

## Hydraulische Rohrrauigkeit von Stahlmediumrohren für Fernwärmenetze

Walter Winter\*, Franz Promitzer\*, Roman Klasinc\*\*, Ingwald Obernberger\* \*\*\*

\*Institut für Grundlagen der Verfahrenstechnik und Anlagentechnik, Technische Universität Graz,  
Inffeldgasse 25 A-8010 Graz, Österreich

\*\* Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz,  
Stremayrgasse 10, A-8010 Graz, Österreich

\*\*\* Ingenieurbüro BIOS, A-8010 Graz, Sandgasse 47

Die hydraulische Rohrrauigkeit stellt einen wesentlichen Kennwert zur Bestimmung des Druckverlustes von Rohren in geraden Rohrstrrecken dar. Zur Druckverlustberechnung im Rahmen von Netzauslegungen und Netzberechnungen werden derzeit noch immer veraltete Werte für die hydraulische Rohrrauigkeit verwendet. Um, entsprechend den verbesserten Herstellungsmethoden in der Rohrfertigung, sowie verbesserter Wasseraufbereitung in den Fernwärmesystemen, aktuelle Werte für diese wichtige Größe zur Verfügung stellen zu können, wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Optimierte Dimensionierung und Betrieb von Rohrleitungssystemen für dezentrale Biomasseheizwerke“ umfangreiche Messungen an Stahlrohren durchgeführt

### Abstract

Investigations in biomass district heating systems have shown the hydraulic pressure losses of pipe networks to be significantly lower than the values obtained from calculations. This affects the determination of pipe dimensions, since the calculated pressure losses represent a main basis for the design of pipe networks. Incorrect pressure drop values lead to oversized pipes, which increases investment costs and heat loss resulting from large pipe surfaces. Moreover, the oversizing of pumps raises the operating costs because the pump does not work efficiently.

The hydraulic roughness is one of the main factors for calculating pressure drop in straight trains of pipes. Most values (0.04-0.02 mm) found in the available literature are based on investigations of steel pipes conducted some 20 years ago. Considering the improvement of manufacturing technology it is highly probable that state-of-the-art steel pipes are smoother than those examined in the current literature. Extensive investigations were performed to obtain new and secured values for these important parameters.

The test runs were performed on two trains of steel pipes with different diameters (DN 80, DN 65). The pressure drop of the test tracks was measured and the hydraulic roughness calculated under varying flow conditions (temperature levels: 50, 90, 120°C; flow velocities: 0.5 to 5.5 m/s). The results obtained were significantly lower than the respective values in the literature, even taking into account all possible measurement errors.

On the basis of the results obtained from these investigations a hydraulic roughness of 0.01 mm is recommended for calculating the pressure drop in straight trains of steel pipes.

Keywords: Hydraulic roughness, steel pipes, pressure drop, district heating, network of pipes

### Kurzfassung

Aus Untersuchungen an Biomassenahwärmenetzen geht hervor, daß die tatsächlichen hydraulischen Druckverluste der Rohrnetze eindeutig geringer sind, als aufgrund von Berechnungen zu erwarten. Diese fehlerhaften Berechnungen führen zu Überdimensionierungen der Rohre und damit zu einer Erhöhung der Investitionskosten. Weiters führen die vergrößerten Rohroberflächen zu erhöhten Wärmeverlusten und somit zu einem Ansteigen der Betriebskosten.

Einer der wesentlichsten Faktoren für die Berechnung des Druckverlustes von geraden Rohrleitungen ist die hydraulische Rohrrauigkeit. Die Werte für diesen Faktor (0.04-0.02 mm) stammen aus älteren Untersuchungsergebnissen. Aufgrund der in der Zwischenzeit wesentlich verbesserten Produktionsmethoden für Stahlrohre kann davon ausgegangen werden, daß sich ebenso die Oberflächenqualität verbessert hat und die Rohre daher eine geringere hydraulische Rohrrauigkeit aufweisen.

Zur Ermittlung abgesicherter Werte der hydraulische Rohrrauigkeit für heute eingesetzten Stahlrohre wurden umfangreiche Versuche durchgeführt. Bei den Messungen wurde der Druckverlust an 2 Rohrsträngen unterschiedlichen Durchmessers (DN 80, DN 65) bei variierenden Strömungsbedingungen (Temperatur: 50, 90, 120°C; Strömungsgeschwindigkeiten: 0,5 – 5,5 m/s) untersucht. Auf Basis der erzielten Ergebnisse wurde die

hydraulische Rohrrauhigkeit der untersuchten Rohrstrecken ermittelt. Im Vergleich mit den Literaturwerten zeigte sich dabei unter Berücksichtigung aller möglichen Meßfehler, daß die ermittelten Rohrrauhigkeiten signifikant unter den Literaturwerten lagen.

Für die Berechnung des Druckverlustes von geraden Stahlrohrleitungen kann aufgrund der Ergebnisse dieser Untersuchungen ein abgesicherter Wert von 0,01 mm angegeben werden.

