

Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung

Von der Fakultät Energietechnik
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

vorgelegt von
Wen-Shih Chang
aus Taiwan

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. E. Hahne
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. H. Müller-Steinhagen
Tag der mündlichen Prüfung: : 2.4.2001

Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
der Universität Stuttgart

2001

Meiner Frau Ya-Ling
gewidmet

Vorwort

Die vorliegende Arbeit wurde am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart angefertigt.

Herrn Professor Dr.-Ing. E. Hahne, dem Direktor des Instituts, danke ich sehr herzlich für die Aufnahme an seinem Institut und seine Unterstützung bei der Durchführung der Arbeit.

Für die freundliche Übernahme des Mitberichts bedanke ich mich sehr bei Herrn Professor Dr.-Ing. H. Müller-Steinhagen.

Mein Dank gilt allen Mitarbeitern des Instituts, die in vielfältiger Weise zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. G. Barthau für seine Hilfsbereitschaft.

Für die Hilfsbereitschaft und die Durchsicht dieser Arbeit bedanke ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. M. Benner.

Besonderer Dank gilt auch dem Personal der Institutswerkstatt, für die Hilfe bei der Anfertigung und der Wartung der Versuchsanlage.

Ausdrücklicher Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Bach, der durch sein Mitgutachten dazu beitrug, daß die Arbeit eine Förderung nach dem Landesgraduiertengesetz erfahren durfte.

Kurzfassung

Experimentelle Untersuchung zur freien Konvektion an Rohren in einer Kies/Wasser-Schüttung

In Rahmen dieser Arbeit wurde der Wärmeübergang an horizontalen Einzelrohren, drei übereinander liegenden und sieben versetzt angeordneten Rohren, sowohl in Wasser allein als auch in der Kies/Wasser-Schüttung in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte experimentell untersucht. Als Schüttgut wurden drei verschiedene Steingrößen eingesetzt, mit der Korngrößenverteilung von 4 bis 8, 8 bis 16 und 16 bis 32 mm (Kies 4/8, Kies 8/16 und Kies 16/32). Für die Versuche an Einzelrohren in Wasser allein wurde der Einfluß der Höhe H der Kühlplatte über dem Heizrohr zwischen $H = 5D$ und $H = 30D$ untersucht. Für die Anordnungen mit mehreren Rohren wurden die Versuche bei den drei Teilungsverhältnissen $S/D = 10, 5$ und 3 durchgeführt, alle Rohre wurden mit gleicher Wärmestromdichte betrieben.

Das Ergebnis der Versuche mit Wasser allein zeigt, daß bei einer Höhe $H > 15D$ die Kühlplatte keinen Einfluß mehr auf den Wärmeübergangskoeffizienten hat. Ein Vergleich der Meßwerte mit berechneten Werten nach Korrelationsgleichungen aus der Literatur zeigt eine gute Übereinstimmung. Die maximale Abweichung beträgt 4 %.

Die Messungen an Einzelrohren in der Kies/Wasser-Schüttung ergaben drei unterschiedliche Strömungsgebiete:

Darcy-Strömung:	$Gr_{\max} \leq 7$
Forchheimer-Strömung:	$7 < Gr_{\max} \leq 85$
Turbulente Strömung:	$85 < Gr_{\max}$

Bei der Berechnung der Grashof-Zahl Gr_{\max} ist die nicht wandkorrigierte Porosität ϵ einzusetzen. Der Wärmeübergang nimmt mit steigender Wärmestromdichte und größer werdender Korngröße des Kieses zu. Es konnten drei neue Korrelationsgleichungen für den Wärmeübergang ermittelt werden. Sie geben die Meßwerte mit einer mittleren Abweichung von ± 10 % wieder.

Bei den Versuchen mit sieben versetzt angeordneten Rohren, erhält man außer bei den Messungen mit Kies 8/16 beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$ immer eine Verringerung der mittleren Nusselt-Zahl Nu_m gegenüber dem Einzelrohr (Bezug auf ϑ_∞). Mit steigender Wärmestromdichte nimmt die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 zu. In Wasser tritt die größte mittlere Nusselt-Zahl bei $S/D = 5$ auf, während sich in der Kies/Wasser-Schüttung die größte mittlere Nusselt-Zahl zwischen den Verhältnissen $S'/d = 1,47$ und $S'/d = 2,95$ zeigt.

Die Versuche mit drei übereinander liegenden Rohren ergaben ähnliche Ergebnisse wie mit den sieben versetzt angeordneten Rohren. Es wurde eine Erhöhung der mittleren Nusselt-Zahl gegenüber den sieben versetzt angeordneten Rohren festgestellt. Die mittlere Erhöhung liegt zwischen 2,4 % und 19,8 %. Für alle Kies-Korngrößen und Teilungsverhältnisse zeigt sich bei niedrigen Wärmestromdichten ein von der Wärmestromdichte nahezu unabhängiger Verlauf der normierten mittleren Nusselt-Zahl. Bei hohen Wärmestromdichten nimmt die normierte mittlere Nusselt-Zahl in Wasser allein bzw. in der Schüttung mit Kies 16/32 und Kies 8/16 mit steigender Wärmestromdichte leicht zu, in der Schüttung mit Kies 4/8 jedoch ab.

Abstract

Experimental study of natural convection from tubes in the water-saturated pebble bed

In this work the heat transfer from a horizontal single tube, three vertically spaced tubes and seven staggered tubes is investigated experimentally, both in water and in a water-saturated pebble bed. Three differently sized pebbles with the particle size distribution of 4 to 8 mm, 8 to 16 mm and 16 to 32 mm (pebble 4/8, pebble 8/16 and pebble 16/32), were used to create the packed beds. For the experiments on a single tube in the water, the effect of the distance H from the cooling plate on top of the vessel to the heated tube was examined between $H = 5D$ and $H = 30D$. For the multi-tube arrangements the experiments with the three pitch ratios $S/D = 10, 5$ and 3 were performed. All of the tubes were heated with the same heat flux.

The result of the experiments with the water alone shows that with a height of $H > 15D$ the cooling plate has no more influence on the heat transfer coefficient. A comparison of the measured values with the calculated values according to the correlation equations from the literature shows good agreement. The maximum deviation amounts to 4 %.

The measurements on single tubes in the water-saturated pebble bed have brought three distinct flow regimes:

Darcy flow:	$Gr_{\max} \leq 7$
Forchheimer flow:	$7 < Gr_{\max} \leq 85$
Turbulent flow:	$85 < Gr_{\max}$

When calculating the Grashof number Gr_{\max} , the porosity ε without wall effect correction should be used. The heat transfer increases with increasing heat flux and increasing pebble size. Three new correlation equations were obtained. The mean deviation is ± 10 %.

Except for the experiments in the water-saturated packed bed with pebble 8/16 at the pitch ratio $S/D = 5$, the experiments with seven-tube arrangements always gave a smaller average Nusselt number Nu_m in comparison to that of a single tube (in relation to ϑ_∞). The normalized average Nusselt number Nu_m/Nu_0 increases with increasing heat flux. In water the largest average Nusselt number occurs at the pitch ratio $S/D = 5$, while in the water-saturated pebble bed the largest average Nusselt number was found between the ratios $S'/d = 1.47$ and $S'/d = 2.95$.

The experiments with the three-tube arrangement had similar results as with the seven-tube arrangement. An increase of the average Nusselt number in comparison to the seven-tube arrangement has been obtained. The mean increase of the average Nusselt number is between 2.4 % and 19.8%. For all sizes of pebbles and all pitch ratios the normalized average Nusselt number is almost independent of the heat flux at low heat fluxes. At high heat fluxes the normalized average Nusselt number increases slightly with increasing heat flux in the water and in the water-saturated packed bed with pebble 16/32 and pebble 8/16, but decreases in the packed bed with pebble 4/8.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Kurzfassung	4
Abstract	5
Inhaltsverzeichnis	6
Formelzeichen	9
1 Einleitung und Problemstellung	12
2 Apparatur, Meßdatenerfassung und Versuchsdurchführung	15
2.1 Beschreibung der Versuchsanlage	15
2.2 Heizrohre und Anordnungen	17
2.3 Kalibrierung der Thermoelemente und Temperaturmessung	19
2.4 Auswertung	19
2.5 Abschätzung des Meßfehlers	20
2.5.1 Maximaler relativer Fehler der Wärmestromdichte \dot{q}	21
2.5.2 Maximaler relativer Fehler der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$	21
2.5.3 Maximaler relativer Fehler des Wärmeübergangskoeffizienten α	22
2.6 Versuchsdurchführung	22
3 Wärmetransport durch freie Konvektion	24
3.1 Grashof-, Rayleigh- und Nusselt-Zahl	24
3.2 Wärmeübergang an übereinander liegenden Rohren	26
4 Wärmetransport in porösen Medien	30
4.1 Strömung durch ein poröses Medium	30
4.2 Freie Konvektion in porösen Medien	35
4.2.1 Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl Ra_S und Nusselt-Zahl Nu_S	35
4.2.2 Klassifizierung der Strömungsform	35
4.2.3 Wärmeübergangsbeziehungen nach Fand und Yamamoto (1990)	36
4.3 Stoffwerte des Kiesel und der Schüttung	38
4.3.1 Zusammensetzung des Kiesel und Stoffwerte der Kieselbestandteile	38
4.3.2 Gleichwertiger Partikeldurchmesser	39
4.3.3 Porosität	40
4.3.4 Permeabilität	43
4.3.5 Stoffwerte des Kiesel	43
4.3.5.1 Dichte	43
4.3.5.2 Spezifische Wärmekapazität	44
4.3.5.3 Wärmeleitfähigkeit	44
4.3.6 Effektive Wärmeleitfähigkeit der Kiesel/Wasser-Schüttung	45

5	Ergebnisse der Versuche am Einzelrohr in Wasser	47
5.1	Einfluß der Höhe H der Kühlplatte über dem Heizrohr	47
5.2	Vergleich der Meßwerte mit den Korrelationen aus der Literatur	48
6	Ergebnisse der Versuche am Einzelrohr in der Kies/Wasser-Schüttung	50
6.1	Vergleich mit den Korrelationen aus der Literatur	50
6.1.1	Vergleich mit der Korrelationsgleichung von Fand und Yamamoto (1990)	50
6.1.2	Vergleich mit der Korrelationsgleichung von Streit (1996)	51
6.2	Klassifizierung der Strömungsform	53
6.3	Wärmeübergang am Einzelrohr in der Kies/Wasser-Schüttung	56
6.4	Erweiterung des Anwendungsbereichs der Korrelationsgleichung	63
7	Ergebnisse der Versuche mit 3 Heizrohren	66
7.1	Wandtemperatur der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})	66
7.2	Wandtemperatur der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})	69
7.3	Nusselt-Zahlen der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})	72
7.3.1	Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des 3Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{∞})	78
7.3.2	Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des 3Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{∞})	81
7.4	Nusselt-Zahlen der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})	83
7.4.1	Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des 3Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})	88
7.4.2	Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des 3Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})	90
8	Ergebnisse der Versuche mit 7 Heizrohren	91
8.1	Wandtemperatur der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})	91
8.2	Wandtemperatur der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})	99
8.3	Nusselt-Zahlen der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})	104
8.3.1	Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des 7Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{∞})	111
8.3.2	Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des 7Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{∞})	115
8.4	Nusselt-Zahlen der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})	117
8.4.1	Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des 7Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})	122
8.4.2	Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des 7Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})	124
9	Zusammenfassung	125

10 Literaturverzeichnis	128
11 Anhang	132
Anhang A: Zusammenstellung der Ergebnisse der Wärmeübergangsmessungen	132
Anhang B: Näherungsweise Berechnung der Zuströmtemperatur	143
Anhang C: Gleichungen zur Berechnung der Nusselt-Zahl Nu_{Fl} aus der Wärmestromdichte	144
Anhang D: Gleichungen zur Berechnung der Nusselt-Zahl Nu_s aus der Wärmestromdichte	145
Anhang E: Berechnete Ergebnisse der Nusselt-Zahl-Verhältnisse bezogen auf die jeweilige Anströmtemperatur	146

Formelzeichen

Lateinische Buchstaben:

a	Temperaturleitfähigkeit	m^2/s
a_S	effektive Temperaturleitfähigkeit der Kies/Wasser-Schüttung $a_S = \lambda_S / (\rho_{FI} \cdot c_{p,FI})$	m^2/s
A	Fläche	m^2
a'	Konstante in der Forchheimer-Gleichung	$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$
b'	Konstante in der Forchheimer-Gleichung	kg/m^4
A, B	Ergun-Konstanten für eine Forchheimer-Strömung	-
A', B'	Ergun-Konstanten für eine turbulente Strömung	-
B	Abstand zwischen Rohr und Wand	m
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$C_1 \sim C_4$	Konstanten für die Korrelationsgleichung	-
C_f	Formfaktor	-
C_{F1}, C_{F2}	Konstanten in der Ergun-Gleichung für eine Forchheimer-Strömung	$1/\text{m}^2, 1/\text{m}$
C_{T1}, C_{T2}	Konstanten in der Ergun-Gleichung für eine turbulente Strömung	$1/\text{m}^2, 1/\text{m}$
d	gleichwertiger Durchmesser der Kiespartikel	m
D	Durchmesser des Heizrohres	m
g	örtliche Fallbeschleunigung ($g = 9,80665 \text{ m/s}^2$)	m/s^2
H	Höhe der Kühlplatte über dem Heizrohr, Eingrabetiefe	m
K	Permeabilität	m^2
l	Überströmlänge, charakteristische Länge	m
L	Rohrlänge	m
p	Druck	N/m^2
\dot{q}	Wärmestromdichte	W/m^2
\dot{Q}	Wärmestrom, Wärmeleistung	W
S	Rohrabstand (Rohrmitte zu Rohrmitte)	m
S'	lichter Abstand zwischen den Rohren $S' = S - D$	m
S_0	spezifische Oberfläche des Partikels	$1/\text{m}$
U	Spannung	V
V	Volumen	m^3
w	Geschwindigkeit	m/s
x	Ortskoordinate	m
z	Massenanteil	-

Griechische Buchstaben:

α	Wärmeübergangskoeffizient	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
β	Volumenausdehnungskoeffizient	$1/\text{K}$

β_2	Konstante ($\beta_2 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}^2$)	$1/\text{K}^2$
Δ	Differenz	-
ε	Porosität (Hohlraumanteil)	-
η	dynamische Viskosität	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
φ	Volumenanteil	-
κ	Kozeny-Carman-Konstante	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
ν	kinematische Viskosität	m^2/s
ρ	Dichte	kg/m^3
Θ	dimensionslose Temperatur $\Theta = (\vartheta - \vartheta_\infty)/(\vartheta_W - \vartheta_\infty)$	-
ϑ	Temperatur	$^\circ\text{C}$
ϑ_{Film}	mittlere Filmtemperatur $\vartheta_{\text{Film}} = (\vartheta_W + \vartheta_\infty)/2$	$^\circ\text{C}$
ϑ_W	Wandtemperatur des Rohres	$^\circ\text{C}$
ϑ_∞	Temperatur im ungestörten Medium	$^\circ\text{C}$
ζ	Verteilungsparameter	-

Indizes:

0	Bezugswert für Einzelrohr
calc	berechnet
exp	experimentell
eff	effektiv
Fl	Flüssigkeit (Wasser)
ges	gesamt
Gef	Gefäß
<i>i</i>	Rohrnummer
K	Kies
m	Mittelwert
max	maximal
min	minimal
par	parallel
senk	senkrecht
S	Kies/Wasser-Schüttung
W	Rohrwand
x	Ortskoordinate nach oben
zu	Zuströmung
∞	unendlich, außerhalb der Strömungsgrenzschicht

Kennzahlen:

Ge	Gebhart-Zahl	$Ge = \frac{g\beta_{\text{Fl}}D}{c_{p,\text{Fl}}}$
Gr _{Fl}	Grashof-Zahl	$Gr_{\text{Fl}} = \frac{g\beta_{\text{Fl}}D^3(\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty})}{\nu_{\text{Fl}}^2}$
Gr _{max}	maximale Grashof-Zahl	$Gr_{\text{max}} = \frac{g\beta_{\text{Fl}}Kd(\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty})}{\nu_{\text{Fl}}^2}$
Gr _S	Grashof-Zahl	$Gr_{\text{S}} = \frac{g\beta_{\text{Fl}}KD(\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty})}{\nu_{\text{Fl}}^2}$
Gr _x	Grashof-Zahl (örtlich)	$Gr_{\text{x}} = \frac{g\beta_{\text{Fl}}x^3(\vartheta_{\text{W1}} - \vartheta_{\infty})}{\nu_{\text{Fl}}^2}$
Nu _{Fl}	Nusselt-Zahl	$Nu_{\text{Fl}} = \frac{\alpha D}{\lambda_{\text{Fl}}}$
Nu _S	Nusselt-Zahl	$Nu_{\text{S}} = \frac{\alpha D}{\lambda_{\text{S}}}$
Pr _{Fl}	Prandtl-Zahl	$Pr_{\text{Fl}} = \frac{\nu_{\text{Fl}}}{a_{\text{Fl}}}$
Pr _S	Prandtl-Zahl	$Pr_{\text{S}} = \frac{\nu_{\text{Fl}}}{a_{\text{S}}}$
Ra _{Fl}	Rayleigh-Zahl	$Ra_{\text{Fl}} = \frac{g\beta_{\text{Fl}}D^3(\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty})}{\nu_{\text{Fl}}a_{\text{Fl}}}$
Ra _S	Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl	$Ra_{\text{S}} = \frac{g\beta_{\text{Fl}}KD(\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty})}{\nu_{\text{Fl}}a_{\text{S}}}$
Ra _S *	Darcy-Inversions-Rayleigh-Zahl	$Ra_{\text{S}}^* = \frac{gKD}{\nu_{\text{Fl}}a_{\text{S}}} \left \beta_2(\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty})(5,8 - 0,6\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty}) \right $
Re	Reynolds-Zahl	$Re = \frac{wd}{\nu}$
Re _{max}	maximale Reynolds-Zahl	$Re_{\text{max}} = \frac{g\beta_{\text{Fl}}Kd(\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty})}{\nu_{\text{Fl}}^2}$

1 Einleitung und Problemstellung

Am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart wurde 1982 mit einem vom Bundesministerium für Forschung und Technologie (BmFT) geförderten Projekt die Untersuchung eines künstlichen Aquiferspeichers für die saisonale Wärmespeicherung begonnen. Dieser Aquifer-Pilotspeicher ist ein Kegelstumpf mit einem Durchmesser von ca. 22 m und einer Tiefe von ca. 3,7 m und besitzt ein Speichervolumen von 1050 m³. Dieser Aquiferspeicher kann entweder über direkten Wärmeaustausch oder durch acht in unterschiedlichen Höhen versetzt angeordnete Wärmeübertrager-Rohrspiralen be- und entladen werden. Die Rohre bestehen aus vernetztem Polyethylen (Außendurchmesser 32 mm, Wandstärke 2,9 mm) und sind auf acht horizontalen Ebenen in einem Abstand von 0,4 m verlegt. Als Speichermedium wurde Kies mit der Korngrößenverteilung von 8 bis 16 mm und 16 bis 32 mm eingesetzt, der mit Wasser geflutet wurde /Giebe (1989)/.

