbilanz (äußere Bilanzierung) keine Beachtung. Die Bilanzgleichung wird bei der praktischen Berechnung zur Bestimmung der Austrittstemperatur t_2 am Ende der Stromröhre verwendet.
- Gl. (A17) enthält nur mechanische – also keine kalorischen – Größen. Die Lösung der Gleichung ist vom Zustandsverlauf zwischen dem Eintritt 1 und dem Austritt 2 abhängig. Das Integral und die spezifische Reibungsarbeit sind mit praktikablen Näherungen zu lösen. Hierzu existieren unterschiedliche Abstraktionsstufen. Die Gleichung dient in praxi zur Berechnung des Austrittsdruckes p_2 .

C1 Eindimensionale Theorie

Die eindimensionale Betrachtung – Stromfadentheorie – geht von *konstanten Zustandsgrößen im Strömungsquerschnitt* aus, wobei die jeweilige Zustandsgröße dem mittleren Querschnittswert entspricht. So nimmt man beispielsweise eine Kolbenströmung mit der Geschwindigkeit c an.

Strömung eines inkompressiblen Fluids

Die Gl. (A17) nimmt dann mit

$\int_1^2 v \, dp = v (p_2 - p_1)$ die folgende Form an:

$$v (p_2 - p_1) + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g (z_2 - z_1) + w_{R,12} = 0. \quad (\text{A18})$$

Mit $\rho = 1/v$ und Beachten des Reibungsdruckverlustes $\Delta p_R = \rho w_{R,12}$ in der Stromröhre folgt:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} c_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} c_2^2 + \rho g z_2 + \Delta p_R. \quad (\text{A19})$$

In Abwandlung der Originalgleichung sprechen manche Autoren auch von der *reibungsbehafteten Bernoulli-Gleichung*.

Für den *reibungsfreien Fall* $\Delta p_R = \rho w_{R,12} = 0$ ergibt sich die bekannte *Bernoulli-Gleichung*:

$$p_1 + \frac{\rho}{2} c_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{\rho}{2} c_2^2 + \rho g z_2. \quad (\text{A20})$$

Strömung eines kompressiblen Fluids

Wiederum ist von Gl. (A17) auszugehen, wobei im allgemeinen Fall eine polytrope Zustandsänderung (Polytropenexponent n)

$\frac{v}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p} \right)^{\frac{1}{n}}$ angenommen wird. Damit kann für das Integral

$\int_1^2 v \, dp = v_1 p_1^{\frac{1}{n}} \int_1^2 p^{-1/n} \, dp = v_1 p_1 \frac{n}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$ geschrieben werden, woraus folgt:

$$v_1 p_1 \frac{n}{n-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g (z_2 - z_1) + v_m \Delta p_{R,12} = 0. \quad (\text{A21})$$

Die wegabhängige Reibungsarbeit wurde durch das Produkt aus dem mittleren spezifischen Volumen v_m und dem Reibungsdruckverlust zunächst formal ersetzt.

In Analogie zur Gl. (A19) könnte man hier von der *reibungsbehafteten Bernoulli-Gleichung der Gasdynamik* sprechen.

Für den *reibungsfreien adiabaten* – also dem *isentropen* – Vorgang folgt die bekannte *Bernoulli-Gleichung der Gasdynamik*, wobei κ den Isentropenexponenten darstellt:

$$v_1 p_1 \frac{\kappa}{\kappa-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right] + \frac{c_2^2 - c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) = 0. \quad (\text{A22})$$

C2 Verbesserte eindimensionale Theorie

Die Konstanz der Zustandsparameter über den Querschnitt ist in der Realität nicht gegeben, sondern die Geschwindigkeit und die Temperatur zeigen jeweils ein radiales Profil.

Das Temperaturprofil ist dabei vom Art des Wärmeaustausches am Umfang der Stromröhre abhängig (Wärmezufuhr- oder -abfuhr). Da das Temperaturprofil lediglich die Größe der Stoffwerte beeinflusst, wird näherungsweise $t(r) = \text{const}$ angenommen (siehe [1], Seite 18).

Das Geschwindigkeitsprofil $c(r)$ hat auf die Größe der kinetischen Energie einen relativ großen Einfluss. Dies kann durch einen Korrekturfaktor K_E für die kinetische Energie, die aus der mittleren Geschwindigkeit folgt, Beachtung finden (siehe [1], Seiten 16 und 21). Die Gl. (A19) würde dann beispielsweise die Form

$$p_1 + K_{E,1} \frac{\rho}{2} c_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + K_{E,2} \frac{\rho}{2} c_2^2 + \rho g z_2 + \Delta p_R. \quad (\text{A23})$$

annehmen, wenn die Geschwindigkeiten c_1 und c_2 weiterhin die *Mittelwerte* über den Querschnitten verkörpern. Der Korrekturfaktor beträgt beispielsweise bei einer Rohrströmung im laminaren Bereich $K_E = 2$, bei einer turbulenten Strömung ist er nach NUNNER vom Rohrreibungsbeiwert λ abhängig. Im praktisch häufigsten Bereich gilt $K_E \approx 1,06$. Detaillierte Einzelheiten siehe [1], Seiten 19 bis 21.