Schlagworte: Hydraulische Rohrrauhigkeit, Druckverlust, Stahlrohre, Rohrnetz, Nahwärme, Fernwärme

## 1.1 Einleitung

Mit den in der einschlägigen Literatur [H. RECKNAGEL et al., 1998; VDI WÄRMEATLS, 1994] vorgeschlagenen Werte für die hydraulische Rohrrauhigkeit als Parameter zur Bestimmung des Druckverlust in geraden Rohrleitungen, werden deutlich zu hohe Werte errechnet. Dies geht aus umfangreichen Druckverlustmessungen und Betriebsdatenauswertungen an bestehenden Nahwärmenetzen hervor [I. OBERNBERGER et. al., 1995; I. OBERNBERGER, 1995b].

Der Grund dafür dürfte darin liegen, daß diese Parameter noch die schlechtere Oberflächenqualität alter Stahlrohre sowie die durch eine unzureichende Wasseraufbereitung bedingten Ablagerungen an den Rohrwänden, die in der Vergangenheit häufig auftraten, berücksichtigen. Trotz der deutlichen Abweichung zwischen errechneten und gemessenen Werten für den Druckverlust entsprechen diese Werte für die hydraulische Rohrrauhigkeit bei der Auslegung von Fernwärmenetzen noch immer dem aktuellen Stand der Technik, da diesbezüglich keine neueren Untersuchungen vorhanden sind.

Zu hohe errechnete Druckverluste führen zu Netzüberdimensionierungen und damit zu einer Erhöhung der Investitionskosten. Weiters bedeuten größere Rohrdurchmesser erhöhte Wärmeverluste der Rohrleitungen durch vergrößerte Oberflächen und somit auch eine Erhöhung der Betriebskosten. Da der tatsächlich vorhandene Druckabfall in den Rohrleitungen geringer als der berechnete ist, sind auch die Umwälzpumpen überdimensioniert und arbeiten ständig im Teillastbereich. Dadurch verschlechtert sich deren Wirkungsgrad (bis auf  $\frac{1}{5}$  der Normalwerte) und eine weitere Steigerung der Betriebskosten (durch Verluste an elektrischer Energie) ist die Folge.

## 1.2 Zielsetzung

Die hydraulische Rohrrauhigkeit ist jener Kennwert, welcher den Einfluß eines geraden Rohres auf den Druckverlust der Strömung in ihm beschreibt. Somit stellt die genaue Kenntnis dieses Parameters die Basis für die korrekte Berechnung des Druckverlustes einer derartigen Leitung dar.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, ist die hydraulische Rohrrauhigkeit von Stahlmediumrohren, wie sie derzeit für den Bau von Fernwärmenetzen verwendet werden, zu bestimmen.

Die Ergebnisse der Untersuchung sollen den Angaben in der Literatur gegenübergestellt und daraus Empfehlungswerte für die Berechnung des Druckverlustes von geraden Stahl- Rohrstrecken abgeleitet werden.

## 1.3 Methodik

### 1.3.1 Bestimmung der hydraulischen Rohrrauhigkeit

Ausgangspunkt einer Druckverlustberechnung für Strömungen von inkompressiblen Fluiden in geraden Rohren ist das in Gleichung 0-1 dargestellte quadratische Widerstandsgesetz.

$$\Delta P = \lambda_R * \frac{l}{D} * \frac{w^2 * \rho}{2}$$

**Gleichung 0-1:** Quadratisches Widerstandsgesetz zur Berechnung des Druckverlustes einer geraden Rohrstrecke

*Erläuterung:*  $\Delta P$ ...Druckverlust der Rohrstrecke;  $\lambda_R$ ...Rohrreibungsbeiwert;  $w$ ...Geschwindigkeit des Mediums;  $\rho$ ...Dichte des Mediums;  $D$ ...Durchmesser des Rohres;  $L$ ...Länge der Rohrstrecke

**Equation 1-1:** Pressure loss equation for straight pipes

*Abbreviations* :  $\Delta P$ ... pressure drop ;  $\lambda_R$ ...friction coefficient;  $w$ ...flow velocity;  $\rho$ ...density of the flow medium;  $D$ ...pipe diameter;  $L$ ... length of pipe train

Die Beschreibung des in dieser Gleichung enthaltenen Rohrreibungsbeiwertes  $\lambda_R$  geht auf die allgemeine Widerstandsformel von Colebrook und White [C. F. COLEBROOK, 1937] zurück (siehe Gleichung 0-2). Darin ist die Abhängigkeit des Rohrreibungsbeiwertes vom Strömungszustand und von der hydraulischen Rohrrauigkeit dargestellt. Die hydraulische Rohrrauigkeit  $k$  erfaßt die gesamte Rauigkeitswirkung des Rohres auf die Strömung [H. RICHTER, 1971] und stellt daher einen Hauptparameter zur Ermittlung des Druckverlustes dar.

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_R}} = -2 * \log \left[ \frac{2,51}{\text{Re} * \sqrt{\lambda_R}} + \frac{k}{3,72 * d} \right]$$

**Gleichung 0-2:** Allgemeine Widerstandsformel nach Colebrook und White [C. F. COLEBROOK, 1937] zur Bestimmung des Rohrreibungsbeiwertes

*Erläuterung:*  $\text{Re}$ ...Reynoldszahl;  $\lambda_R$  ...Rohrreibungsbeiwert;  $d$ ...Rohrdurchmesser;  $k$ ...hydraulische Rohrrauigkeit

**Equation 1-2:** Colebrook-White equation for the determination of the friction coefficient [C. F. COLEBROOK, 1937]

*Abbreviations:*  $\text{Re}$ ...Reynolds number;  $\lambda_R$  ... friction coefficient;  $d$ ... pipe diameter;  $k$ ...hydraulic roughness

Zur experimentellen Bestimmung der hydraulischen Rohrrauigkeit wurden an 2 Rohrsträngen mit unterschiedlichem Nenndurchmesser (DN 65, DN 80) Differenzdruckmessungen unter Variation der Strömungsbedingungen durchgeführt.