Um einen solchen Speicher für eine gegebene Anforderung richtig dimensionieren zu können, ist die Kenntnis des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten an den Wärmeübertragerrohren nötig. In der Literatur gibt es wenige Untersuchungen für den Wärmeübergang bei freier Konvektion am horizontalen Rohr in einer Schüttung. Für mehrere Rohre mit versetzter Anordnung in der Schüttung gibt es keine Literaturangaben. Die bisherigen Literaturangaben konzentrieren sich auf kleine Korngrößen bis 6 mm, die zu kleineren Darcy-modifizierten Rayleigh-Zahlen, also im Bereich Darcy- bzw. Forchheimer-Strömung, führen. Für größere Korngrößen wie 16 oder 32 mm überschreitet die Rayleigh-Zahl meistens den Gültigkeitsbereich der Korrelationsgleichung für die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten.

Untersuchungen zum Wärmeübergang bei freier Konvektion an horizontalen Rohren in Schüttungen lassen sich auch anwenden auf unterirdisch verlegte Elektrokabel oder Ölleitungen, wobei z.B. das Fluid beheizt wird, um die Pumpenleistung und damit die Kosten zu reduzieren. Außerdem werden die Messungen zur Entwicklung und Prüfung des mathematischen Modells für den Wärmeübergang an Rohren in porösen Medien wesentlich beitragen. Das bisherige Modell muß immer noch durch neue Versuche verbessert werden, um die komplizierten Wärmetransportvorgänge zu beschreiben.

Schrock et al. (1970) und Fernandez und Schrock (1982) untersuchten experimentell den Wärmeübergang an einem Zylinder in einer wassergesättigten Sandschüttung, die sich in einer halbinendlichen Flüssigkeitsschicht befindet. Der praktische Hintergrund dieser Arbeiten liegt in der Untersuchung der Wärmeausbreitung um zylindrische Tonnen, die radioaktive Abfälle enthalten und unter dem Meeresboden vergraben werden sollen. Die Einflüsse der Rayleigh-Zahl (gebildet mit $l = (H^2 - 0,25 \cdot D^2)^{0,5}$), der dimensionslosen Eingrabbtiefe H/D und

des Verhältnisses L/D zwischen Länge und Durchmesser der Zylinder wurden in folgenden Bereichen untersucht:

$$10^{-2} \leq Ra_S \leq 10^4 \quad , \quad 1 \leq L/D \leq 76,7 \quad \text{und} \quad 0,8 \leq H/D \leq 23,7$$

Fand et al. (1986, 1990 und 1994) führten umfangreiche Untersuchungen an einem horizontalen Zylinder in einem porösen Medium durch. Der Zylinder liegt in einer Zufallsschüttung aus Glaskugeln (Durchmesser 1,2 bis 6 mm), welche mit Wasser oder mit Silikonöl geflutet ist. Die Autoren zeigten, daß der untersuchte Wertebereich der Rayleigh-Zahlen in zwei Teilbereiche untergliedert werden kann (Darcy-Strömung und Forchheimer-Strömung), in denen sich die Nusselt-Zahl unterschiedlich verhält. Dazu gaben sie Korrelationsgleichungen für die Wärmeübergangskoeffizienten an. Die Parameter wurden in den Bereichen:

$$0,003 \leq Ra_S \leq 520 \quad \text{und} \quad 0,1 \leq d/D \leq 2$$

variiert.

Himasekhar et al. (1988) haben den Wärmeübergang an einem mit konstanter Wärmestromdichte beheizten horizontalen Rohr in einer wassergesättigten Schüttung gemessen. Die Schüttung (Glaskugeln mit Korngröße 4 mm) hat eine feste Oberbegrenzung (Kühlplatte). Sie zeigten, daß bei dem untersuchten Bereich der Rayleigh-Zahlen $Ra_{eff} \leq 2800$ die Nusselt-Zahl abhängig von dem Eingrabbtiefe/Rohrdurchmesser-Verhältnis ($2 \leq H/D \leq 13,9$) ist.

Streit (1996) untersuchte experimentell den Wärmeübergang bei freier Konvektion am horizontalen Wärmeübertragerrohr in der Kies/Wasser-Schüttung (Kies mit der Korngrößenverteilung 8 bis 16 mm) mit Bildung und Schmelzen von Eis im Temperaturbereich -10 °C bis 25 °C. Um die Meßdaten auch bei der Richtungsumkehr der Konvektionsströmung (bei $3,98$ °C) korrelieren zu können, führte er die Darcy-Inversions-Rayleigh-Zahl Ra_S^* ein und gab eine Korrelationsgleichung für den Bereich:

$$0,09 \leq Ra_S^* \leq 150$$

an.

Aus der Literaturübersicht ist der Mangel an genauen Informationen sowohl über die Wärmeübergangskoeffizienten bei größeren Rayleigh-Zahlen an Einzelrohren als auch über den Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D (Rohrabstand/Rohrdurchmesser) und der Kieskorngröße auf den Wärmeübergangskoeffizienten bei Anordnungen mit mehreren Rohren deutlich.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Wärmeübergang bei freier Konvektion an horizontalen Rohren in der Kies/Wasser-Schüttung sowie in Wasser allein experimentell untersucht. Als

Schüttgut wurden drei verschiedene Größen eingesetzt, nämlich Kies mit der Korngrößenverteilung von 4 bis 8, 8 bis 16 und 16 bis 32 mm (Kies 4/8, Kies 8/16 und Kies 16/32). Zunächst wurden Versuche zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten bzw. der Nusselt-Zahl am horizontalen Einzelrohr im Temperaturbereich 20 bis 55 °C bei größeren Rayleigh-Zahlen bis ca. $Ra_S = 1340$ durchgeführt. Es wurden neue Korrelationsgleichungen zur Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten für drei Strömungsbereiche (Darcy-, Forchheimer- und turbulente Strömung) vorgeschlagen. Dann wurde der Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D und der Korngröße des Kiesel auf den Wärmeübergangskoeffizienten an drei übereinander liegenden Rohren und an sieben versetzt angeordneten Rohren untersucht.

2 Apparatur, Meßdatenerfassung und Versuchsdurchführung

2.1 Beschreibung der Versuchsanlage

In Bild 2.1 ist die Versuchsanlage schematisch dargestellt. Der rechteckige Versuchsbehälter ist aus Glas ($\lambda = 1,163 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) mit den inneren Maßen $810 \times 330 \times 545 \text{ mm}$ ($l \times b \times h$) aufgebaut. Zur Platzierung des Heizrohres dienen zwei Stützen aus Plexiglas ($\lambda = 0,184 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) von 400 mm Höhe, 328 mm Breite und 10 mm Stärke. Zwischen der Stütze und der Seitenwand wurden zwei Formstücke (15 und 80 mm dick) aus Styrodur (Polystyrol-Hartschaumplatte, $\lambda = 0,036 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) montiert, um den Wärmeverlust in Längsrichtung der Rohre zu vermindern. Entsprechende Schlitze wurden in die dickere Styrodurplatte gefräst, um die elektrischen Leitungen (mit wasserdichtem Schutzschlauch ummantelt) nach außen zum Stelltransformator zu führen. Nach der Installation der Heizrohre und der elektrischen Leitungen wurden die beiden Wärmedämmplatten mit der Stütze verschraubt und zusammen im Behälter untergebracht. An den Behälter wurden außen 80 mm dicke Styrodurplatten angebracht. Der Raum zur Aufnahme der Schüttung beträgt $600 \times 330 \times 400 \text{ mm}$ ($l \times b \times h$).

Oben auf die Stützen wurde die Kühlplatte zur Abfuhr der Wärme von den Heizrohren montiert. Sie besteht aus 19 nebeneinander liegenden Kupferrohren, die miteinander verbunden wurden. Die Kühlplatte wird von Wasser durchströmt, das durch einen Thermostat auf konstanter Temperatur gehalten wird. In einer Ecke des Wärmedämmstoffs befindet sich eine Einfüll-Öffnung, in die ein Schlauch eingesetzt werden kann. Durch ihn kann das entgaste Wasser eingeführt werden.

Im Behälter sind die Heizrohre waagrecht eingebaut; sie werden mit Wechselstrom beheizt. Die Heizleistungen der Heizrohre lassen sich über Stelltransformatoren individuell einstellen und werden mit einem Wattmeter gemessen.

Die Versuche wurden wie schon erwähnt sowohl in der Kies/Wasser-Schüttung als auch in Wasser allein durchgeführt. Als Schüttgut wurde Kies mit 3 unterschiedlichen Korngrößenverteilungen, nämlich Kies 4/8, Kies 8/16 und Kies 16/32 (Kies mit der Korngrößenverteilung von 4 bis 8, 8 bis 16 und 16 bis 32 mm) eingesetzt.

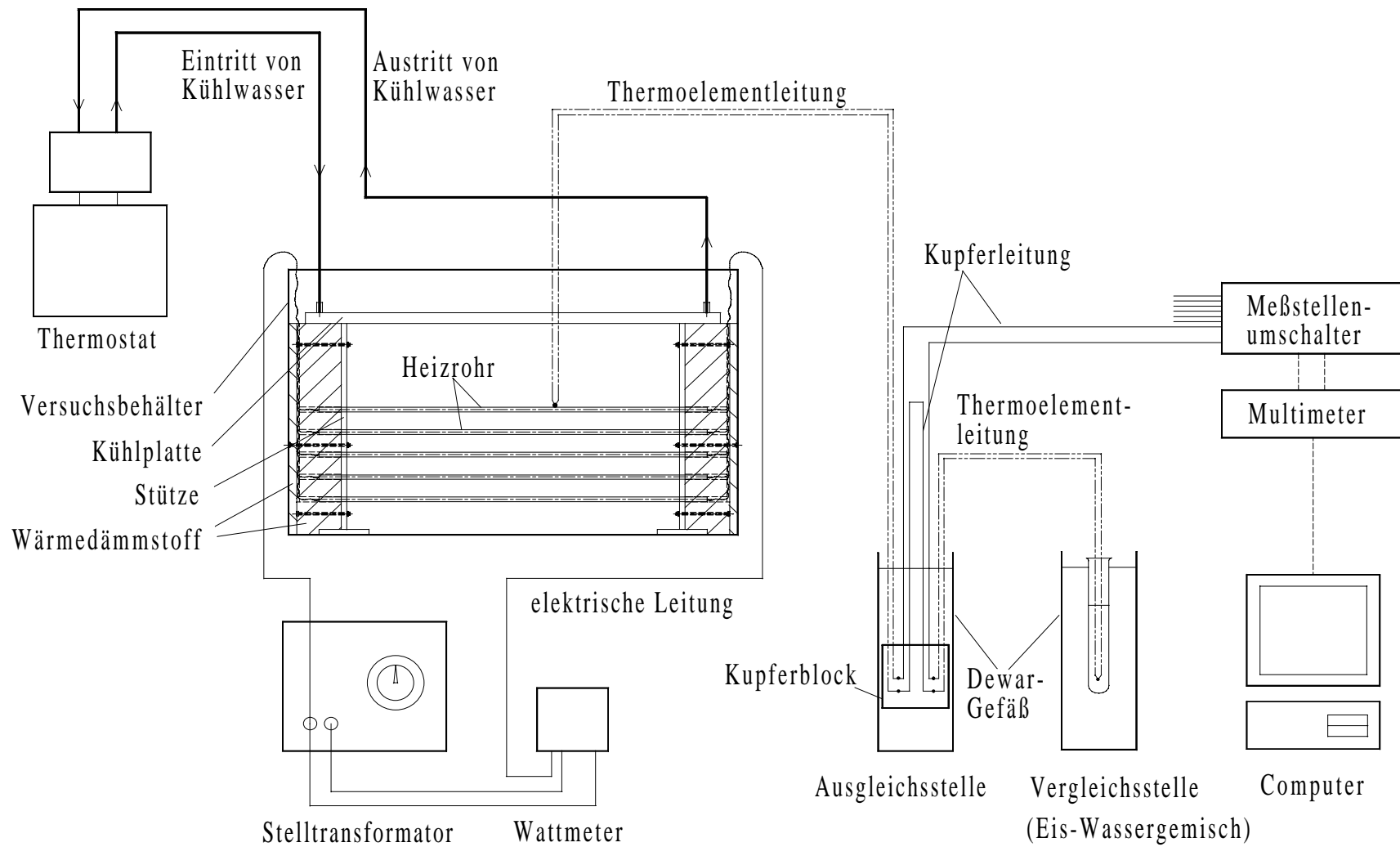


Bild 2.1: Gesamtschema der Versuchsanlage

2.2 Heizrohre und Anordnungen

Als Heizrohre (siehe Bild 2.2) werden handelsübliche Heizstäbe (Firma Otto Müller, 0398) aus Edelstahl mit einer maximalen Heizleistung von etwa $\dot{Q} = 600 \text{ W}$ bei einer Spannung von $U = 230 \text{ V}$ eingesetzt. Die beheizte Länge beträgt 600 mm. Alle Heizrohre sind jeweils mit zwei Thermoelementen nach Bild 2.2 bestückt. Die Thermoelemente sind in Nuten, die in die Rohroberfläche gefräst wurden, mit einem Gemisch aus Kupferpulver und Epoxidharz-Kleber eingeklebt.

Die bei den Versuchen verwendeten Anordnungen der Rohre sind in Bild 2.3 dargestellt. Außer bei den Versuchen zur Ermittlung des Einflusses der Höhe H (Höhe der Kühlplatte über dem Heizrohr) auf den Wärmeübergangskoeffizienten liegt bei allen Messungen das Einzelrohr bzw. das mittlere Rohr (Rohrnummer 2) bei Anordnungen mit mehreren Rohren 255 mm ($30 \times D$) unterhalb der Kühlplatte.

Bei der Anordnung mit 3 Rohren liegen diese im gleichen Abstand S übereinander (siehe Bild 2.3b). Die 7 horizontal eingebauten Heizrohre sind in drei senkrechten Reihen mit einer Dreiecksteilung (Versetzungswinkel 60°) angeordnet (siehe Bild 2.3c). Die Rohre haben voneinander den gleichen Abstand S .