D Praktische Berechnungsvorschläge für Rohrströmungen (Durchmesser $d = \text{const}$)

Berücksichtigt man den Korrekturfaktor K_E für die kinetische Energie, so nehmen die Gln. (A16) und (A17) die folgenden Formen an:

$$q_{12} = h_2 - h_1 + \frac{K_{E,2} c_2^2 - K_{E,1} c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (\text{A24})$$

$$\int_1^2 v \, dp + \frac{K_{E,2} c_2^2 - K_{E,1} c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + w_{R,12} = 0. \quad (\text{A25})$$

Zur Berechnung der Austrittstemperatur am Teilstreckenende kann näherungsweise mit der mittleren spezifischen Wärmekapazität $c_{p,m}$ gearbeitet werden, sodass aus Gl. (A24)

$$T_2 = T_1 + \frac{1}{c_{p,m}} \left(q_{12} - \frac{K_{E,2} c_2^2 - K_{E,1} c_1^2}{2} - g(z_2 - z_1) \right) \quad (\text{A26})$$

folgt. Um die Gl. (A25) praktikabel zu lösen, sind für das Integral und für die Reibungsarbeit Näherungsansätze aufzustellen.

$$v_m(p_2 - p_1) + \frac{K_{E,2}c_2^2 - K_{E,1}c_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) + v_m \left(\lambda_m \frac{l}{d} + \zeta \right) \left(\frac{\rho}{2} c^2 \right)_m = 0. \quad (A27)$$

Hierbei verkörpert v_m zunächst einen formalen Mittelwert, der noch zu präzisieren ist. Die Reibungsarbeit wurde durch den Ansatz für die übliche Druckverlustberechnung ersetzt, wobei gelten: λ Rohrreibungsbeiwert, l Rohrlänge, d Rohrrinnendurchmesser, ζ Einzelwiderstandsbeiwert, ρ Dichte. Weiterhin gilt für den Staudruck $S = (\rho/2) c^2$.

Für ein **inkompressibles Fluid** kann man in einfacher Weise mit dem konstanten spezifischen Volumen $v = 1/\rho = \text{const}$ formulieren:

$$T_2 = T_1 + \frac{q_{12} - g(z_2 - z_1)}{c_{p,m}} \quad (A28)$$

$$p_2 = p_1 - g\rho(z_2 - z_1) - \left(\lambda \frac{l}{d} + \zeta \right) \frac{\rho}{2} c^2. \quad (A29)$$

Für ein **kompressibles Fluid** gilt für die Temperaturberechnung Gl. (A26) unverändert, während es zur Lösung von Gl. (A27) weiterer Untersuchungen bedarf.

Aus $\int_1^2 v \, dp = v_m(p_2 - p_1)$ folgt die Definitionsgleichung für den Mittelwert $v_m = \frac{\int_1^2 v \, dp}{p_2 - p_1}$. Aus-

föhrliche Untersuchungen in [1], Seiten 150ff. ergaben mit dem **Druckverhältnis** $\pi = p_2/p_1$ die für isotherme und polytrope Zustandsänderungen gültige, sehr gute Näherung

$$v_m = \sqrt{v_1 v_2} \frac{\ln \pi}{\sqrt{\pi} - \frac{1}{\sqrt{\pi}}} \quad \text{mit dem Grenzwert für } \pi = 1: v_m = \sqrt{v_1 v_2}. \quad (A30)$$

Für den mittleren Staudruck wurde in [1], Seite 155ff. abgeleitet:

$$S_m = \left(\frac{\rho}{2} c^2 \right)_m = \left(\frac{c^2}{2v} \right)_m = \frac{c_1 c_2}{v_1 + v_2}. \quad (A31)$$

Damit ergibt sich für den Austrittsdruck aus Gl. (A27)

$$p_2 = p_1 - \frac{K_{E,2}c_2^2 - K_{E,1}c_1^2}{2 v_m} - \frac{g(z_2 - z_1)}{v_m} - \left(\lambda_m \frac{l}{d} + \zeta \right) \frac{c_1 c_2}{v_1 + v_2}. \quad (A32)$$

Für die Stoffwertberechnung ist der mittlere Druck über die Teilstreckenlänge von Interesse, wofür in [1], Seite 157ff. die folgende Näherungsgleichung abgeleitet wurde:

$$p_m = \frac{2}{3} \frac{1 - \pi^3}{1 - \pi^2} p_1 \quad \text{mit dem Grenzwert für } \pi = 1: p_m = p_1. \quad (A33)$$