Die Variation der Strömungsbedingungen in den Meßstrecken (repräsentiert durch die Reynoldszahl) erfolgte einerseits durch Änderung der Durchflußgeschwindigkeiten (0,5 m/s bis 5,5 m/s) und andererseits durch Veränderung der Temperatur des fließenden Mediums (50°C, 90°C, 120°C). Auf diesem Wege wurde der Druckverlust über die Meßstrecken in einem Reynoldsbereich zwischen ca. 70.000 und 1.600.000 bestimmt.

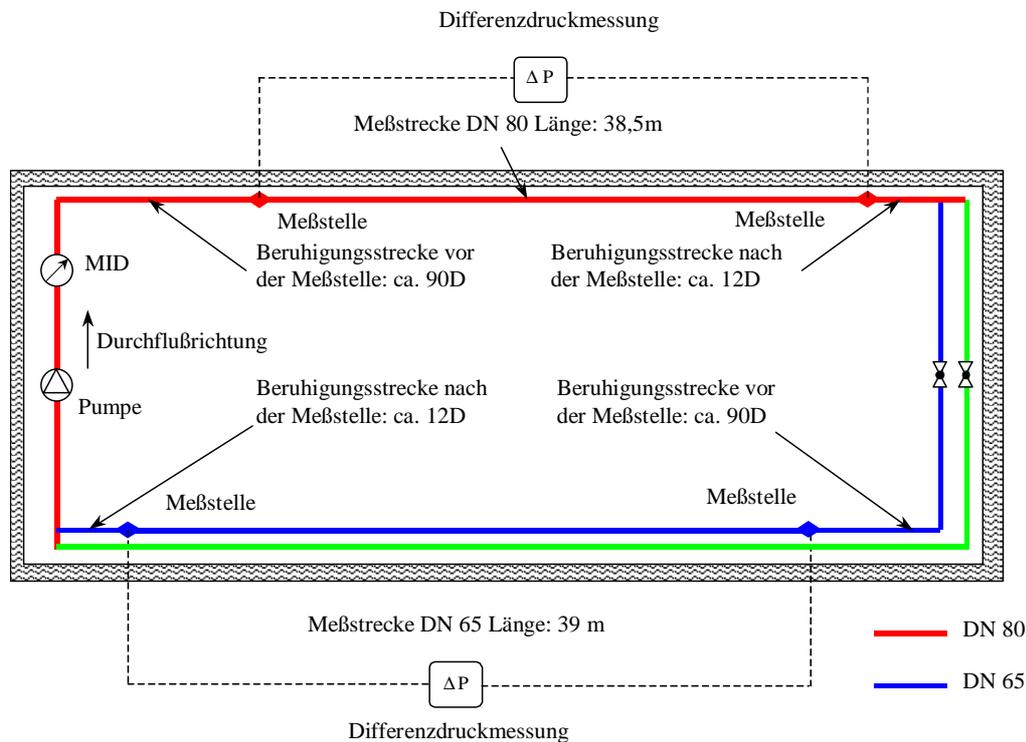
Ausgehend von diesen Meßergebnissen wurde in einem ersten Schritt der Verlauf des Rohrreibungsbeiwertes  $\lambda_R$  in Abhängigkeit der  $\text{Re}$ -Zahl ermittelt und daraus in einem zweiten Schritt mittels der Widerstandsformel von Colebrook und White (siehe Gleichung 0-2) die hydraulische Rohrrauigkeit der Meßstrecken bestimmt.

Zur statistischen Absicherung und zum Ausschluß möglicher systematischer Fehler wurden alle Messungen in 3-facher Wiederholung durchgeführt.

### 1.3.2 Versuchsaufbau

Die Testläufe wurden in einem ringförmig angeordneten Versuchsaufbau (siehe Abbildung 0-1) an 2 Meßstrecken mit unterschiedlichem Nenndurchmesser (DN 65 DN 80) durchgeführt. Bei den verwendeten Fernwärmerohren handelte es sich um mit Polyurethanschaum isolierte und mit Polyethylen ummantelte, längsgeschweißte Stahlmediumrohre. Um die praxisrelevante Verallgemeinerbarkeit der Untersuchungsergebnisse zu gewährleisten, wurden die Rohre für den Versuchsaufbau dem Lager des Rohrerstellers nach dem Zufallsprinzip entnommen. Die verarbeiteten Stahlmediumrohre entsprachen in Qualität und Oberflächenbeschaffenheit den branchenüblichen Standards (DIN 1626, DIN 2458), womit die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen für diesen Standard als verallgemeinerbar angesehen werden können.

Für eine genaue Messung des statischen Druckes in den Rohrleitungen ist eine beruhigte und vergleichmäßigte Strömung an den Meßstellen erforderlich. Aus diesem Grund wurden vor den Meßstellen Beruhigungsstrecken mit einer Länge von ca.  $90 * D$  und nach den Meßstellen Beruhigungsstrecken von ca.  $12 * D$  angeordnet [R. KLASINC, 1989; R. LOGAR, 1998].