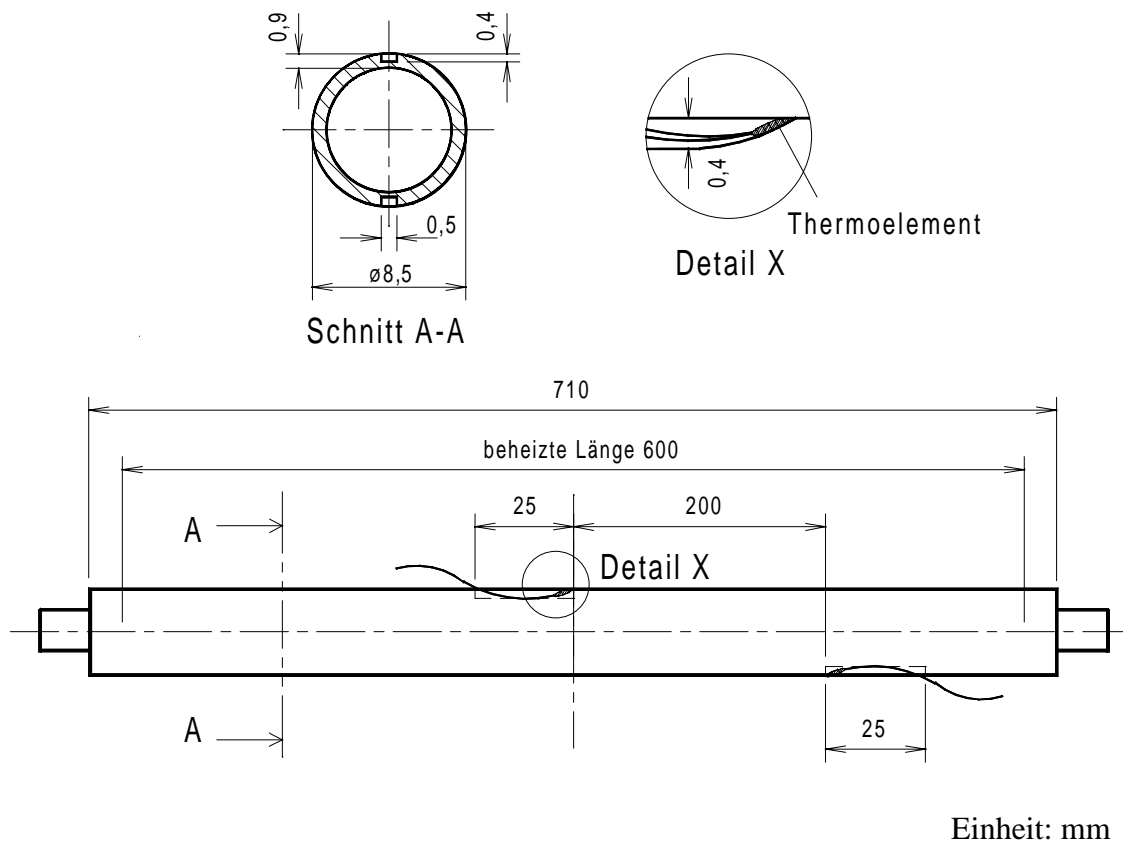
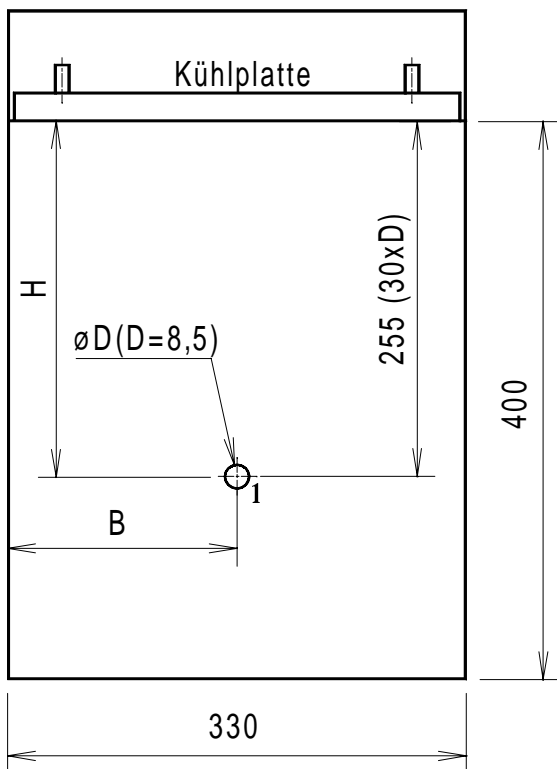
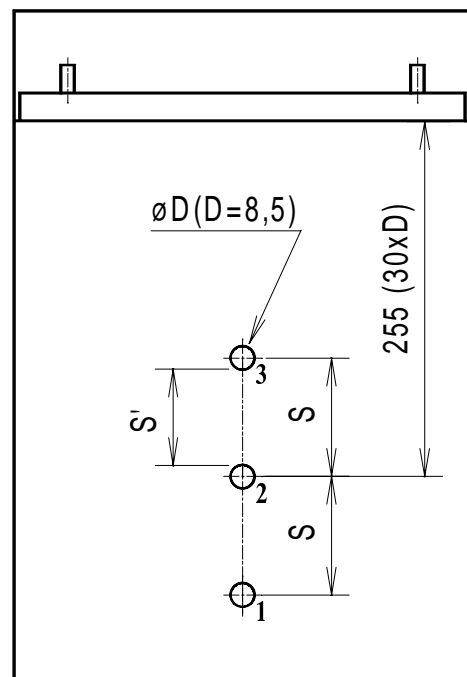
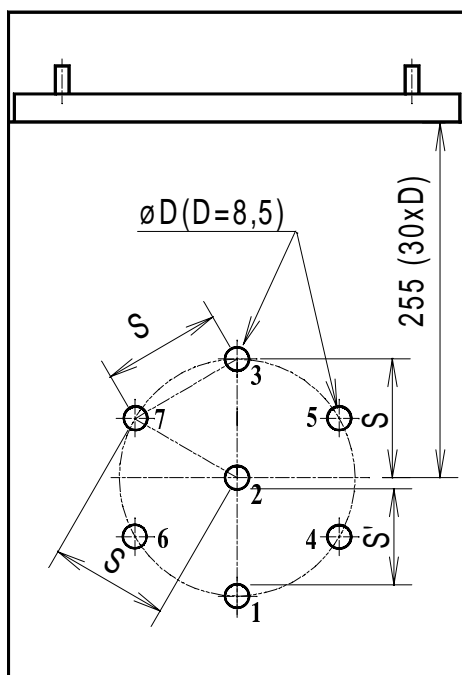


Bild 2.2: Abmessung des Heizrohres und Positionen der Thermoelemente auf dem Heizrohr

a) Anordnung mit Einzelrohr

S/D = 3, 5 und 10

b) Anordnung mit 3 Rohren

S/D = 3, 5 und 10

c) Anordnung mit 7 Rohren

Bild 2.3: Skizze des Versuchsbehälters in Seitenansicht mit den Positionen der Heizrohre

2.3 Kalibrierung der Thermoelemente und Temperaturmessung

Die Rohrwandtemperaturen, die Temperaturen an der Kühlplatte und in der Schüttung werden mit NiCr/Ni-Thermoelementen mit einem Drahtdurchmesser von 0,2 mm gemessen. Die Temperaturen außerhalb der Strömungsgrenzschicht, die eine Rolle bei der Bestimmung von Größen zur Charakterisierung der Konvektionsströmung spielen, werden im ungestörten Medium gemessen, und zwar 1 cm über der Bodenplatte.

Die Vergleichsstelle wird durch schmelzendes Eis in einem Dewar-Gefäß auf 0 °C gehalten. Die Thermoelemente sind an einen Meßstellenumschalter (Prema Scanner 2024) angeschlossen. Der Ausgang des Meßstellenumschalters ist mit einem Digitalmultimeter (Prema Digital Multimeter 6001) verbunden. Diese beschriebene Meßeinrichtung gestattet es, Thermospannungen bis zu 2,5 mV innerhalb der Fehlergrenzen von $\pm 3 \mu\text{V}$ zu bestimmen.

Vor dem Einsatz wurde die gesamte Meßkette für die Temperaturmessung, die aus Thermoelementen, Meßstellenumschalter und Digitalmultimeter besteht, zwischen 0 °C und 60 °C in 5 K Schritten kalibriert. Zur Kalibrierung wurden die Thermoelemente in die Bohrung eines Kupferklotzes gesteckt, der sich in einem mit Silikonöl gefüllten Gefäß befand. Das Öl wurde durch einen Präzisionsthermostaten (Huber Unistat) temperiert und dessen Temperatur konnte bei jeder Messung auf $\pm 0,01$ K gehalten werden. Die Temperatur im Innern des Kupferklotzes wurde mit einem geeichten PT-25 Widerstands-Thermometer und einem Präzisionsmultimeter (HP-3458A) innerhalb $\pm 0,004$ K bestimmt.

Die erhaltene Kalibrierkurve für sämtliche Thermoelemente wurde mit einem Polynom 3. Grades nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ausgeglichen. Die maximale Abweichung der gemessenen Temperaturwerten von den Werten nach dem Ausgleichspolynom beträgt $\pm 0,06$ K im Temperaturbereich von 0 °C bis 60 °C.

Insgesamt erhält man für die Temperaturmessung einen maximalen absoluten Fehler von:

$$\pm(0,01 + 0,004 + 0,06) \text{ K} = \pm 0,074 \text{ K} \quad (2.1)$$

2.4 Auswertung

Der Wärmeübergangskoeffizient α wird aus der gemessenen Wärmestromdichte \dot{q} und der Differenz zwischen der Rohrwandtemperatur ϑ_w – die als Mittelwert aus den Meßwerten zweier Thermoelemente ermittelt wird – und der Temperatur des ungestörten Mediums ϑ_∞ gemäß:

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{\Delta\vartheta} = \frac{\dot{q}}{\vartheta_w - \vartheta_\infty} \quad (2.2)$$

berechnet. Die Wärmestromdichte \dot{q} ergibt sich aus dem Wärmestrom \dot{Q} und der Größe der Rohroberfläche A:

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{\dot{Q}}{\pi \cdot D \cdot L} \quad (2.3)$$

Dabei ist D der Durchmesser und L die Länge des Heizrohres.

Die Bestimmung von α nach Gl. (2.2) mit ϑ_∞ ist zutreffend für den Wärmeübergang am Einzelrohr. Für den Wärmeübergang an Rohren in einem Rohrbündel tritt eine gegenseitige Beeinflussung derart auf, daß die am unten liegenden Rohr erwärmte Flüssigkeit das darüberliegende Rohr anströmt. Nach der üblichen Definition des Wärmeübergangskoeffizienten muß damit gesetzt werden:

$$\alpha = \frac{\dot{q}}{\vartheta_w - \vartheta_{zui}} \quad (2.2a)$$

mit ϑ_{zui} als der Anströmtemperatur.

Dies wird in der Literatur nicht gemacht (Masters 1972, Tokura 1983), vermutlich weil in der praktischen Anwendung die Bestimmung der genauen Anströmtemperatur so gut wie unmöglich ist und damit auch die Umsetzung von Versuchsergebnissen die auf der Anströmtemperatur beruhen.

In Schüttungen aus grobkörnigen Partikeln ist eine Temperaturmessung prinzipiell problematisch, da die Lage der Thermoelemente nicht exakt bestimmbar ist. Die Anzeige hängt aber von der individuellen Lage und der Zuströmung ab. Schließlich ist noch unsicher wohin der gemessene Stromfaden in der Schüttung gelangt.

Es wird daher, und um den Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur zu ermöglichen, die Definition mit ϑ_∞ als dem am genauesten bestimmbarsten Wert beibehalten. Um aber die Verzerrungen, die sich damit ergeben sichtbar werden zu lassen, werden Temperatur- und Nusselt-Zahl-Verhältnisse auch mit der Zuströmtemperatur ϑ_{zui} nach Gl. (2.2a) dargestellt. Die näherungsweise Berechnung der Zuströmtemperatur ist im Anhang B angegeben.

2.5 Abschätzung des Meßfehlers

Die Meßunsicherheit des Wärmeübergangskoeffizienten hängt von den Meßfehlern aller direkt gemessenen Größen ab: Rohrwandtemperatur ϑ_w , Temperatur des ungestörten Mediums ϑ_∞ , Heizleistung bzw. Wärmestrom \dot{Q} , Durchmesser und Länge des Heizrohres. Nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz /VDE (1973)/ wird der maximale relative Fehler des Wärmeübergangskoeffizienten α berechnet. Er setzt sich nach Gl. (2.2) aus den Fehlern der Wärmestromdichte \dot{q} und der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ zusammen:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \left| \frac{\Delta\dot{q}}{\dot{q}} \right| + \left| \frac{\Delta(\Delta\vartheta)}{\Delta\vartheta} \right| \quad (2.4)$$

2.5.1 Maximaler relativer Fehler der Wärmestromdichte \dot{q}

Der relative Fehler der Wärmestromdichte \dot{q} lässt sich aus Gl. (2.3) nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz berechnet:

$$\left| \frac{\Delta\dot{q}}{\dot{q}} \right| = \left| \frac{\Delta\dot{Q}}{\dot{Q}} \right| + \left| \frac{\Delta D}{D} \right| + \left| \frac{\Delta L}{L} \right| \quad (2.5)$$

Da der Wärmestrom \dot{Q} über den Ausgangsstrom des Wattmeters ermittelt wird, wird der Fehler des Amperemeters auch betrachtet. Der maximale relative Fehler beträgt:

$$\frac{\Delta\dot{Q}}{\dot{Q}} = \pm 1 \% \quad (2.6)$$

Der mittlere Durchmesser des Heizrohres beträgt 8,5 mm. Dabei ist die Abweichung des Durchmessers $\pm 0,05$ mm. Der maximale relative Fehler ist:

$$\frac{\Delta D}{D} = \frac{\pm 0,05 \text{ mm}}{8,5 \text{ mm}} = \pm 0,59 \% \quad (2.7)$$

Die Länge des Heizrohres hat einen maximalen relativen Fehler:

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\pm 5 \text{ mm}}{600 \text{ mm}} = \pm 0,83 \% \quad (2.8)$$

Damit ist der maximale relative Fehler der Wärmestromdichte nach Gl. (2.5):

$$\frac{\Delta\dot{q}}{\dot{q}} = \pm 2,42 \% \quad (2.9)$$

2.5.2 Maximaler relativer Fehler der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$

Für den absoluten Fehler der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ gilt:

$$\Delta(\Delta\vartheta) = \Delta(\vartheta_w - \vartheta_\infty) = |\Delta\vartheta_w| + |\Delta\vartheta_\infty| \quad (2.10)$$

Nach Abschnitt 2.3 ist der maximale Fehler für die Temperaturmessung:

$$\Delta\vartheta_w = \Delta\vartheta_\infty = \pm 0,074 \text{ K} \quad (2.11)$$

Aus Gl. (2.10) ergibt sich für die Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ ein maximaler absoluter Fehler von:

$$\Delta(\Delta\vartheta) = \pm 0,148 \text{ K} \quad (2.12)$$

Der maximale relative Fehler der Temperaturdifferenz beträgt:

$$\frac{\Delta(\Delta\vartheta)}{\Delta\vartheta} = \pm \frac{14,8}{\Delta\vartheta} \% \quad (2.13)$$

2.5.3 Maximaler relativer Fehler des Wärmeübergangskoeffizienten α

Setzt man Gl. (2.9) und Gl. (2.13) in Gl. (2.4) ein, ergibt sich der maximale relative Fehler für den Wärmeübergangskoeffizienten:

$$\frac{\Delta\alpha}{\alpha} = \pm \left(2,42 + \frac{14,8}{\Delta\vartheta} \right) \% \quad (2.14)$$

Aus Gl. (2.14) folgt, daß der maximale relative Fehler des Wärmeübergangskoeffizienten von der Größe der Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta$ abhängt. Bei den Wärmeübergangsmessungen ist die Temperaturdifferenz im Bereich von $\Delta\vartheta = 1,3$ K bis 33,5 K. Der maximale relative Fehler des Wärmeübergangskoeffizienten liegt damit zwischen $\pm 13,8$ % und $\pm 2,86$ %.

2.6 Versuchsdurchführung

Zunächst wurden Versuche zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten an Einzelrohren in Wasser durchgeführt. Der Einfluß der Höhe H (Höhe der Kühlplatte über dem Heizrohr, siehe Bild 2.3a) wurde untersucht, um eine geeignete Höhe für weitere Versuche festzustellen. Die Position des Heizrohres wurde so gewählt, daß sich das Rohr so verhält, wie wenn es sich in einem unendlichen Medium befindet, d.h. der Wärmeübergangskoeffizient soll weder von der Kühlplatte (siehe Verhältnis H/D) noch von den Seitenwänden des Behälters (siehe Verhältnis B/D) beeinflusst werden.

Der Einfluß des Abstandes B eines Rohres in Wasser zur Wand des Behälters auf den Wärmeübergang wurde von Fand et al. (1986) untersucht. Die Nusselt-Zahl Nu nimmt bei kleineren Abstand/Durchmesser-Verhältnissen (bis $B/D \leq 3$) mit steigendem Verhältnis B/D zu, dann ab $B/D > 3$ wieder ab. Bei größeren Verhältnissen $B/D > 4,4$ ändert sich die Nusselt-Zahl nicht mehr. Al-Alusis (1992) Meßergebnisse für ein Einzelrohr in Luft zeigen, daß für $B/D > 2$ der Einfluß der Seitenwand auf die Nusselt-Zahl zu vernachlässigen ist. Bei dem in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Versuchsbehälter ist in ungünstigstem Fall ($S/D = 10$) $B/D = 10,8$. Daher wird der Einfluß der Seitenwand (B/D) vernachlässigt.

Die Versuche wurden dann an Einzelrohren sowie an 3 und 7 Rohren mit den drei Teilungsverhältnissen $S/D = 3, 5$ und 10 jeweils in der Kies/Wasser-Schüttung (Kies 4/8, Kies 8/16 und Kies 16/32) und in Wasser (ohne Kies) durchgeführt. Die Messungen für $S/D = 3$ mit Kies 16/32 konnten nicht durchgeführt werden, da bei Einsatz dieser Korngröße der Abstand zwischen den Rohren nicht genügt, um einen homogenen Aufbau der Schüttung zu

gewährleisten. Bei den Messungen mit 3 und 7 Rohren wurden alle Rohre gleichmäßig beheizt ($\dot{q}_1 = \dot{q}_2 = \dots = \dot{q}_3$ bzw. \dot{q}_7).

Die Versuche an Einzelrohren in der Kies/Wasser-Schüttung wurden bei drei (Kies 8/16) bzw. vier (Kies 4/8 und Kies 16/32) verschiedenen Schüttstrukturen durchgeführt. D.h. nach einer Reihe von Messungen wurde die Schüttung erneut aufgebaut, also Kies vom Versuchsbehälter entnommen und wieder eingefüllt. Für die Versuche an Anordnungen mit 3 und 7 Rohren wurde nur eine Schüttstruktur eingesetzt.

Vor der Füllung des Behälters mit Wasser, wird dieses zweimal mit einem Heizstab auf eine über der höchsten Versuchstemperatur liegende Temperatur (70 °C) erhitzt und einen Tag bei Raumtemperatur gelagert, um die Luft vom Wasser zu entfernen. Vor dem Versuch wurde der Kies zunächst in den Behälter zufällig eingefüllt. Dann wurde das entgaste Wasser durch ein Siphon in den Behälter eingesaugt. Während des langsamen Anstiegs des Wasserstands kann die im Zwischenraum befindliche Luft durch Wasser ersetzt werden, ohne daß sich Luftblasen wieder im Wasser lösen.

Die automatische Datenerfassung wurde so ausgelegt, daß die Messungen im regelmäßigen zeitlichen Abstand erfolgen. Die aktuellen Meßwerte und der Temperaturverlauf eines beliebigen Thermoelements können am Bildschirm ausgegeben werden. Dadurch kann man einfach erkennen, ob die Temperatur einen stationären Zustand erreicht hat. Nachdem sich der stationäre Zustand eingestellt hat, werden die zur Auswertung nötigen Meßdaten aufgenommen. Diese Werte werden in Dateiform unter der Versuchskennung abgelegt und später weiterverarbeitet.

3 Wärmetransport durch freie Konvektion

Die Wärmeübertragung bei freier Konvektion entsteht auf Grund von Dichteunterschieden meist als Folge von Temperaturunterschieden. Der mittlere dimensionslose Wärmeübergangskoeffizient kann mit Hilfe der Kennzahlen Nu (Nusselt-Zahl), Gr (Grashof-Zahl) und Pr (Prandtl-Zahl) in der Form:

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (3.1)$$

beschrieben werden. Dabei ist die Nusselt-Zahl $Nu = \alpha l / \lambda$ ein Maß für den übertragenen Wärmestrom. Durch die Grashof-Zahl $Gr = g\beta l^3 \Delta\vartheta / \nu^2$ wird die Stärke der Konvektionsströmung beschrieben. Mit der Prandtl-Zahl $Pr = \nu / a$ werden die Stoffeigenschaften des strömenden Mediums berücksichtigt.

3.1 Grashof-, Rayleigh- und Nusselt-Zahl

Wenn eine Auftriebströmung in einem Medium (Flüssigkeit, Index Fl) durch Differenzen zwischen der Temperatur des Mediums nahe einer Körperoberfläche (Rohrwand, Index W) und der Temperatur des Mediums außerhalb der Strömungsgrenzschicht (Index ∞) hervorgerufen wird, so wird die Grashof-Zahl Gr_{Fl} wie folgt definiert:

$$Gr_{Fl} = \frac{g\beta_{Fl} l^3 \Delta\vartheta}{\nu_{Fl}^2} \quad (3.2)$$

Hierin ist l eine, für den die Konvektion verursachenden Körper, charakteristische Länge (Überströmlänge). Im Fall eines horizontalen Heizrohres wird als Überströmlänge der Durchmesser D des Rohres gewählt. $\Delta\vartheta = \vartheta_W - \vartheta_\infty$ ist die antreibende Temperaturdifferenz, ν_{Fl} und β_{Fl} kennzeichnen die kinematische Viskosität bzw. den Volumenausdehnungskoeffizienten des Mediums. Alle Stoffwerte sind mit ihren Werten für die mittlere Filmtemperatur ϑ_{Film} :

$$\vartheta_{Film} = \frac{\vartheta_W + \vartheta_\infty}{2} \quad (3.3)$$

einzusetzen. Dabei bezeichnet ϑ_W die Temperatur des Mediums unmittelbar an der Rohrwand und ϑ_∞ die Temperatur im ungestörten Medium.

In den Gleichungen zum Wärmeübergang bei freier Konvektion kommt häufig das Produkt:

$$Gr_{Fl} \cdot Pr_{Fl} = \frac{g\beta_{Fl} D^3 (\vartheta_W - \vartheta_\infty)}{\nu_{Fl} a_{Fl}} = Ra_{Fl} \quad (3.4)$$

vor, das auch als Rayleigh-Zahl Ra_{Fl} bezeichnet wird.

Die über die Oberfläche des Heizrohres gemittelte Nusselt-Zahl Nu_{Fl} ist wie folgt definiert:

$$\text{Nu}_{\text{Fl}} = \frac{\alpha D}{\lambda_{\text{Fl}}} \quad (3.5)$$

Dabei ist α der Wärmeübergangskoeffizient am Heizrohr, D der Durchmesser des Heizrohres und λ_{Fl} die Wärmeleitfähigkeit des fluiden Mediums.

Bei einem beheizten waagerechten Zylinder gibt es bei reiner Wärmeleitung (vor Einsetzen der Konvektion) einen minimalen Wärmefluß an die Umgebung: $\text{Nu}_{\text{min}} \approx 0,36$ (/Churchill (1975)/; /Kakaç (1985)/). Unter Berücksichtigung dieser Tatsache gaben Tsubouchi und Masuda einen einfachen Ausdruck an, um die gemessenen Werte mit hinreichender Genauigkeit zu approximieren /Fand (1983)/ (für $10^{-6} < \text{Ra}_{\text{Fl}} \leq 10^9$):

$$\text{Nu}_{\text{Fl}} = 0,36 + 0,048 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,125} + 0,52 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,25} \quad (3.6)$$

Churchill und Chu (1975) ermittelten eine Korrelationsgleichung aus Meßwerten mehrerer Autoren, die im VDI-Wärmeatlas /VDI (1997), Fa/ angegeben wird und für $0 < \text{Ra}_{\text{Fl}} \leq 10^{12}$ und $0 < \text{Pr}_{\text{Fl}} < \infty$ gültig ist:

$$\text{Nu}_{\text{Fl}} = \left\{ 0,6 + \frac{0,387 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{1/6}}{\left[1 + (0,559/\text{Pr}_{\text{Fl}})^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3.7)$$

Zur Vereinfachung der Korrelierung der zahlreichen Meßwerte von verschiedenen Autoren unterteilte Morgan (1975) den Verlauf der Rayleigh-Zahl in fünf Bereiche. Für jeden Bereich lassen sich die Meßwerte durch eine einfache Potenzfunktion wiedergeben:

$$\text{Nu}_{\text{Fl}} = C_1 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{C_2} = \begin{cases} 0,675 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,058}, & 10^{-10} < \text{Ra}_{\text{Fl}} \leq 10^{-2} \\ 1,020 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,148}, & 10^{-2} < \text{Ra}_{\text{Fl}} \leq 10^2 \\ 0,850 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,188}, & 10^2 < \text{Ra}_{\text{Fl}} \leq 10^4 \\ 0,480 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,250}, & 10^4 < \text{Ra}_{\text{Fl}} \leq 10^7 \\ 0,125 \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,333}, & 10^7 < \text{Ra}_{\text{Fl}} \leq 10^{12} \end{cases} \quad (3.8)$$

Fand und Brucker (1983) korrelierten zahlreiche Messungen aus der Literatur mit Ra_{Fl} , Pr_{Fl} und einer weiteren Kennzahl Ge (Gebhart-Zahl), die den Einfluß der Energiedissipation aufgrund der Viskosität des Strömungsmediums bei niedrigen Rayleigh-Zahlen berücksichtigt. Die Korrelation sieht dann wie folgt aus (für $10^{-8} < \text{Ra}_{\text{Fl}} < 10^8$ und $0,7 < \text{Pr}_{\text{Fl}} < 10^4$):

$$\text{Nu}_{\text{Fl}} = 0,400 \text{Pr}_{\text{Fl}}^{0,0432} \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,25} + 0,503 \text{Pr}_{\text{Fl}}^{0,0344} \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,0816} + \frac{0,958 \text{Ge}^{0,122}}{\text{Pr}_{\text{Fl}}^{0,06} \text{Ra}_{\text{Fl}}^{0,0511}} \quad (3.9)$$

mit
$$\text{Ge} = \frac{g \beta_{\text{Fl}} D}{c_{p,\text{Fl}}}$$

In Bild 3.1 sind diese vier Korrelationsgleichungen (Gl. 3.6 bis 3.9) gegenübergestellt. Während alle vier Korrelationen eine gute Übereinstimmung bei größeren Rayleigh-Zahlen zeigen, weist bei niedrigeren Rayleigh-Zahlen $Ra_{Fl} < 10^{-5}$ die Gleichung von Morgan niedrigere Nusselt-Zahlen auf.

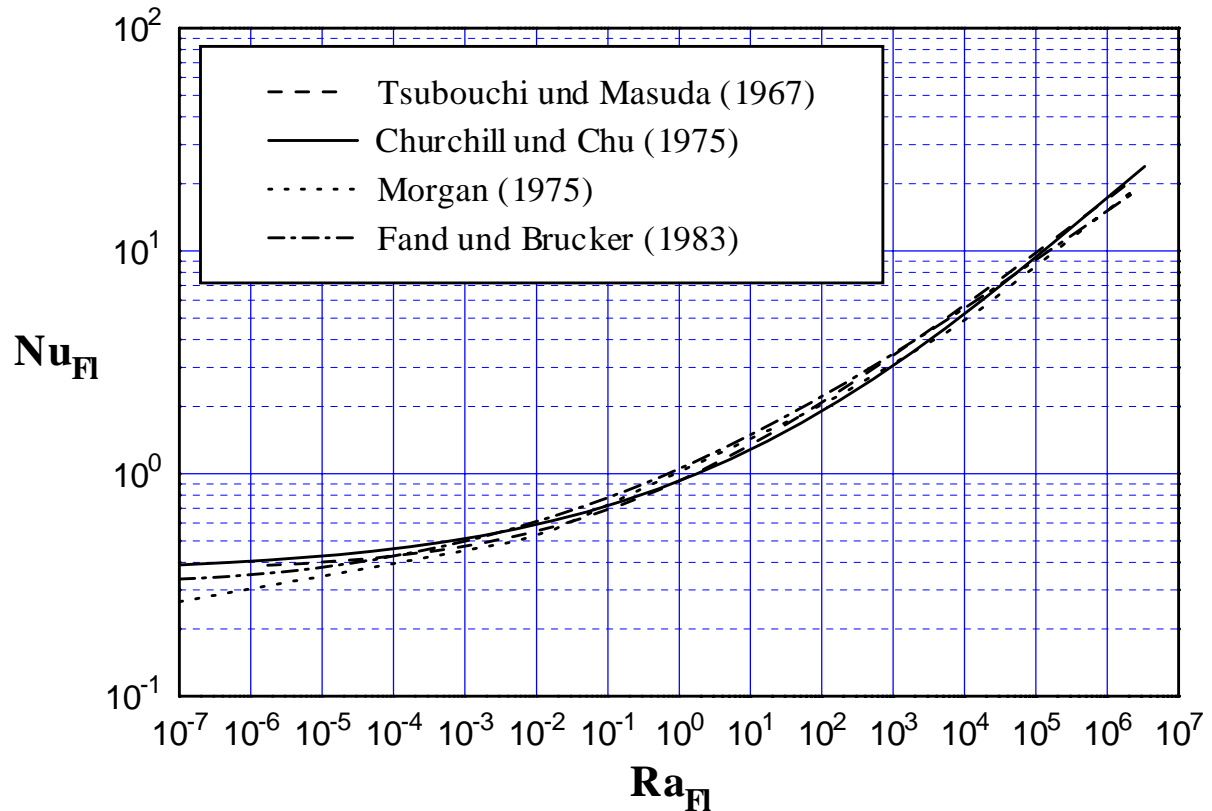


Bild 3.1: Vergleich der Korrelationen für freie Konvektion am horizontalen Rohr. Für die Berechnung wurde Wasser als Medium gewählt; $\vartheta_{\infty} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ und $D = 8,5 \text{ mm}$ wurden angenommen.

3.2 Wärmeübergang an übereinander liegenden Rohren

Der Wärmeübergang an übereinander liegenden Rohren verhält sich anders als an Einzelrohren, da sich die Rohre gegenseitig beeinflussen. Bild 3.2 zeigt die Messungen von Tokura et al. (1983) für zwei bzw. drei übereinander liegende Rohre ($D = 28,5 \text{ mm}$) in Luft. Die dimensionslose Temperatur des Rohres ist wie folgt definiert:

$$\Theta_i = \frac{\vartheta_{w_i} - \vartheta_{\infty}}{\vartheta_{w_1} - \vartheta_{\infty}} \quad (3.10)$$

und wird über der Rohrnummer i aufgetragen. Als Rohr 1 wird das unterste Rohr bezeichnet, das weitere, höherliegende Rohr dann als Rohr 2, und das oberste (im Falle von drei Rohren) als Rohr 3 (siehe Bild 3.3). ϑ_{w_1} ist die Wandtemperatur des Rohres 1.

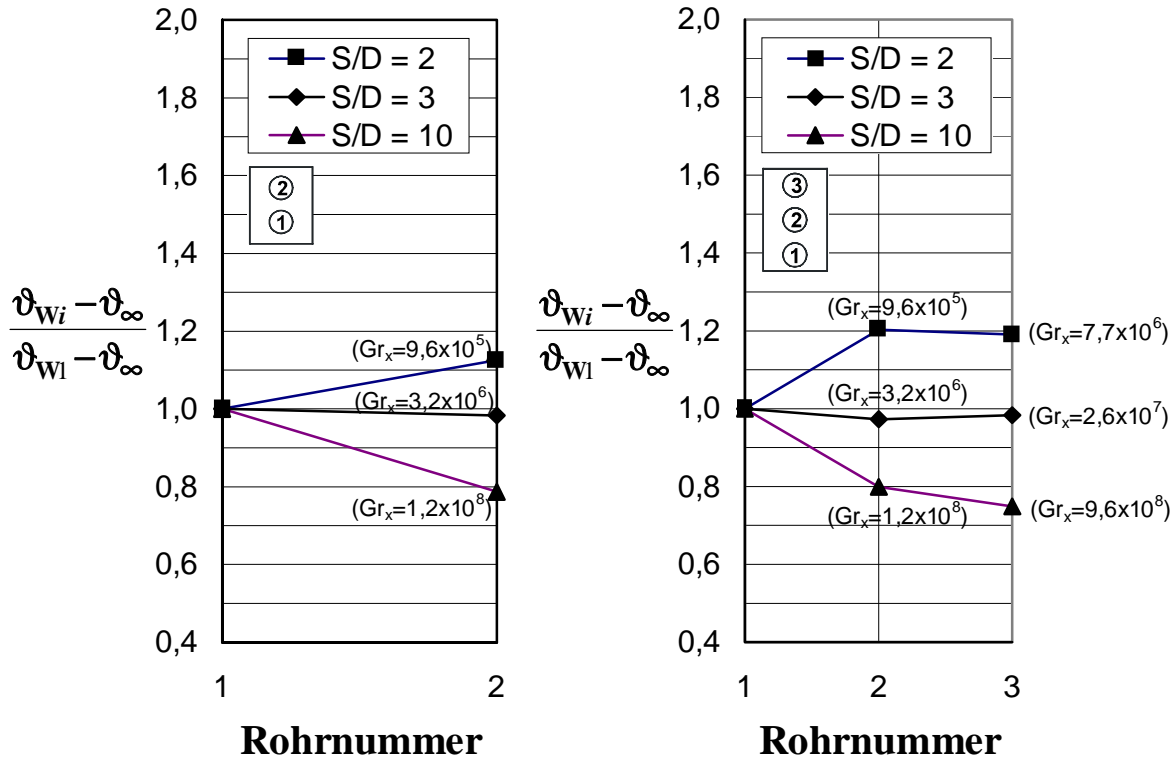


Bild 3.2: Dimensionslose Temperaturen der Rohre für zwei (links) und drei (rechts) übereinander liegende Rohre bei verschiedenen Teilungsverhältnissen S/D , umgerechnet nach Meßwerte von Tokura et al. (1983). ($Gr_{Fl} = 1,2 \cdot 10^5$ für Rohr 1, $\dot{q} = 400 \text{ W/m}^2$ für alle Rohre, $\vartheta_\infty = 20^\circ\text{C}$).

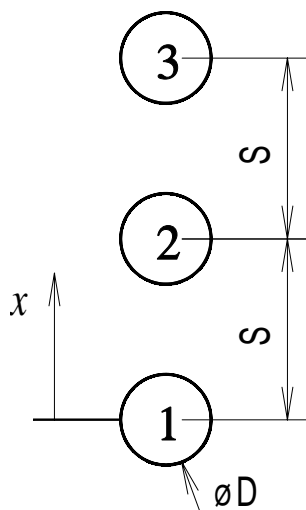


Bild 3.3: Skizze zur Darstellung der Bezeichnung der Rohre

Sowohl bei zwei als auch bei drei Rohren ist bei kleinem Rohrabstand/Rohrdurchmesser-Verhältnis (Teilungsverhältnis) $S/D = 2$ die dimensionslose Temperatur Θ_2 des Rohres 2 größer als Θ_1 des Rohres 1, da das Rohr 2 durch die aufwärts gerichtete warme Strömung vom Rohr 1 beeinflusst wird. Die Erhöhung der Temperatur des Rohres 2 läßt sich durch die erhöhte Anströmtemperatur erklären: Um Wärme abzugeben, muß die Wandtemperatur ϑ_{w2} größer werden bei größerer Anströmtemperatur.