**Abbildung 0-1:** Schematische Darstellung des Versuchsaufbaues zur Druckverlustmessung an geraden Rohrströcken

*Erläuterung:* MID ... Magnetisch-Induktives Durchflußmeßsystem

Verwendete Stahlrohre:  
 DN 80: Rohrmaterial St 37.0, Wandstärke 3,2 mm; Rohrinne Durchmesser 82,5 mm  
 DN 65: Rohrmaterial St 37.0, Wandstärke 3,2 mm; Rohrinne Durchmesser 69,7 mm

**Figure 0-1:** Scheme of the the test track for determining the pressure drop in straight pipe trains

*Explanation:* MID ... magneto-inductive measuring system

Investigated steel pipes:  
 DN 80: material St 37.0, wall thickness 3.2 mm; pipe diameter 82.5 mm  
 DN 65: material St 37.0, wall thickness 3.2 mm; pipe diameter 69.7 mm

### Verwendetes Wärmeträgermedium

Um möglichst äquivalente Bedingungen zur Praxis im Fernwärmenetzbetrieb herzustellen, wurde das verwendete Systemwasser mittels einer mobilen Deionisationsanlage entsalzt und pH-Wert-stabilisiert. Nach der Wasseraufbereitung betrug die Leitfähigkeit des Systemwassers 0,043 mS/cm bei einem pH-Wert von 9,6.

### Pumpen und Druckhaltesystem

Für die Aufrechterhaltung des Volumenstromes in der Versuchsanlage wurde eine Kreiselpumpe mit einer Förderleistung von 77 m<sup>3</sup>/h bei einer Förderhöhe von 62 m verwendet. Der Antrieb der Pumpe erfolgte durch einen Elektromotor mit einer Leistungsaufnahme von 22 kW. Der Durchfluß wurde über die Drehzahl der Pumpe mittels eines Frequenzumrichters gesteuert.

Zur Stabilisierung des Systemdruckes und zur Sicherung gegen auftretenden Überdruck wurde ein Expansionsgefäß mit einem Nennvolumen von 300 l verwendet. Die Aufbringung des Systemdruckes (4-5 bar) erfolgte über eine Pumpe mit einem Förderstrom von 4,5 m<sup>3</sup>/h bei einer Förderhöhe von 50 m.

#### *Temperaturregelung und Heizung*

Die Temperaturregelung im System erfolgte über zwei PID-temperaturgeregelte Heizelemente mit einer Nennleistung von jeweils 7,5 kW.

#### *Druckmessung*

Die Messung des Differenzdruckes zwischen den jeweiligen Druckmeßstellen an den Meßstrecken erfolgte durch intelligente Differenzdruckmeßumformer (ASK 800; Meßbereich: 60, 400, 2500 mbar; Firma Hartmann & Braun).

#### *Durchflußmessung*

Zur Durchflußmessung wurden magnetisch-induktive Durchflußmeßaufnehmer (MID) verwendet (Meßaufnehmer: IFS 4000, IFS 5000, Firma Krohne; Meßumformer IFC 080, Firma Krohne).

#### *Datenerfassung und Speicherung*

Die Meßdaten aus der Differenzdruckmessung, der Durchflußmessung sowie der Temperaturmessung wurden simultan über einen Multiplexer in ein digitales Multimeter zur Verarbeitung und Digitalisierung geleitet. Das Multimeter wurde in Echtzeit über einen Computer ausgelesen und die Meßdaten von einer Visualisierungssoftware dargestellt und gespeichert.

### 1.3.3 Fehleranalyse

Das angewandte Verfahren zu Bestimmung der hydraulischen Rohrrauhigkeit  $k$  ermöglicht keine Messung dieser Größe auf direktem Wege. Umgekehrt zum Verfahren der Druckverlustberechnung (siehe Abschnitt 1.3.1) wurde hier der Druckabfall auf einer Meßstrecke bei unterschiedlichen Strömungszuständen bestimmt, um daraus den Wert für die hydraulische Rohrrauhigkeit zu berechnen.

Als Meßgrößen standen zur Verfügung:

Differenzdruck,

Durchflußvolumenstrom,

Innendurchmesser der Stahlrohre,

Länge der Meßstrecke,

Temperatur des Mediums.

Die Ermittlung der hydraulischen Rohrrauhigkeit erfolgt aus einer funktionaler Beziehung zwischen diesen Meßgrößen laut Gleichung 0-3.

$$k = f(d_i, l, Q, dp, \rho, \nu)$$

**Gleichung 0-3:** Funktionale Beziehung für die Bestimmung der hydraulischen Rohrrauhigkeit

*Erläuterung:*  $d_i$ ...Innendurchmesser des Rohres;  $l$ ...Länge der Meßstrecke;  $Q$ ...gemessener Durchfluß;  $dp$ ...gemessene Druckdifferenz;  $\rho$ ...Dichte des strömenden Mediums;  $\nu$ ...kinematische Viskosität des strömenden Mediums;  $k$ ...hydraulische Rohrrauhigkeit

**Equation 0-3:** Function for determining the hydraulic roughness

*Abbreviations:*  $d_i$ ...pipe diameter;  $l$ ... length of pipe train;  $Q$ ...measured flow ;  $dp$ ...measured pressure drop;  $\rho$ ...density of the flow medium;  $\nu$ ...coefficient of viscosity ;  $k$ ...hydraulic roughness

Die Ermittlung des, aus den Meßungenauigkeiten der Meßgrößen resultierenden, Fehlers für die hydraulische Rohrrauigkeit wurde auf Basis des Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetzes [H. D. GELLISSEN et. al., 1995] durchgeführt.