Mit größer werdendem Rohrabstand S bzw. Teilungsverhältnis S/D wird die dimensionslose Temperatur Θ_2 kleiner, da sich bei größerem Teilungsverhältnis die Anströmung zum Rohr 2 allmählich abkühlt. Dagegen wirkt sich diese

Anströmung wie eine erzwungene Konvektion aus und vergrößert den Wärmeübergang. Dies führt dann zu einer niedrigen dimensionslosen Temperatur. Die Messungen von Brodowicz

und Kierkus (1966) an einem beheizten Draht ($D = 0,075 \text{ mm}$, $L = 250 \text{ mm}$, $\dot{Q} = 2,438 \text{ W}$) in Luft zeigten, daß selbst 8 cm über dem Draht die Geschwindigkeit der strömenden Luft aufgrund der freien Konvektion 17,2 cm/s betragen kann. Für übereinander liegende Rohre ist deswegen der Einfluß der Anströmgeschwindigkeit, die vom unteren Rohr verursacht wird, nicht zu unterschätzen.

Die dimensionslose Temperatur Θ_3 des Rohres 3 wird auch von dem unten liegenden Rohr beeinflusst. Bei großem Teilungsverhältnis $S/D = 10$ sinkt Θ_3 gegenüber Θ_2 weiter, während sich bei kleinem Teilungsverhältnis $S/D = 2$, Θ_3 nicht weiter erhöht. Die dimensionslose Temperatur Θ_3 ist sogar ein wenig kleiner als Θ_2 . Dieses Phänomen wurde auch von Marsters (1972) angegeben. Er schloß, daß für die charakteristische Länge anstatt des Rohrdurchmessers D die Position x (siehe Bild 3.3) einzusetzen ist. Der Temperaturabfall tritt in dem Bereich auf:

$$2 \cdot 10^6 < Gr_x < 8 \cdot 10^6 \quad (3.11)$$

mit
$$Gr_x = \frac{g\beta_{Fl} x^3 (\vartheta_{w1} - \vartheta_{\infty})}{v_{Fl}^2}$$

Dabei wird x vom Mittelpunkt des untersten Rohres 1 aus gemessen.

Die experimentelle Untersuchung von Lieberman und Gebhart (1969) zeigte, daß ein solcher Temperaturabfall bei:

$$Gr_x = 6,7 \cdot 10^5 \quad (3.12)$$

einsetzt.

Nach den Messungen von Tokura et al. (siehe Bild 3.2, rechts) kommt der Temperaturabfall bei $S/D = 2$ (bei $x = 2S$, an der Stelle des Rohres 3) vor. Die Grashof-Zahl beträgt:

$$\begin{aligned} Gr_x &= \frac{g\beta_{Fl} (2S)^3 \Delta\vartheta}{v_{Fl}^2} = \left(\frac{2S}{D}\right)^3 \cdot \frac{g\beta_{Fl} D^3 \Delta\vartheta}{v_{Fl}^2} = \left(\frac{2S}{D}\right)^3 \cdot Gr_{Fl} \\ &= 64 \cdot 1,2 \cdot 10^5 \\ &= 7,7 \cdot 10^6 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Aufgrund der Bedingungen (Gl 3.11 bis 3.13) liegt die Grashof-Zahl Gr_x für den Temperaturabfall zwischen $6,7 \cdot 10^5$ und $8 \cdot 10^6$.

Der Temperaturabfall kann durch das Auftreten von Turbulenz erklären werden: Experimente von Bill und Gebhart (1975) in Luft für ein Einzelrohr zeigten, daß die laminare Strömung,

die aufgrund der freien Konvektion entsteht, nach genügend großer Lauflänge x in eine turbulente Strömung übergeht. Die Autoren geben folgenden Übergangsbereich an:

$$6,4 \cdot 10^7 \leq Gr_x \leq 2,95 \cdot 10^8 \quad (3.14)$$

Für übereinander liegende Rohre wird die laminare Strömung durch die darüberliegenden Rohre gestört. Das Auftreten von turbulenter Strömung findet früher ($Gr_x = 6,7 \cdot 10^5$ bis $8 \cdot 10^6$) statt. Dies verbessert wesentlich den Wärmeübergang der darüberliegenden Rohre und hat eine niedrigere Temperatur zur Folge.

Zur Darstellung des Einflusses der Wärmestromdichte auf den Temperaturverlauf der Rohre sind in Bild 3.4 die dimensionslosen Temperaturen in Abhängigkeit von der Rohrnummer für die Teilungsverhältnisse $S/D = 2, 4$ und 10 mit der Wärmestromdichte als Parameter aufgetragen /Marsters (1972)/. Als Medium wurde Luft eingesetzt.

Die dimensionslosen Temperaturverläufe vom Rohr 1 bis zum Rohr 3 sind ähnlich, wie in Bild 3.2. Mit steigender Wärmestromdichte nimmt die dimensionslose Temperatur der Rohre 2 und 3 im allgemeinen ab. Dies gilt für alle Teilungsverhältnisse.

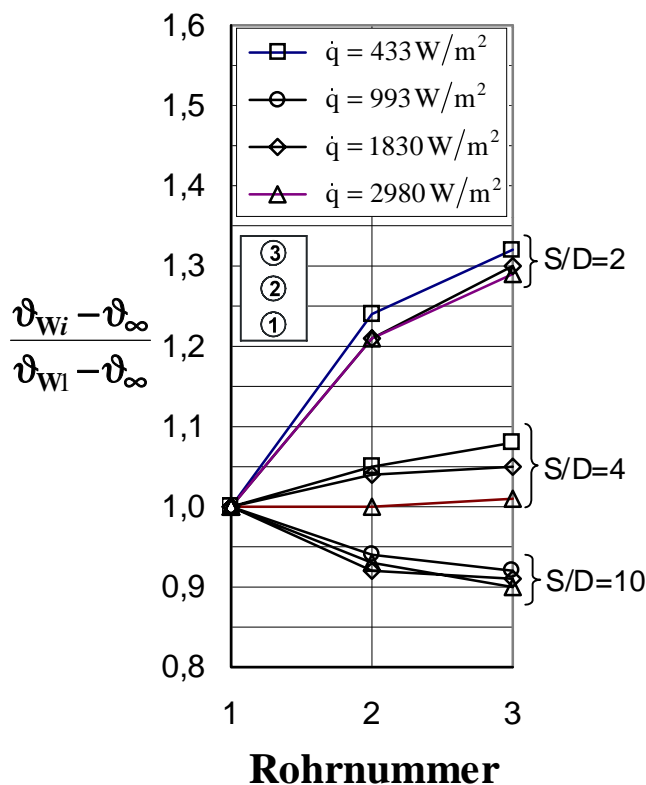


Bild 3.4: Dimensionslose Temperaturen in Abhängigkeit von der Rohrnummer bei den Teilungsverhältnissen $S/D = 2, 4$ und 10 mit der Wärmestromdichte als Parameter, nach Marsters (1972). ($Gr_{Fl} = 750$ bis 2000)

4 Wärmetransport in porösen Medien

4.1 Strömung durch ein poröses Medium

Im Jahr 1856 führte H. Darcy erste experimentelle Untersuchungen zur Strömung von Wasser durch ein mit Sand gefülltes Rohr durch /Bear (1988)/. Er postulierte ein Gesetz, das den Fließvorgang einer Flüssigkeit durch poröse Medien (Schüttungen) beschreibt: Strömt eine Flüssigkeit durch ein poröses Medium, so ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen der Filtergeschwindigkeit w , die den Volumenstrom pro Gesamtquerschnittsfläche charakterisiert:

$$w = \frac{\dot{V}}{A}, \quad (4.1)$$

und dem Druckgradient $grad p$:

$$- grad p = \frac{\eta}{K} \cdot w \quad (4.2)$$

η ist die dynamische Viskosität der Flüssigkeit und K ist die Permeabilität der Schüttung, welche ein Maß für die Durchlässigkeit der Schüttung ist. Das negative Vorzeichen auf der linken Seite der Gleichung berücksichtigt, daß die Strömung in Richtung abfallenden Druckes erfolgt.

Es erweist sich im folgenden als hilfreich, die Darcy-Gleichung (4.2) mit dem Faktor $d/(w\eta)$ zu multiplizieren. Man erhält:

$$-\frac{d}{w\eta} grad p = \frac{d}{K} \quad (4.3)$$

Kozeny (1927) gelang es, die Permeabilität für kleine Strömungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Porosität darzustellen:

$$K = \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2 \kappa S_0^2} \quad (4.4)$$

ε ist die Porosität der Schüttung, S_0 ist die spezifische Oberfläche des Partikels (Oberfläche pro Volumen), κ ist eine experimentell zu ermittelnde Konstante, die heute als Kozeny-Carman-Konstante bekannt ist. Für poröse Medien, die aus Kugeln mit gleichem Durchmesser bestehen, ist:

$$S_0 = \frac{A}{V} = \frac{\pi d^2}{\frac{1}{6} \pi d^3} = \frac{6}{d} \quad (4.5)$$

Mit dem von Carman (1956) vorgeschlagenen Wert von:

$$\kappa = 5 \quad (4.6)$$

erhält man, eingesetzt in Gl. (4.4), die Permeabilität:

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} \quad (4.7)$$

Der lineare Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit und Druckgradient gilt jedoch nur für kleine Filtergeschwindigkeiten, bei denen die Zähigkeitskräfte gegenüber den Trägheitskräften dominieren. Bei höheren Geschwindigkeiten weicht diese Beziehung vom linearen Verhalten ab. Forchheimer (1901) schlug eine quadratische Abhängigkeit zwischen Filtergeschwindigkeit und Druckgradient vor:

$$-grad\ p = a' w + b' w^2 \quad (4.8)$$

a' und b' sind empirische Konstanten und werden für jede Kombination von porösem Medium und Flüssigkeit neu bestimmt. Die Unzulänglichkeit dieser Gleichung liegt darin, daß die gegenseitige Abhängigkeit von Geometrie und Viskosität nicht berücksichtigt wird, obwohl die Viskosität von der Porenform und -größe der Schüttung beeinflußt wird.

Ergun (1952) untersuchte die Abhängigkeit der Filtergeschwindigkeit von der Eigenschaft der Flüssigkeit und von der Form und Größe des porösen Materials. Er schlug vor, daß die Forchheimer-Gleichung (4.8) folgendermaßen ausgedrückt werden kann:

$$-grad\ p = \left(\frac{A \alpha_\varepsilon \eta}{d^2} \right) w + \left(\frac{B \beta_\varepsilon \rho}{d} \right) w^2 \quad (4.9)$$

mit
$$\alpha_\varepsilon = \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad \text{und} \quad \beta_\varepsilon = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}$$

Hier ist d der charakteristische Durchmesser des porösen Mediums, ρ die Dichte der Flüssigkeit und ε die Porosität der Schüttung. Für die universellen, experimentell zu bestimmenden, dimensionslosen Konstanten, die Ergun-Konstanten A und B , schlug er folgende Werte vor:

$$A = 150 \quad (4.10)$$

$$B = 1,75 \quad (4.11)$$

Die Permeabilität wird dann wie folgt definiert:

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{A(1-\varepsilon)^2} = \frac{d^2 \varepsilon^3}{150(1-\varepsilon)^2} \quad (4.12)$$

Anhand der zahlreichen experimentellen Daten empfohlen Macdonald et al. (1979) für die Ergun-Konstanten Werte von:

$$A = 180 \quad (4.13)$$

$$B = 1,8 \quad (4.14)$$

Anhand der experimentellen Messungen gaben Fand et al. (1987) für die Ergun-Konstanten folgende Werte:

$$A = 182 \quad (4.15)$$

$$B = 1,92 \quad (4.16)$$

für die Forchheimer-Strömung an. Für turbulente Strömung werden die Konstanten A und B in der Ergun-Gleichung (4.9) durch:

$$A' = 225 \quad (4.17)$$

$$B' = 1,61 \quad (4.18)$$

ersetzt. Damit erhält man die Ergun-Gleichung für turbulente Strömung:

$$-grad p = \left(\frac{A' \alpha_\varepsilon \eta}{d^2} \right) w + \left(\frac{B' \beta_\varepsilon \rho}{d} \right) w^2 \quad (4.19)$$

mit $\alpha_\varepsilon = \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$ und $\beta_\varepsilon = \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}$

Experimentell bestimmten Fand et al. die Kozeny-Carman-Konstante:

$$\kappa = 5,34 \quad (4.20)$$

Die Permeabilität wird dann nach Gl. (4.4) wie folgt definiert:

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{192,24(1-\varepsilon)^2} \quad (4.21)$$

Dies gilt für die untersuchten Durchmesser der porösen Medien bis $d \leq 4$ mm.

In dieser vorliegenden Arbeit wird die Permeabilität nach dem Vorschlag von Macdonald et al. (1979) wie folgt definiert (/Bear (1972)/; /Nield (1992)/):

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{180(1-\varepsilon)^2} \quad (4.22)$$

Multipliziert man Gleichung (4.9) mit dem Faktor $d/(w\eta)$, so erhält man:

$$-\frac{d}{w\eta} grad p = \frac{A\alpha_\varepsilon}{d^2} d + \frac{B\beta_\varepsilon \rho w d}{d \eta} \quad (4.23)$$

An dieser Stelle werden die Konstanten C_{F1} und C_{F2} wie folgt definiert:

$$C_{F1} = \frac{A\alpha_\varepsilon}{d^2} \quad (4.24)$$

$$C_{F2} = \frac{B\beta_\varepsilon}{d} \quad (4.25)$$

Die kinematische und die dynamische Viskosität sind wie folgt miteinander verknüpft:

$$v = \frac{\eta}{\rho} \quad (4.26)$$

Mit der Definition der Reynolds-Zahl:

$$\text{Re} = \frac{wd}{v} \quad (4.27)$$

erhält man aus Gleichung (4.23) folgende Beziehung:

$$-\frac{d}{w\eta} \text{grad } p = C_{F1}d + C_{F2} \cdot \text{Re} \quad (4.28)$$

Für turbulente Strömung gilt dann aus Gl. (4.19):

$$-\frac{d}{w\eta} \text{grad } p = C_{T1}d + C_{T2} \cdot \text{Re} \quad (4.29)$$

mit

$$C_{T1} = \frac{A' \alpha_\epsilon}{d^2}$$

$$C_{T2} = \frac{B' \beta_\epsilon}{d}$$

Neue Untersuchungen an durchströmten Schüttungen ($w = 0,0004$ bis $0,13$ m/s) /Fand (1987)/ zeigen, daß das Strömungsverhalten von Flüssigkeiten in porösen Medien in sechs Bereiche eingeteilt werden kann, in denen jeweils unterschiedliche Abhängigkeiten zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druckgradient vorliegen. Fand et al. ermittelten aus experimentellen Untersuchungen an einer wassergesättigten Schüttung gleichförmiger Glaskugeln mit einem Durchmesser von 2 mm bis 4 mm folgende Reynolds-Zahlen:

1. Prä-Darcy Strömung: Für extrem kleine Strömungsgeschwindigkeiten (schleichende Strömung) existiert ein Bereich $\text{Re} \leq 10^{-5}$, in dem das Darcy-Gesetz keine Gültigkeit besitzt. Dies wird von Bear (1972) durch ein nicht-newtonsches Verhalten der Flüssigkeit erklärt, wobei an den Porenwänden sogar eine der Hauptströmungsrichtung entgegengesetzte schwache Strömung auftreten kann.
2. Darcy-Strömung: Es gilt das Darcy-Gesetz (Gl. 4.2). Die Reynolds-Zahlen liegen bei $10^{-5} < \text{Re} \leq 2,3$.
3. Übergang Darcy-/Forchheimer-Strömung: $2,3 < \text{Re} \leq 5$.
4. Forchheimer-Strömung: $5 < \text{Re} \leq 80$. Es gilt die Ergun-Gleichung (4.28) für Forchheimer-Strömung mit den Konstanten $A = 182$ und $B = 1,92$ (Gl. 4.15 und 4.16).
5. Übergang Forchheimer-/turbulente Strömung: $80 < \text{Re} \leq 120$.
6. Turbulente Strömung: $\text{Re} > 120$. Es gilt die Ergun-Gleichung (4.29) für turbulente Strömung mit den Konstanten $A' = 225$ und $B' = 1,61$ (Gl. 4.17 und 4.18).

Diese sechs Bereiche der Strömung durch ein poröses Medium sind in Bild 4.1 qualitativ dargestellt. Dabei ist die Größe $-(d/w\eta)\text{grad } p$ in Abhängigkeit von der Reynolds-Zahl Re dargestellt. So erhält man für den Bereich der Darcy-Strömung eine horizontale Gerade mit dem Ordinatenwert (Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate) d/K (siehe Gl. 4.3) und für die Bereiche der Forchheimer- bzw. der turbulenten Strömung jeweils geneigte Geraden mit den Ordinatenwerten (Schnittpunkt der Geraden mit der Ordinate) $A\alpha_\epsilon/d = C_{F1} \cdot d$ und der Steigung $B\beta_\epsilon/d = C_{F2}$ für die Forchheimer-Strömung (siehe Gl. 4.28) bzw. $A'\alpha'_\epsilon/d = C_{T1} \cdot d$ und $B'\beta'_\epsilon/d = C_{T2}$ für die turbulente Strömung (siehe Gl. 4.29).

Die Strömungsvorgänge in den beiden Übergangsbereichen 3 und 5 sind mathematisch nur schwer zu erfassen. Sie können nicht durch einfache Beziehungen zwischen Strömungsgeschwindigkeit und Druckgradient dargestellt werden. Fand et al. (1987) empfahlen zur Umgehung dieser Schwierigkeit, daß das Strömungsverhalten nur in drei Gebiete eingeteilt wird: Darcy-, Forchheimer- und turbulente Strömung. Die Übergangsbereiche bleiben unberücksichtigt. Mit ausreichender Genauigkeit kann der Übergang von Darcy- zu Forchheimer-Strömung bei einer Reynolds-Zahl von $Re = 3$ und der Übergang von Forchheimer- zu turbulenter Strömung bei $Re = 100$ angenommen werden.

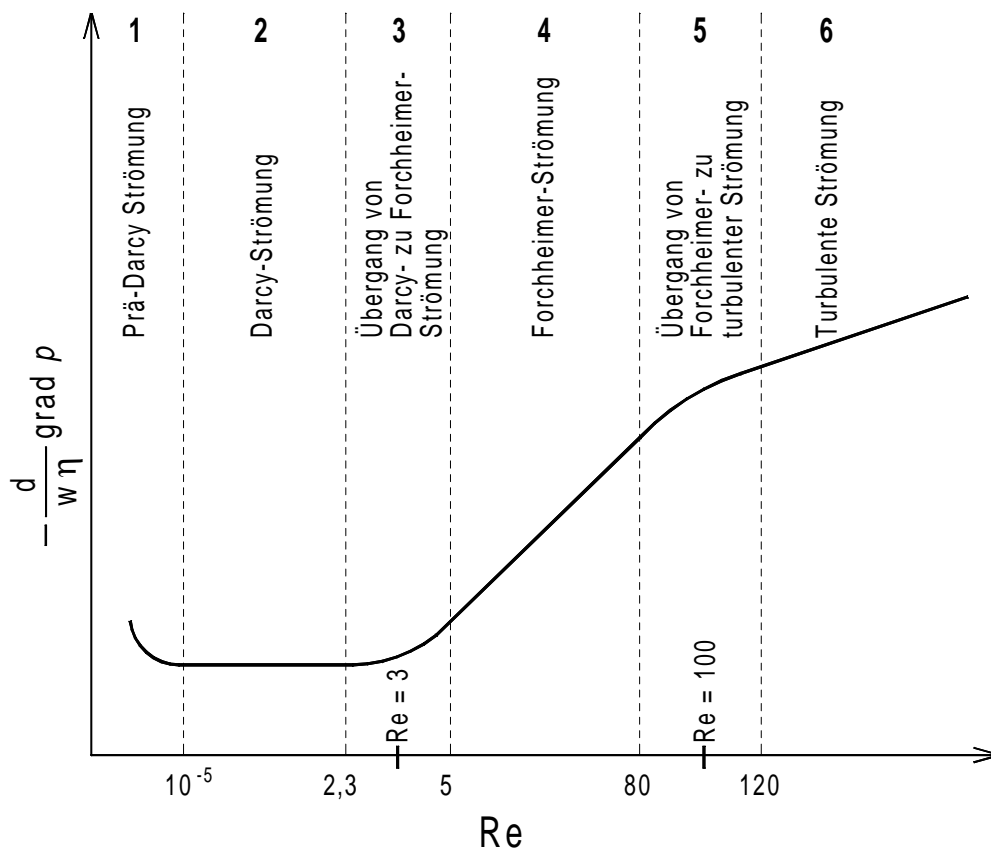


Bild 4.1: Unterschiedliche Strömungsformen durch ein poröses Medium, nach /Fand (1987)/.

4.2 Freie Konvektion in porösen Medien

4.2.1 Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl Ra_S und Nusselt-Zahl Nu_S

Die freie Konvektion wird durch Auftriebskräfte aufgrund von Dichteunterschieden in der Flüssigkeit hervorgerufen. Zur Mathematischen Beschreibung der Konvektion in porösen Medien wird die sogenannte Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl eingeführt:

$$Ra_S = \frac{g\beta_{Fl}KD(\vartheta_W - \vartheta_\infty)}{\nu_{Fl}a_S} \quad (4.30)$$

Man erhält diesen Ausdruck aus der Darcy-Gleichung unter der Annahme (Boussinesq-Approximation), daß die Dichte in der Bewegungsgleichung (Darcy-Gleichung) nur in dem für die freie Konvektion verantwortlichen Auftriebsterm als lineare Funktion der Temperatur angenommen wird, in allen übrigen Termen aber als konstant. Ra_S unterscheidet sich von der in reinen Flüssigkeiten verwendeten Rayleigh-Zahl Ra_{Fl} (siehe Kapitel 3) dadurch, daß die charakteristische Länge D des überströmten Körpers nicht in der 3. Potenz vorkommt, sondern stattdessen das Produkt $(K \cdot D)$. ν_{Fl} und β_{Fl} sind die kinematische Viskosität und der Volumenausdehnungskoeffizient der Flüssigkeit, a_S ist die effektive Temperaturleitfähigkeit des wassergesättigten porösen Mediums.

Theoretische und experimentelle Untersuchungen von Katto et al. (1967) zeigen, daß die effektive Temperaturleitfähigkeit wie folgt zu errechnen ist:

$$a_S = \frac{\lambda_S}{\rho_{Fl}c_{p,Fl}} \quad (4.31)$$

Die effektive Wärmeleitfähigkeit λ_S der wassergesättigten Kies-Schüttung berechnet sich aus den Stoffwerten von Kies und Wasser (siehe Abschnitt 4.3.6).

Die Nusselt-Zahl Nu_S an Rohren in porösen Medien wird mit der effektiven Wärmeleitfähigkeit λ_S wie folgt gebildet:

$$Nu_S = \frac{\alpha D}{\lambda_S} \quad (4.32)$$

4.2.2 Klassifizierung der Strömungsform

Für die freie Konvektion an einem Zylinder kann aus der Darcy-Gleichung ein Ausdruck für die maximale, entlang der Zylinderoberfläche auftretende Strömungsgeschwindigkeit w_{max} abgeleitet werden /Fand (1986)/:

$$w_{max} = \frac{g\beta_{Fl}K(\vartheta_W - \vartheta_\infty)}{\nu_{Fl}} \quad (4.33)$$

Damit kann eine maximale Reynolds-Zahl Re_{\max} gebildet werden, die auf dem Durchmesser d der Kiespartikel und der maximalen Geschwindigkeit w_{\max} an der Oberfläche des Zylinders basiert:

$$Re_{\max} = \frac{w_{\max} d}{\nu_{\text{Fl}}} \quad (4.34)$$

$$Re_{\max} = \frac{g \beta_{\text{Fl}} K d (\vartheta_{\text{W}} - \vartheta_{\infty})}{\nu_{\text{Fl}}^2} = Gr_{\max} \quad (4.35)$$

Da diese Reynolds-Zahl Re_{\max} der Grashof-Zahl Gr_{\max} entspricht, die eine üblich verwendete charakteristische Größe für den Wärmeübergang bei freier Konvektion ist, wird im folgenden diese Kennzahl (Gl. 4.35) als maximale Grashof-Zahl bezeichnet. Hiermit soll einer Verwechslung mit einer erzwungenen Konvektion vorgebeugt werden /Hahne (2000)/.

Man erhält ein Kriterium (siehe auch Bild 4.1), wann zur Auswertung gemessener Daten die Darcy-, Forchheimer- oder turbulente Theorie anzuwenden ist, nämlich:

$$\text{Darcy-Theorie:} \quad 10^{-5} < Gr_{\max} \leq 3 \quad (4.36)$$

$$\text{Forchheimer-Theorie:} \quad 3 < Gr_{\max} \leq 100 \quad (4.37)$$

$$\text{Turbulente Theorie:} \quad 100 < Gr_{\max} \quad (4.38)$$

4.2.3 Wärmeübergangsbeziehungen nach Fand und Yamamoto (1990)

Fand et al. (1986, 1990, 1994) führten experimentelle Untersuchungen an einem beheizten, horizontalen Zylinder (Durchmesser D) in wasser- und silikonölgesättigten Glaskugelschüttungen ($0,1 \leq d/D \leq 2$) durch und gaben Korrelationsgleichungen für die Wärmeübergangskoeffizienten an. Obwohl die neuesten Gleichungen vom Jahr 1994 einen sehr großen Bereich der Rayleigh-Zahl Ra_S umfassen ($0,003 \leq Ra_S \leq 520$), wurden für den in der vorliegenden Arbeit untersuchten Bereich die Gleichungen vom Jahr 1990 bevorzugt. Die Gleichungen vom Jahr 1994 berücksichtigen die viskose Energiedissipation bei sehr kleinen Rayleigh-Zahlen, was bei den Versuchen mit Silikonöl wichtig ist, weisen jedoch einen größeren Fehler bei der Korrelierung der Meßdaten auf.

Nach Fand und Yamamoto (1990) gilt

Darcy-Strömung und $Ra_S > 3$:

$$Nu_S Pr_S^{0,124} \left[Gr_S^{0,44} Pr_{\text{Fl}}^{0,34} \right]^{\xi} = 0,667 Ra_S^{0,649} \quad (4.39)$$

Forchheimer-Strömung: (keine Angabe zum Gültigkeitsbereich von Ra_S)

$$Nu_S Pr_S^{0,124} \left[Gr_S^{0,24} Pr_{Fl}^{0,49} \right]^\xi = 1,93 Ra_S^{0,319} \left(\frac{C_{F1} D}{C_{F2}} \right)^{0,0585} \quad (4.40)$$

mit
$$\xi = \ln \left\{ 1 + \left[\arctan \left(\frac{d}{D} \right) \right]^2 \right\} \quad (4.41)$$

$$Nu_S = \frac{\alpha D}{\lambda_S}$$

$$Pr_S = \frac{v_{Fl}}{a_S} = \frac{v_{Fl}}{\frac{\lambda_S}{\rho_{Fl} c_{p,Fl}}}$$

$$Gr_S = \begin{cases} \frac{g \beta_{Fl} K D (T_W - T_\infty)}{v_{Fl}^2} & \text{für Darcy - Strömung} \\ \frac{g \beta_{Fl} D (T_W - T_\infty)}{C_{F1} v_{Fl}^2} & \text{für Forchheimer - Strömung} \end{cases}$$

$$Ra_S = \begin{cases} \frac{g \beta_{Fl} K D (T_W - T_\infty)}{v_{Fl} a_S} & \text{für Darcy - Strömung} \\ \frac{g \beta_{Fl} D (T_W - T_\infty)}{C_{F1} v_{Fl} a_S} & \text{für Forchheimer - Strömung} \end{cases}$$

$$C_{F1} = \frac{182(1 - \varepsilon_W)^2}{d^2 \varepsilon_W^3}$$

$$C_{F2} = \frac{1,92(1 - \varepsilon_W)}{d \varepsilon_W^3}$$

$$K = \frac{d^2 \varepsilon_W^3}{192,24(1 - \varepsilon_W)^2}$$

$$\lambda_S = \varepsilon_W \lambda_{Fl} + (1 - \varepsilon_W) \lambda_K$$

Die Gleichungen (4.39) und (4.40) wurden mit der sogenannten wandkorrigierten Porosität ε_W korreliert. Sie berücksichtigt, daß die Porosität an der Wand des Zylinders größer ist als in der restlichen Schüttung, da die Bestandteile der Schüttung die Rohroberfläche punktförmig berühren (siehe Abschnitt 4.3.3). Für die Berechnung muß dann nach Fand et al. (1990, 1994) die Porosität ε durch die wandkorrigierte Porosität ε_W ersetzt werden:

$$\varepsilon_W = \varepsilon \cdot \left[2,778 - \frac{1,778}{\exp \left(0,1 \frac{d}{D} \right)} \right] \quad (4.42)$$

mit $\varepsilon = 0,36$

In beiden Korrelationsgleichungen ist die mittlere Filmtemperatur $\vartheta_{\text{Film}} = (\vartheta_{\text{W}} + \vartheta_{\infty})/2$ als Bezugstemperatur zur Berechnung der Stoffwerte einzusetzen.

Im Bereich der turbulenten Strömung wird in der Literatur keine Gleichung für freie Konvektion an Rohren in Schüttungen angegeben.

4.3 Stoffwerte des Kieses und der Schüttung

Die Stoffwerte der Kies/Wasser-Schüttung sind von den Stoffwerten des Kieses und von denen des Wassers, sowie von der Porosität der Schüttung abhängig. Zur Ermittlung der Stoffwerte von Kies ist die Kenntnis der mineralischen Zusammensetzung nötig. Da die Schüttung nicht aus gleichförmigen Partikeln besteht, ist zur Darstellung der Meßergebnisse die Bestimmung eines gleichwertigen Durchmessers erforderlich (siehe Abschnitt 4.3.2).

Die Schüttung besteht aus Kies mit drei Korngrößenverteilungen 4 bis 8 mm, 8 bis 16 mm, 16 bis 32 mm und Wasser. Die drei Kiessorten stammen aus derselben Kiesabbaustätte und unterscheiden sich lediglich in ihrer Größe, nicht aber in ihrer mineralischen Zusammensetzung. Daher wurde die mineralische Zusammensetzung nur für Kies 8/16 ermittelt.

4.3.1 Zusammensetzung des Kieses und Stoffwerte der Kiesbestandteile

Am Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart wurden zwei Kilogramm des Kieses mit der Korngrößenverteilung 8 bis 16 mm (Kies 8/16) auf die mineralische Zusammensetzung hin untersucht /Giebe (1989)/. Die Steine wurden optisch nach ihrer Farbe und Struktur sortiert, in Mineralklassen eingeteilt und gewogen. Die Volumenanteile $\varphi_i = V_i/V$ wurden aus den gemessenen Massenanteilen $z_i = m_i/m$ und den aus /Landoldt (1967)/ entnommenen Dichten ρ_i wie folgt berechnet:

$$\varphi_i = \frac{V_i}{V} = \frac{z_i/\rho_i}{\sum_{i=1}^8 z_i/\rho_i} \quad (4.43)$$

In Tabelle 4.1 sind Zusammensetzung und Stoffwerte des Kieses dargestellt. Die Werte wurden aus /Landoldt (1967)/ entnommen. Für Kieselschiefer und Strukturquarz lagen keine Werte für die Stoffwerte ρ , c_p und λ vor. Da diese Minerale zu einem hohen Anteil aus SiO_2 bestehen, wurden dieselben Werte wie für Quarzit angenommen. Eine Temperaturabhängigkeit der Stoffwerte kann nicht angegeben werden, da die angegebenen Daten zum Teil für unterschiedliche Temperaturen zwischen 0 °C und 60 °C gelten.

Mineral	Massenanteil $z_i = m_i/m$ [Gew. %]	Volumenanteil $\varphi_i = V_i/V$ [Vol. %]	Dichte ρ [kg/m ³]	spezifische Wärmekapazität c_p [kJ/(kg·K)]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/(m·K)]
Quarzit (SiO ₂)	20,9	20,4	2650	0,78	5,7
Kieselschiefer	12,0	11,6	2650	0,78	5,7
Strukturquarz	18,2	17,8	2650	0,78	5,7
Gneis	7,7	7,3	2750	0,82	2,5
Vulkanit	1,5	1,3	2900	0,7	2,3
Granit	18,6	18,1	2650	0,83	3,0
Kalkstein	5,1	5,5	2400	0,79	3,0
Sandstein	16,0	18,0	2300	0,73	2,0

Tabelle 4.1: Mineralische Zusammensetzung nach /Giebe (1989)/ und Stoffwerte der Kiesbestandteile nach /Landoldt (1967)/

4.3.2 Gleichwertiger Partikeldurchmesser

Polydisperse Schüttungen, welche nicht aus gleichförmigen Partikeln bestehen, dürfen bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit sowie der anderen Werte als monodisperse behandelt werden. Freilich muß dabei der richtige gleichwertige Partikeldurchmesser d der polydispersen Mischung verwendet werden. Für Schüttungen mit einer breiten Korngrößenverteilung ermittelt man den gleichwertigen Durchmesser nach /Fand(1987); VDI(1997), Mh/ aus:

$$d = \left(\sum_{j=1}^n \frac{\varphi_j}{d_j} \right)^{-1} \quad (4.44)$$

Hierin ist φ_j der Volumenanteil, d_j der Durchmesser der j -ten Einzelfraktion und n die Anzahl der unterschiedlichen Einzelfraktionen.

Für die hier untersuchten drei Schüttungen wird angenommen, daß jede Kieszusammensetzung (Kies 4/8, Kies 8/16 und 16/32) eine gleichmäßige Korngrößenverteilung von genügend vielen unterschiedlichen Korndurchmessern aufweist. Für die Berechnung wurde $n > 1000$ angenommen. Dann ergibt sich der gleichwertige Durchmesser:

$$d = \left(\sum_{j=1}^n \frac{\varphi_j}{d_j} \right)^{-1} = \begin{cases} 5,77 \text{ mm für Kies 4/8} \\ 11,54 \text{ mm für Kies 8/16} \\ 23,08 \text{ mm für Kies 16/32} \end{cases} \quad (4.45)$$

4.3.3 Porosität

Die Porosität (Hohlraumanteil) ε gibt das Volumen V_{Fl} der Hohlräume in der Schüttung im Verhältnis zum eingenommenen Gesamtvolumen V_{ges} an:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{Fl}}}{V_{\text{ges}}} \quad (4.46)$$

Unendlich ausgedehnte, regellose Schüttungen aus gleich großen Kugeln haben eine Porosität von $\varepsilon_{\infty} = 0,36$ bis $0,42$. Dabei wird der Bereich $\varepsilon_{\infty} = 0,36$ bis $0,38$ von Schüttungen, die gerüttelt und folgerichtig etwas verdichtet werden, abgedeckt. Für nicht gerüttelte Schüttungen sind hingegen Werte von $\varepsilon_{\infty} = 0,40$ bis $0,42$ üblich /VDI (1997), Mh/.