Bezüglich der Fehlerbetrachtung sind bei diesem Verfahren 2 Fehlergrößen definiert:

Der „Worst-Case-Fehler“, im weiteren Verlauf der Arbeit mit „WC“ indiziert, ist als der maximal auftretende Fehler des Zielwertes definiert. Hier wird davon ausgegangen, daß alle möglichen Fehler zugleich und in der maximal möglichen Größe das Meßergebnis verfälschen.

Da in der Praxis nicht alle möglichen Fehler zur gleichen Zeit und in maximaler Größe auftreten, wurde von Gellissen der „Wahrscheinliche Fehler“, welcher in weiterer Folge mit „WF“ indiziert wird, definiert.

Gemäß dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz wird der, durch einen fehlerbehafteten Parameter in das Ergebnis einer funktionalen Beziehung eingebrachte Fehler, aus der Ableitung der funktionalen Beziehung nach diesem Parameter und der anschließenden Multiplikation mit dem Fehlerwert des Parameters errechnet.

Zur Bestimmung des Worst-Case Fehlers werden die Absolutwerte der auf diesem Wege berechneten Anteile am Gesamtfehler (Teilfehler) über alle Einflußparameter aufsummiert (siehe Gleichung 0-4) [H. D. GELLISSEN et. al., 1995]. Bei dem, sich daraus ergebenden, Fehlerwert  $\Delta k_{WC}$  handelt es sich um die größtmögliche durch die Meßfehler hervorrufbare Meßunsicherheit des Ergebniswertes (hier der hydraulischen Rohrrauigkeit). Der *wahre Wert* liegt mit Sicherheit innerhalb des, durch diesen Worst-Case Fehler um den gemessenen Wert, aufgespannten Bereiches.

$$\Delta k_{WC} = \left| \frac{\partial k}{\partial di} \Delta di \right| + \left| \frac{\partial k}{\partial l} \Delta l \right| + \left| \frac{\partial k}{\partial Q} \Delta Q \right| + \left| \frac{\partial k}{\partial dp} \Delta dp \right| + \left| \frac{\partial k}{\partial \rho} \Delta \rho \right| + \left| \frac{\partial k}{\partial \nu} \Delta \nu \right|$$

**Gleichung 0-4:** Gleichung für die Berechnung des Worst-Case Fehlers

*Erläuterung:* di...Innendurchmesser des Rohres; l...Länge der Meßstrecke; Q...gemessener Durchfluß; dp...gemessene Druckdifferenz;  $\rho$ ...Dichte des strömenden Mediums;  $\nu$ ...kinematische Viskosität des strömenden Mediums (Wasser); k...hydraulische Rohrrauigkeit

**Equation 0-4:** Equation for determining the worst-case error

*Abbreviations:* di...pipe diameter; l... length of pipe train ; Q...measured flow ; dp...measured pressure drop;  $\rho$ ...density of the flow medium;  $\nu$ ...coefficient of viscosity ; k...hydraulic roughness

Unter der Annahme der statistischen Unabhängigkeit aller auftretenden Fehler errechnet sich der *wahrscheinliche Fehler* aus der geometrischen Addition der Teilfehler (siehe Gleichung 0-5) [H. D. GELLISSEN et. al., 1995].

$$\Delta k_{WF} = \sqrt{\left( \frac{\partial k}{\partial di} \Delta di \right)^2 + \left( \frac{\partial k}{\partial l} \Delta l \right)^2 + \left( \frac{\partial k}{\partial Q} \Delta Q \right)^2 + \left( \frac{\partial k}{\partial dp} \Delta dp \right)^2 + \left( \frac{\partial k}{\partial \rho} \Delta \rho \right)^2 + \left( \frac{\partial k}{\partial \nu} \Delta \nu \right)^2}$$

**Gleichung 0-5:** Gleichung für die Berechnung des Wahrscheinlichen Fehlers

*Erläuterung:* di...Innendurchmesser des Rohres; l...Länge der Meßstrecke; Q...gemessener Durchfluß; dp...gemessene Druckdifferenz;  $\rho$ ...Dichte des strömenden Mediums;  $\nu$ ...kinematische Viskosität des strömenden Mediums (Wasser); k...hydraulische Rohrrauigkeit

**Equation 0-5:** Equation for determining the probable error

*Abbreviations:* di...pipe diameter; l... length of pipe train ; Q...measured flow ; dp...measured pressure drop;  $\rho$ ...density of the flow medium;  $\nu$ ...coefficient of viscosity ; k...hydraulic roughness