Für Zufallsschüttungen aus gleich großen Kugeln untersuchten Benenati und Brosilow (1962) die Verteilung der Porosität in Wandnähe experimentell. Das Ergebnis ist in Bild 4.2 wiedergegeben, in dem die örtliche Porosität über der Entfernung x zur ebenen Wand aufgetragen ist. Als Einheit für den Abstand dient der Kugeldurchmesser.

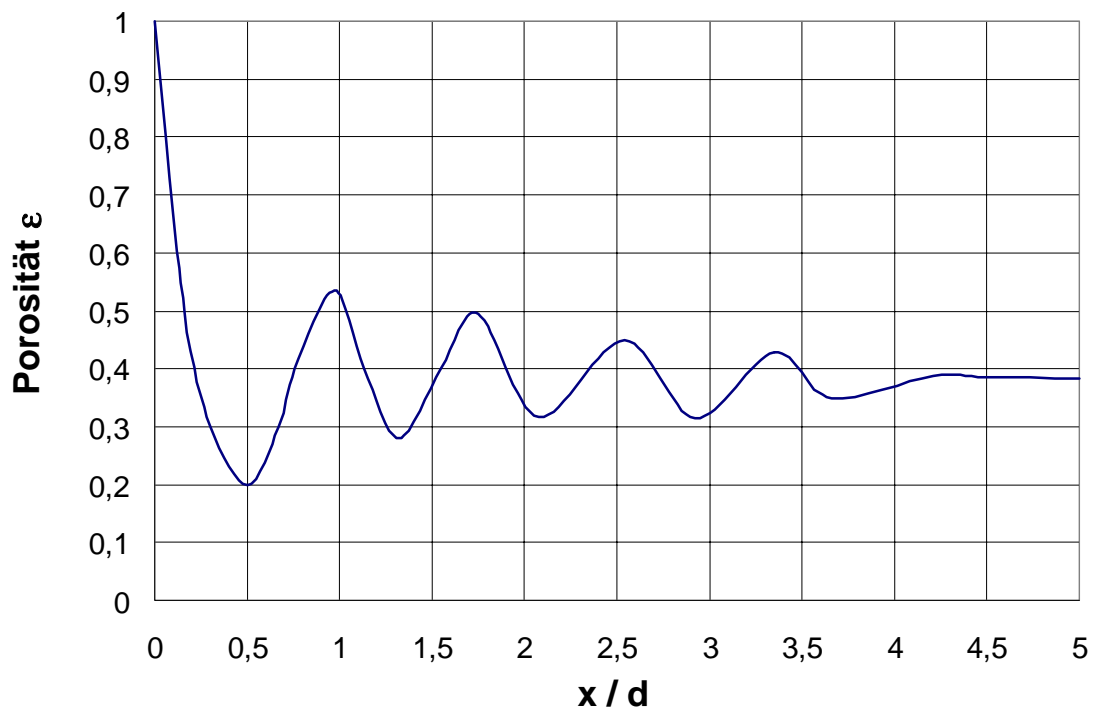


Bild 4.2: Verlauf der Porosität ε bei Kugelschüttungen in Abhängigkeit von dem Verhältnis Abstand x von der ebenen Wand zu Kugeldurchmesser d , nach Benenati und Brosilow (1962).

Die Kurve in Bild 4.2 läßt sich aus der geometrischen Anschauung erklären. Längs der Wand lagern sich die Kugeln in einer Reihe an. Da sie die Wand nur punktförmig berühren, erreicht die Porosität hier nahezu den Wert eins. Die Porosität vermindert sich mit wachsendem

Wandabstand und erreicht beim halben Kugeldurchmesser das absolute Minimum, das in der Schüttung zu finden ist. Danach beginnt sie wieder anzusteigen, kann aber den Wert eins nicht mehr erreichen, da sich die zweite Kugelreihe in die Zwickel der ersten hineinlegt. Die Anordnung jeder folgenden Kugelschicht ist mehr dem Zufall überlassen als die vorhergehende. Entsprechend diesem Übergang von einer geordneten zu einer reinen Zufallspackung schwingt die Größe der Porosität um einen Mittelwert mit abnehmender Amplitude. Die Schwingung ist beim Erreichen der reinen Zufallspackung völlig abgeklungen, was etwa dem Abstand von 4,5- bis 5-fachem Kugeldurchmesser entspricht.

Nach Benenati und Brosilow (1962) nimmt die durch den Wandeinfluß hervorgerufene Änderung der Porosität der Gesamtschüttung also mit steigendem Verhältnis D_{Gef}/d von Gefäß- und Kugeldurchmesser ab. Von einem bestimmten Durchmesser Verhältnis an bleibt die Gesamtporosität der Schüttung konstant. Folgende Zahlenwerte hierfür findet man in der Literatur:

$$1. \text{ Kling (1959) : } \quad D_{\text{Gef}}/d = 10 \quad (4.47)$$

$$2. \text{ McGearry (1961) : } \quad D_{\text{Gef}}/d = 10 \quad (4.48)$$

$$3. \text{ Beavers et al. (1973) : } \quad D_{\text{Gef}}/d = 15 \quad (4.49)$$

Bei diesem oder größerem Durchmesser Verhältnissen ist der Wandeinfluß auf die Gesamtporosität vernachlässigbar. Für polydisperse Schüttungen ist der Einfluß der Gefäßwand noch geringer als für Gleichkornschüttungen, da sich an der Wand Partikel verschiedener Größe anlagern, und daher ergibt sich schon in kleinerem Abstand von der Wand eine Zufallsschüttung.

Zur Bestimmung der Porosität des verwendeten Kieses wurde ein zylindrisches Gefäß von 175 mm Durchmesser verwendet. Der mittlere Durchmesser des größten verwendeten Kieses 16/32 beträgt 24 mm. Daraus ergibt sich als kleinstes und damit für die Messung ungünstigstes Verhältnis $D_{\text{Gef}}/d = 7,3$ und beim nächstkleineren Kies 8/16 ein solches von $D_{\text{Gef}}/d = 14,6$.

Die Porosität für die drei untersuchten Kieszusammensetzungen wurde als Mittelwert aus jeweils drei Messungen (neu aufgebaute Zufallsschüttungen) bestimmt. In Tabelle 4.2 sind die gemessenen Werte angegeben. Für die weiteren Berechnungen wurde der Mittelwert aus den drei Kieszusammensetzungen:

$$\varepsilon_{\text{exp}} = 0,376 \quad (4.50)$$

eingesetzt.

Zum Vergleich wurde die Porosität nach der vom VDI-Wärmeatlas vorgeschlagenen empirischen Gleichung berechnet /VDI (1997), Mh/:

Kieszusammensetzung	Porosität ϵ_{exp}
Kies 4/8	0,376
Kies 8/16	0,374
Kies 16/32	0,379
Mittelwert	0,376

Tabelle 4.2: Gemessene Porosität ϵ_{exp} der Kies-Schüttung

$$\frac{\epsilon}{\epsilon_{\infty}} = 1 - 0,259\zeta + 0,017\zeta^2 - 0,112\zeta^3 \quad (4.51)$$

mit dem Verteilungsparameter $\zeta = \left[\frac{\sum_{j=1}^n \varphi_j / d_j^2}{\left(\sum_{j=1}^n \varphi_j / d_j \right)^2} - 1 \right]^{0,5}$ (4.52)

Dabei ist ϵ die gesuchte Porosität der polydispersen Schüttung, ϵ_{∞} die der entsprechenden monodispersen Schüttung. φ_j ist der Volumenanteil und d_j der Durchmesser der j -ten Einzelfraktion. Wie in Abschnitt 4.3.2 wird angenommen, daß jede Kieszusammensetzung eine gleichmäßige Korngrößenverteilung von genügend vielen unterschiedlichen Korndurchmessern hat. Für die Berechnung wurde die Anzahl der Einzelfraktionen $n > 1000$ angenommen.

Zur Berechnung der Porosität der monodispersen Schüttung wurde der Mittelwert zwischen 0,40 und 0,42 eingesetzt (nicht gerüttelte Schüttung):

$$\epsilon_{\infty} = \frac{0,40 + 0,42}{2} = 0,41 \quad (4.53)$$

Nach Gl. (4.52) ergibt sich der Verteilungsparameter:

$$\zeta = 0,202 \quad (4.54)$$

und dann nach Gl. (4.51) die Porosität:

$$\epsilon_{\text{calc}} = 0,388 \quad (4.55)$$

Im Vergleich zu dem berechneten Wert ϵ_{calc} hat die gemessene Porosität ϵ_{exp} eine kleine Abweichung von 3,1 %.

4.3.4 Permeabilität

Die Permeabilität ist ein Maß für die Durchlässigkeit einer Schüttung und besitzt die Dimension $[m^2]$. Wie in Abschnitt 4.1 erwähnt, wird in dieser vorliegenden Arbeit die Permeabilität wie folgt definiert:

$$K = \frac{d^2 \varepsilon^3}{180(1 - \varepsilon)^2} \quad (4.56)$$

Dabei ist für d der gleichwertige Kieskorndurchmesser und für ε die gemessene Porosität einzusetzen. Damit ergibt sich die Permeabilität des untersuchten Kieses:

$$K = \begin{cases} 2,525 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 & \text{für Kies 4/8} \\ 1,010 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 & \text{für Kies 8/16} \\ 4,040 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 & \text{für Kies 16/32} \end{cases} \quad (4.57)$$

4.3.5 Stoffwerte des Kieses

4.3.5.1 Dichte

Die mittlere Dichte des Kieses kann mit den Werten aus Tabelle 4.1 folgendermaßen berechnet werden:

$$\rho_{K,calc} = \sum_{i=1}^8 \varphi_i \rho_i \quad (4.58)$$

Man erhält:

$$\rho_{K,calc} = 2584 \text{ kg/m}^3 \quad (4.59)$$

Zum Vergleich hierzu wurde die Dichte des Kieses experimentell bestimmt. Dabei ergaben sich folgende Dichten:

$$\rho_{K,exp} = \begin{cases} 2587 \text{ kg/m}^3 & \text{für Kies 4/8} \\ 2596 \text{ kg/m}^3 & \text{für Kies 8/16} \\ 2600 \text{ kg/m}^3 & \text{für Kies 16/32} \end{cases} \quad (4.60)$$

Die Dichten der drei Kiessorten sind nahezu identisch. Für die weiteren Berechnungen wurde der Mittelwert der experimentell bestimmten Werte:

$$\rho_{K,exp} = 2594 \text{ kg/m}^3 \quad (4.61)$$

herangezogen, wobei experimentell ermittelter und berechneter Wert eine geringe Abweichung von 0,4 % aufweisen.

4.3.5.2 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität $c_{p,K}$ des Kieses berechnet sich wie folgt aus den einzelnen spezifischen Wärmekapazitäten $c_{p,i}$ und den Massenanteilen z_i der Kiesbestandteile:

$$c_{p,K} = \sum_{i=1}^8 z_i c_{p,i} \quad (4.62)$$

Mit den Werten aus Tabelle 4.1 errechnet sich folgender Wert für die spezifische Wärmekapazität des Kieses:

$$c_{p,K} = 0,784 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \quad (4.63)$$

Die spezifische Wärmekapazität des Kieses und deren Temperaturabhängigkeit wurden hier nicht gemessen, so daß dieser Wert als konstant und unabhängig von der Temperatur angesehen wird.

4.3.5.3 Wärmeleitfähigkeit

Da die einzelnen mineralischen Bestandteile des Kieses in unregelmäßiger Verteilung und Anordnung vorliegen, bedient man sich bei der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit eines vereinfachenden Modells, wobei ein Kiespartikel in einer Einheitszelle betrachtet wird. Eine solche Einheitszelle setzt sich aus mehreren Platten (Bestandteilen) mit jeweils der Wärmeleitfähigkeit λ_i zusammen, die senkrecht oder parallel zum Wärmestrom angeordnet sein können. Nach Krischer und Esdorn (1956) ergeben sich dafür zwei Grenzfälle:

1. Der Wärmestrom fließt senkrecht zu den Platten (Bild 4.3, links): In diesem Fall ist die Wärmeleitfähigkeit am geringsten. Man kann eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{senk} einführen, welche in einem homogenen Körper den gleichen Wärmestrom erzeugen würde:

$$\lambda_{\text{senk}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^8 \varphi_i / \lambda_i} \quad (4.64)$$

2. Der Wärmestrom fließt parallel zu den Platten (Bild 4.3, rechts): In diesem Fall ist die Wärmeleitfähigkeit am größten. Auch hier läßt sich eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit λ_{par} einführen:

$$\lambda_{\text{par}} = \sum_{i=1}^8 \varphi_i \lambda_i \quad (4.65)$$

Die äquivalenten Wärmeleitfähigkeiten für das Kiesgestein ergeben sich mit den Volumenanteilen φ_i und den Wärmeleitfähigkeiten λ_i der einzelnen mineralischen Bestandteile. Mit den Daten aus Tabelle 4.1 erhält man:

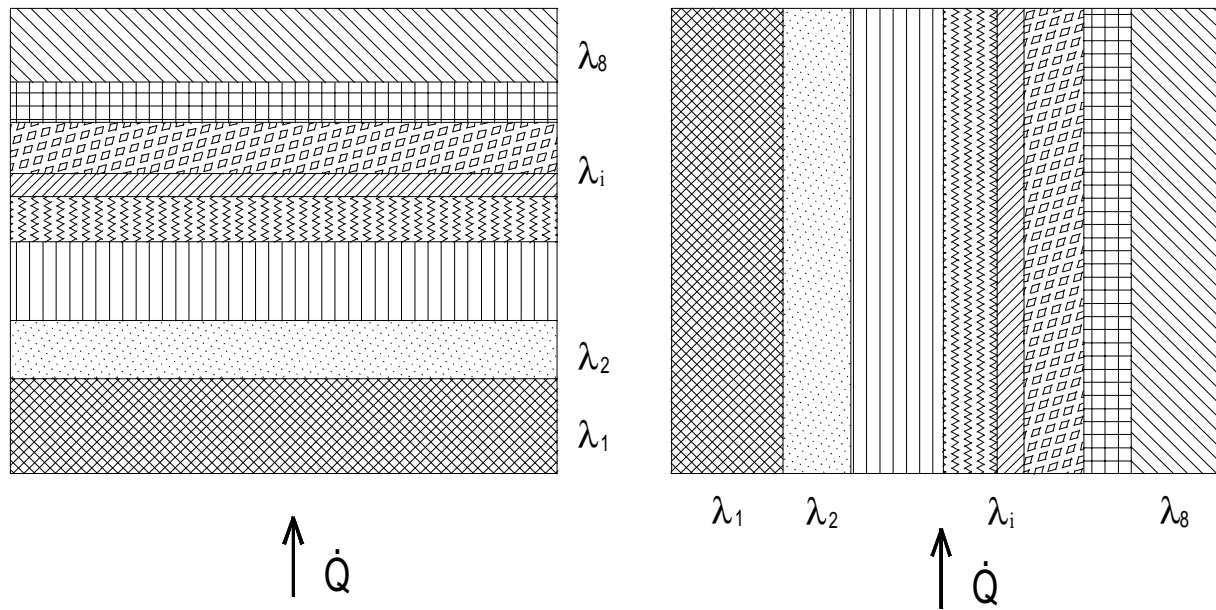


Bild 4.3: Anordnung geringster Wärmeleitfähigkeit (Platten senkrecht zum Wärmestrom, links) und größter Wärmeleitfähigkeit (Platten parallel zum Wärmestrom, rechts)

$$\lambda_{\text{senk}} = 3,44 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (4.66)$$

und
$$\lambda_{\text{par}} = 4,12 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (4.67)$$

Die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Kiesgesteins ergibt sich als arithmetischer Mittelwert aus diesen beiden Werten:

$$\lambda_{\text{K}} = \frac{\lambda_{\text{senk}} + \lambda_{\text{par}}}{2} \quad (4.68)$$

Man erhält damit:

$$\lambda_{\text{K}} = 3,78 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K}) \quad (4.69)$$

4.3.6 Effektive Wärmeleitfähigkeit der Kies/Wasser-Schüttung

Die effektive Wärmeleitfähigkeit einer nicht durchströmten Kies/Wasser-Schüttung kann für mäßige Temperatur, d.h. für vernachlässigbaren Strahlungswärmeaustausch zwischen den Kiespartikeln und dem Wasser nach der Formel von Zehner und Schlünder (1970) ermittelt werden:

$$\lambda_{\text{S}} = \lambda_{\text{Fl}} \cdot \left\{ 1 - \sqrt{1 - \varepsilon} + \sqrt{1 - \varepsilon} \cdot \frac{2}{F} \cdot \left[\frac{(1 - \Lambda)B}{F^2} \cdot \ln\left(\frac{1}{B\Lambda}\right) - \frac{B+1}{2} - \frac{B-1}{F} \right] \right\} \quad (4.70)$$

mit
$$\Lambda = \frac{\lambda_{\text{Fl}}}{\lambda_{\text{K}}}$$

$$F = 1 - \Lambda B$$

$$B = C_f \left[\frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon} \right]^9$$

Für den Formfaktor C_f sind folgende Werte möglich:

$$C_f = \begin{cases} 1,25 & \text{für gleichförmige Kugeln} \\ 1,40 & \text{für gebrochene Partikel} \\ 2,50 & \text{für gleichförmige Zylinder.} \end{cases} \quad (4.71)$$

Für den Kies wird der Formfaktor für gebrochene Partikel $C_f = 1,40$ eingesetzt, da die meist oval geformten Kiespartikel nicht als gleichförmige Kugeln oder Zylinder angesehen werden können.