### 1.4 Ergebnisse

Experimentelle Untersuchungen, zum Beispiel von Nikuratse [J. NIKURATSE, 1931], haben gezeigt, daß mit zunehmender Turbulenz (höhere Reynoldszahlen) der Widerstandsbeiwert  $\lambda_R$  für ein Rohr konstant bzw. unabhängig vom Strömungszustand wird. Diesem Effekt trägt auch Gleichung 0-2 nach Colebrook und White [C. F. COLEBROOK, 1937] Rechnung. Durch die Verringerung des Einflusses der Reynoldszahl auf die errechnete hydraulische Rohrrauigkeit wird somit auch die Auswirkung des durch die Reynoldszahl eingebrachten Fehlers geringer. Bei der Analyse der Ergebnisse konnte dieser Effekt nachgewiesen werden, da mit zunehmender Reynoldszahl die Fehlerbereiche immer kleiner wurden (siehe Abbildung 0-2 und Abbildung 0-3). Neben dem Verlauf der Meßergebnisse sind auch die WC-, und WF-Fehlerbereiche dargestellt.

Daraus kann abgeleitet werden, dass die berechnete hydraulische Rohrrauigkeit bei der größten Reynoldszahl den Wert mit der größten Genauigkeit liefert. Die größten Reynoldszahlen werden bei den höchsten Temperaturen erzielt. Daher kann die errechnete hydraulische Rohrrauigkeit bei der größten Strömungsgeschwindigkeit der bei 120°C durchgeführten Messungen als das am besten abgesicherte Ergebnis angesehen werden (Tabelle 0-1).

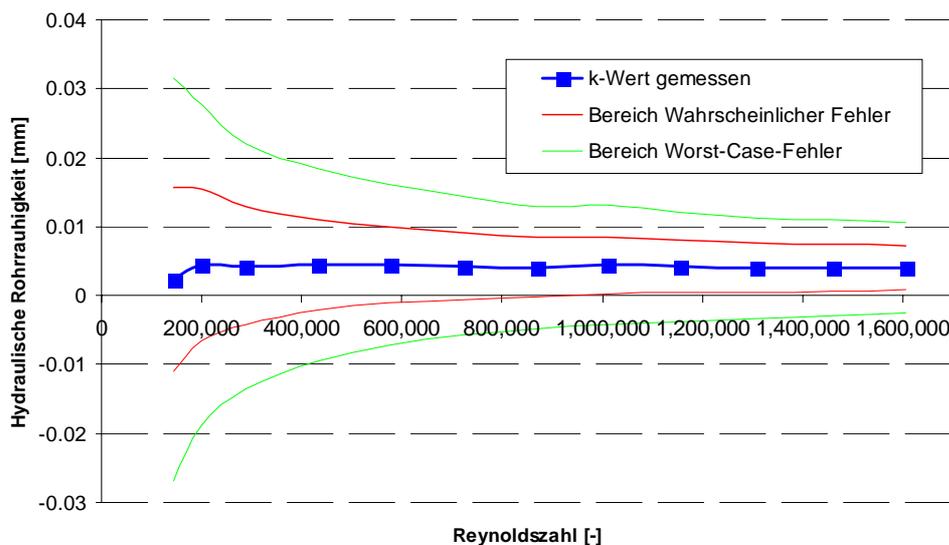
|       | $k_{erm}$<br>[mm] | $k_{WC}$<br>[mm] |
|-------|-------------------|------------------|
| DN 65 | 0,004             | 0,011            |
| DN 80 | 0,002             | 0,009            |

**Tabelle 0-1:** Wert der anhand der durchgeführten Messungen errechneten hydraulischen Rohrrauigkeit  $k$  für die untersuchten Rohrdimensionen

*Erläuterung:*  $k_{erm}$ ...anhand der durchgeführten Messungen errechneter Wert für die hydraulische Rohrrauigkeit  $k$  der vermessenen Rohrdimensionen;  $k_{WC}$ ...der nach der Worst-Case-Fehlerrechnung maximal mögliche Wert für  $k$ .

**Table 0-1:** Hydraulic roughness values obtained for the pipe dimensions investigated

*Abbreviations:*  $k_{erm}$ ... hydraulic roughness value obtained for the investigated steel pipes;  $k_{WC}$ ...highest possible hydraulic roughness value, taking into account the worst case error

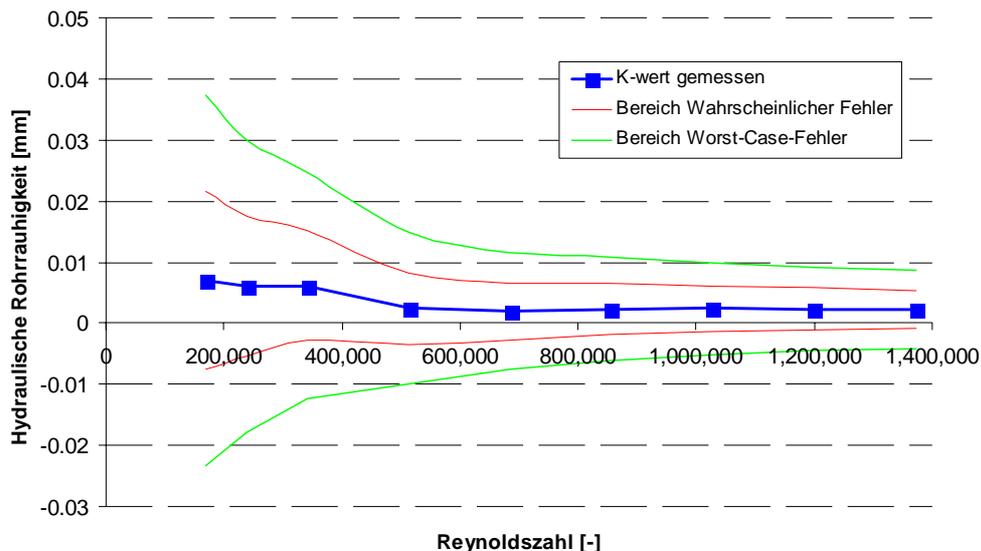


**Abbildung 0-2:** Darstellung der aus den durchgeführten Messungen errechneten Werte für die hydraulische Rohrrauigkeit in Abhängigkeit des Strömungszustandes

*Erläuterung:* Vermessener Rohrstrang: DN 65 bei einer Temperatur von 120°C

**Figure 0-2:** Hydraulic roughness values obtained from measurements under varying flow conditions (DN 65)

*Explanation :* Nominal pipe diameter: DN 65; Temperature of the flow medium (water): 120°C



**Abbildung 0-3:** Darstellung der aus den durchgeführten Messungen errechneten Werte für die hydraulische Rohrrauigkeit in Abhängigkeit des Strömungszustandes

*Erläuterung:* Vermessener Rohrstrang: DN 80 bei einer Temperatur von 120°C

**Figure 0-3:** Hydraulic roughness values obtained from measurements under varying flow conditions (DN 80)

*Explanation :* Nominal pipe diameter: DN 80; Temperature of the flow medium (water): 120°C

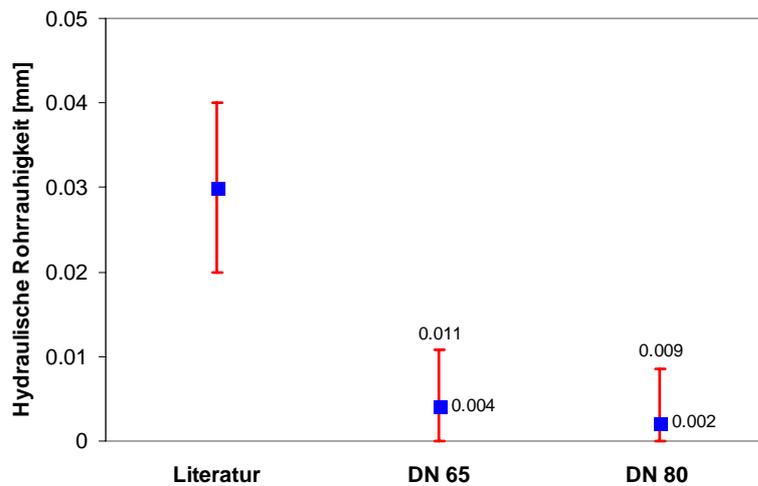
## 1.5 Diskussion, Literaturvergleich und Empfehlungen

Neben den ermittelten Werten für die hydraulische Rohrrauigkeit sind in Tabelle 0-1 die maximal möglichen Werte dargestellt, die sich aufgrund der „Worst-Case“- Fehlerbetrachtung, ergaben. Der auftretende große Fehlerbereich ist dem angewandten Verfahren immanent. Keine der Rechengrößen wie Widerstandsbeiwert und Re- Zahl konnten direkt bestimmt werden. Diese Werte mußten aus den meßbaren Größen Durchfluß, Differenzdruck, Temperatur, Länge der Meßstrecke und Rohrrinnendurchmesser errechnet werden. Fast alle dieser Größen sind in der Bestimmungsgleichung für die hydraulische Rohrrauigkeit mehrfach enthalten. So geht beispielsweise der Rohrrinnendurchmesser mit der 6. Potenz in die Berechnung ein, wodurch sich auch kleine Fehler bereits massiv auswirken.

Aufgrund der Vielzahl der möglichen Fehler und aufgrund deren zum Teil großen Einflusses auf das Resultat ergibt sich ein relativ großer Unschärfbereich. In Anbetracht dessen, kann die Differenz zwischen den Ergebnissen für die beiden Rohrdimensionen nicht auf tatsächlich unterschiedliche hydraulische Rohrrauigkeiten zurückgeführt werden, sondern auf die Fehlerbehaftung dieser Werte. Dies ist auch dahingehend plausibel, als es sich bei den verwendeten Stahlrohren um Produkte von gleicher Herkunft und Qualität und somit ähnlicher Rohrrauigkeit handelt.

### 1.5.1 Literaturvergleich

In Abbildung 0-4 sind die Meßergebnisse laut Literaturangaben [H. RECKNAGEL et al., 1998; D.S. MILLER, 1990; VDI WÄRMETATLAS, 1994] gegenübergestellt. Der dargestellte Balken für die Literaturwerte deckt den Bereich, der in der zitierten Literatur angegebenen Werte für die hydraulische Rohrrauigkeit ab. Als Variationsbereich um die aus den angeführten Versuchen ermittelten Werte für die hydraulische Rohrrauigkeit, wurde der maximal mögliche Fehlerbereich aus den Worst-Case-Fehlerberechnungen dargestellt. Nach unten ist dieser Fehlerbereich mit Erreichen des Nullwertes für die hydraulische Rohrrauigkeit beschränkt, da Werte unter Null physikalisch keinen Sinn machen. Die Obergrenze dieses Bereiches stellt den größtmöglichen Wert für die hydraulische Rohrrauigkeit dar. Auch bei Berücksichtigung des maximal möglichen Fehlers liegen die aus den Messungen resultierenden Werte signifikant unter den Literaturangaben.



**Abbildung 0-4:** Vergleich von Literaturangaben mit den aus den Versuchsläufen errechneten Werten für die hydraulische Rauigkeit gerader Stahlrohre

**Figure 0-4:** Hydraulic roughness values obtained from the test runs in comparison to values from the literature

### 1.5.2 Empfehlung für die Druckverlustberechnung von Stahl- Rohrleitungen

Wie schon in der Einleitung erläutert, erwiesen sich in Untersuchungen von Nahwärmenetzen die errechneten Druckverlustwerte der Rohrleitungen im Vergleich zu den tatsächlich auftretenden Werten als zu hoch. Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß die ermittelten Werte für die hydraulische Rohrrauigkeit der untersuchten, geschweißten Stahlrohre deutlich unter den in der Literatur empfohlenen Werten liegen.

Angesichts dieser Untersuchungsergebnisse ist es für eine, in Hinblick auf den Druckverlust, korrekte Dimensionierung von Stahlrohrnetzen zu empfehlen, geringere hydraulische Rohrrauigkeiten als in der einschlägigen Fachliteratur angegeben für die Berechnungen zu verwenden. Die durchgeführten Messungen ergaben eine hydraulische Rohrrauigkeit der eingesetzten, geschweißten Stahlrohre von 0,004 mm. In Anbetracht des großen möglichen Fehlers der Meßergebnisse kann unter Berücksichtigung des maximal möglichen Fehlers ein abgesicherter Wert für die hydraulische Rohrrauigkeit der betrachteten Stahlrohre von **0,01 mm** angegeben werden. Dieser Wert wird somit für zukünftige Druckverlustberechnungen von geraden Stahlrohren empfohlen um Überdimensionierungen zu vermeiden.

## 1.6 Danksagung

Die vorliegenden Untersuchungen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes „Optimierte Dimensionierung und Betrieb von Rohrleitungssystemen für dezentrale Biomasseheizwerke - Phase I“ durchgeführt. Die Förderung dieser Untersuchungen erfolgte durch Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Deutschland und dem Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Österreich.

Die Bearbeitung des gesamten Forschungsprojektes erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V. (ZAE Bayern). Auf diesem Wege möchten wir uns im Besonderen bei Herrn DI Hans Plank für die gute Zusammenarbeit bedanken.

Ein besonderen Dank für die gute Zusammenarbeit im Rahmen der durchgeführten Testläufe sei an dieser Stelle den Mitarbeitern der Firma ISOPLUS Fernwärmetechnik Ges.m.b.H., Hohenberg, Österreich, ausgesprochen.

## **1.7 Literatur**

COLEBROOK C. F., WHITE C. M., 1937: The reduction of carrying capacity of pipes with age, J. Instn. civ. Engrs. London (1937/38) Heft 1, Paper Nr. 5137, pp. 99-118

DEUTSCHER NORMENAUSCHUSS, 1965: Geschweißte Stahlrohre, Fachnormenausschuß Rohre, Rohrverbindungen und Rohrleitungen (DIN 1626) im Deutschen Normenausschuß (DNA), Deutschland

GELISSEN Heinz Dieter, ADOLPH Ulrich, 1995: Grundlage des Messens elektrischer Größen, Hüthing Buch Verlag Heidelberg, ISBN 3-7785-2328-7 pp. 134

KLASINC Roman, 1989: Rohrreibungsuntersuchungen; Tarbela III, Penstock, Interne Publikation, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Graz

LOGAR Reinhold, 1998: Persönliches Gespräch, Institut für Hydraulische Strömungsmaschinen, Technische Universität Graz

MILLER D. S., 1990: Internal Flow Systems BHRA (Publ.), ISBN 0-947711-77-5 pp. 190

NIKURATSE J., 1931: Strömungswiderstand in rauhen Rohren, Z. angew. Math. Mech. 11 (1931) pp. 409

OBERNBERGER Ingwald, ORFANIOTIS Alexander, 1995: Fernwärme Kundl - Netzauslegung Endbericht, Ingenieurbüro BIOS, Graz, Österreich, pp. 19- 22

OBERNBERGER Ingwald, 1995b: Moderne Biomasse-Fernwärmeanlagen – Effiziente Leitungssysteme für Fernwärme, In: Tagungsband zum 4. Österreichischen Biomassetag 20.- 22. November 1995, Kautzen, Niederösterreich, Österreich, pp. 99-105

RECKNAGEL H., SPRENGER E., 1998: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik, Schramek Universität Dortmund Hrsg., Oldenbourg ISBN 3-486-26214-9, pp. 245

RICHTER Hugo, 1971: Rohrhydraulik, Ein Handbuch zur praktischen Strömungsberechnung, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 5. Auflage, ISBN 3-540-02900-1, pp. 157

VDI WÄRMETATLAS, 1994: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, Verein deutscher Ingenieure VDI Gesellschaft für Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC) (Hrsg.), 7.Auflage, ISBN 3-18-401361-8, pp. Lb 2 – Lb 4