In der Arbeit von Streit (1996) wurde die effektive Wärmeleitfähigkeit der Kies/Wasser-Schüttung (mit Kies 8/16) gemessen. Die gemessenen Werte werden in Bild 4.4 mit den theoretisch berechneten Werten für gebrochene Partikel nach Zehner und Schlünder (1970) verglichen. Mit eingezeichnet sind in Bild 4.4 die berechneten Werte nach einer empirischen Gleichung von Krupiczka (1967). Die gemessenen Werte sind etwa größer als die berechneten Werte. Die Abweichungen der gemessenen Werte von den berechneten Werten für gebrochene Partikel betragen maximal 7,8 %.

Für die vorliegende Arbeit wurde die Gleichung (4.70) mit $C_f = 1,4$ zur Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Schüttung verwendet.

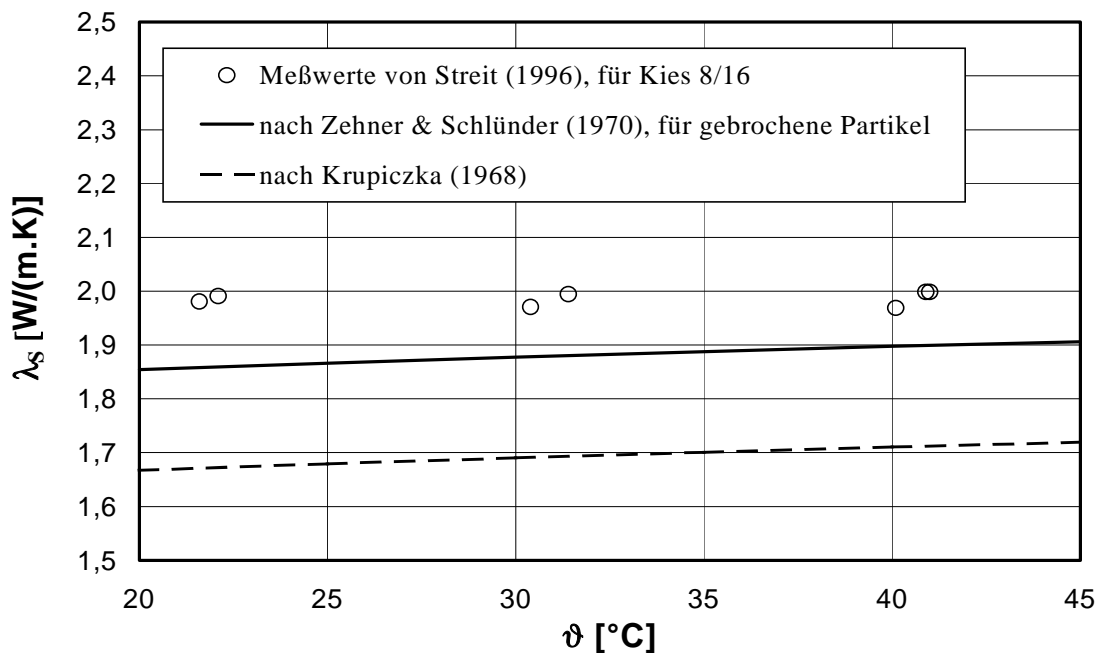


Bild 4.4: Vergleich der gemessenen effektiven Wärmeleitfähigkeiten mit den berechneten Werten nach verschiedenen empirischen Gleichungen

5 Ergebnisse der Versuche am Einzelrohr in Wasser

Trotz der zahlreichen Versuche und Korrelationsgleichungen, die man aus der Literatur finden kann (siehe Abschnitt 3.1), wurden zunächst Messungen an Einzelrohren in reinem Wasser für verschiedene Höhen H der Kühlplatte über dem Heizrohr (siehe Bild 2.3a) durchgeführt, um den Einfluß der Höhe der Kühlplatte auf den Wärmeübergangskoeffizienten zu ermitteln. Damit kann man bei weiteren Versuchen die Lagen der Rohre richtig wählen, so daß der Wärmeübergangskoeffizient nicht durch die Kühlplatte beeinflusst wird. Andererseits wurden die Meßwerte mit den berechneten Werten nach Korrelationsgleichungen aus der Literatur verglichen, um die Funktionsfähigkeit der Versuchsanlage zu überprüfen.

5.1 Einfluß der Höhe H der Kühlplatte über dem Heizrohr

In Bild 5.1 sind die aus Meßwerten gebildeten Nusselt-Zahlen Nu_{Fl} in Abhängigkeit von der Rayleigh-Zahl Ra_{Fl} für verschiedene Höhen H dargestellt. Zusätzlich zu den Meßwerten wurde hier auch die jeweilige Regressionsgerade eingezeichnet. Die Meßergebnisse sind in Tabelle A.1, im Anhang A zusammengestellt.

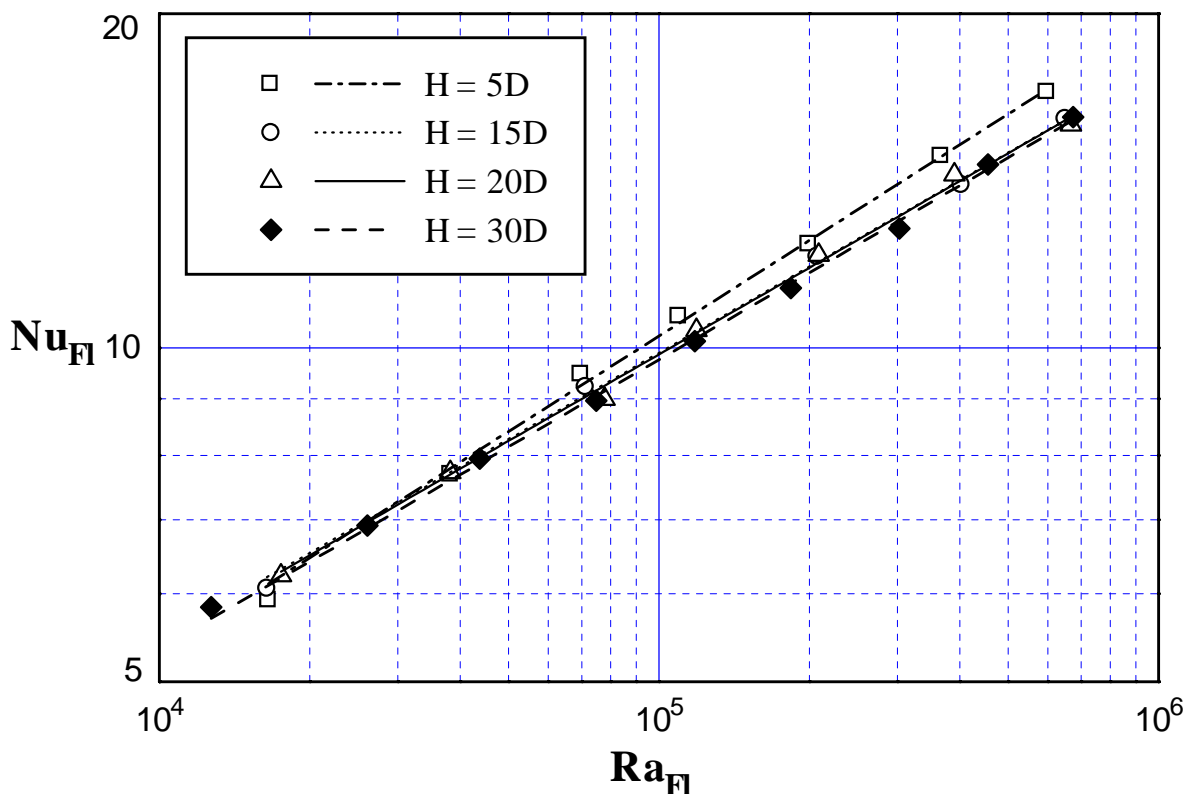


Bild 5.1: Nusselt-Zahlen am Einzelrohr für verschiedene Höhen H . Mit eingezeichnet ist die jeweilige Regressionsgerade.

Bei kleinen Rayleigh-Zahlen zeigen sich die Werte für alle Höhen H fast keinen Unterschied. Mit steigender Rayleigh-Zahl weichen die Werte für $H = 5D$ deutlich von den anderen drei Höhen ab, während die Werte für $H = 15D$ bis $H = 30D$ nur wenige Änderung aufweisen. Aus den experimentellen Ergebnissen für verschiedene Höhen wird eine Korrelationsgleichung in der Form $Nu_{Fl} = f(Ra_{Fl}, H/D)$ ermittelt (für $1,3 \cdot 10^4 < Ra_{Fl} < 6,7 \cdot 10^5$):

$$Nu_{Fl} = 0,492 Ra_{Fl}^{0,267} \left(\frac{H}{D} \right)^{-0,026} \quad (5.1)$$

In Bild 5.2 werden die nach der Gleichung (5.1) berechneten Nusselt-Zahlen $Nu_{Fl,calc}$ mit den aus Meßwerten gebildeten Werten $Nu_{Fl,exp}$ verglichen. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung. Die mittlere und die maximale Abweichung der Meßwerte von den berechneten Nusselt-Zahlen betragen 1,9 % bzw. 6,6 %.

Anhand dieser Ergebnisse wurde für die weiteren Versuchen am Einzelrohr das Rohr in einer Höhe $H = 30D$ aufgestellt.

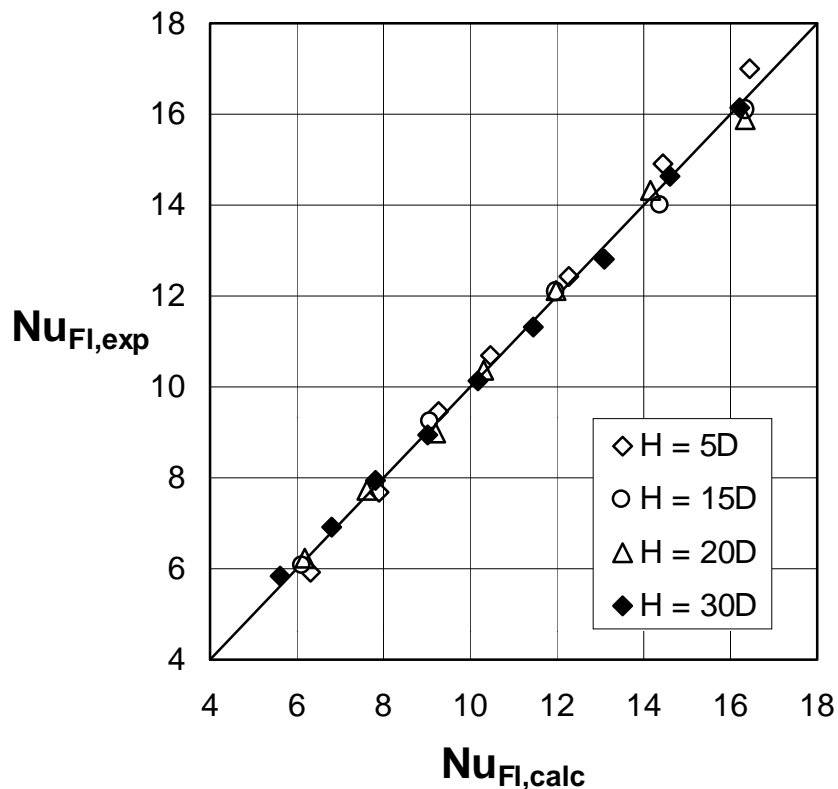


Bild 5.2: Vergleich der Meßwerte $Nu_{Fl,exp}$ mit den nach Gl. (5.1) berechneten Werten $Nu_{Fl,calc}$

5.2 Vergleich der Meßwerte mit den Korrelationen aus der Literatur

Bild 5.3 zeigt einen Vergleich der Meßwerte für $H = 30D$ mit den Korrelationsgleichungen (Gl. 3.6 bis Gl. 3.9) aus der Literatur. Abgesehen von den zwei ein wenig höherliegenden

Punkten bei höheren Rayleigh-Zahlen $Ra_{Fl} > 4 \cdot 10^5$, stimmen die Meßwerte recht gut mit den Korrelationsgleichungen überein.

In der Arbeit von Fand et al. (1983) wurden neun Korrelationsgleichungen aus der veröffentlichten Literatur mit umfangreichen Meßwerten von verschiedenen Autoren verglichen. In dem Bereich $10^3 < Ra_{Fl} \leq 10^8$ konnte die Gleichung von Tsubouchi und Masuda (Gl. 3.6) die Meßwerte am besten wiedergeben. In der vorliegenden Arbeit wird daher die Gleichung von Tsubouchi und Masuda herangezogen, um die ermittelten Meßwerten zu beurteilen.

Im Vergleich zu den berechneten Werten nach der Gleichung von Tsubouchi und Masuda, beträgt bei $Ra_{Fl} = 6,747 \cdot 10^5$ die maximale Abweichung 4 %.

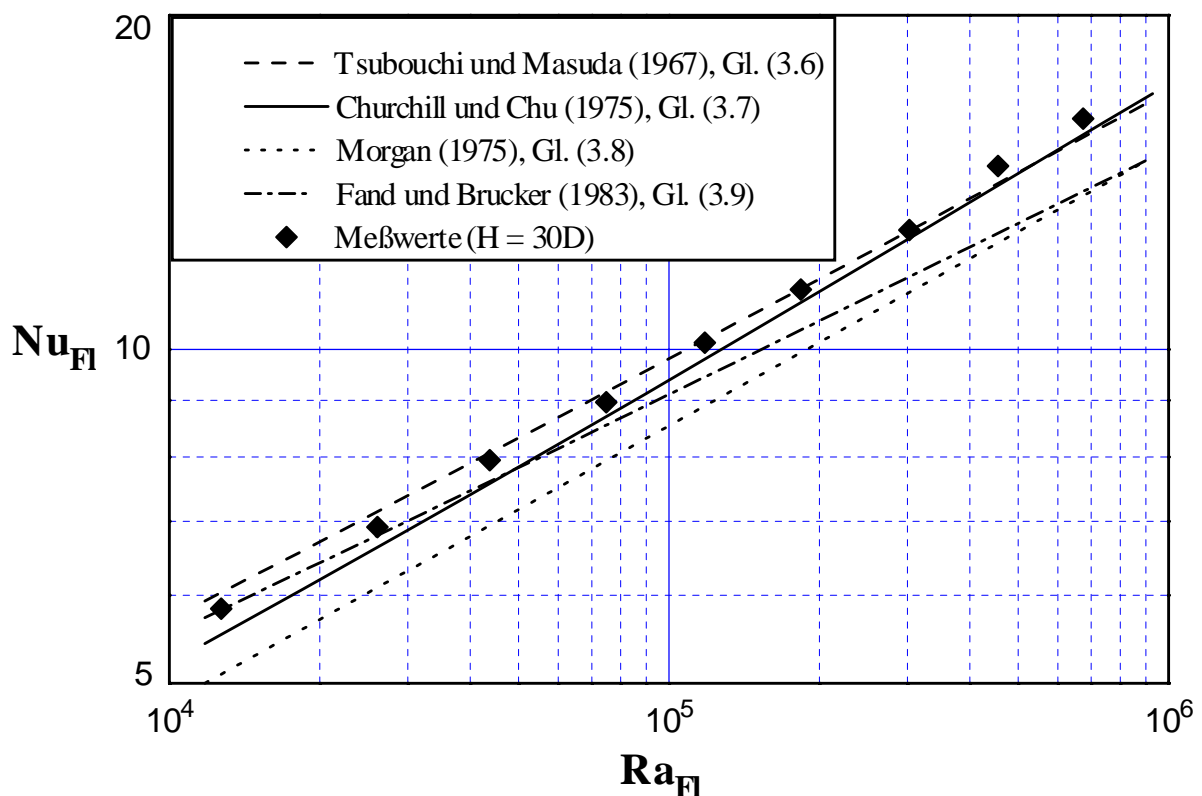


Bild 5.3: Vergleich der Meßwerte mit den Korrelationsgleichungen von verschiedenen Autoren

6 Ergebnisse der Versuche am Einzelrohr in der Kies/Wasser-Schüttung

Um zum einen die Charakteristik des Wärmeübergangs an Einzelrohren in Schüttungen zu kennen und zum anderen die Bezugswerte für Anordnungen mit mehreren Rohren zu erhalten, werden Messungen an Einzelrohren durchgeführt. Die Meßergebnisse sind in Tabelle A.2, im Anhang A zusammengestellt.

6.1 Vergleich mit den Korrelationen aus der Literatur

6.1.1 Vergleich mit der Korrelationsgleichung von Fand und Yamamoto (1990)

Bild 6.1 zeigt einen Vergleich zwischen den Meßwerten und den Rechenwerten nach den Gleichungen von Fand und Yamamoto (1990). Der Gültigkeitsbereich (siehe Seite 36 und 37) wurde dabei beachtet. Die Nusselt-Zahlen Nu_S werden über der Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl Ra_S dargestellt. Für die Berechnung wurde die wandkorrigierte Porosität ε_w (Gl. 4.42) eingesetzt.

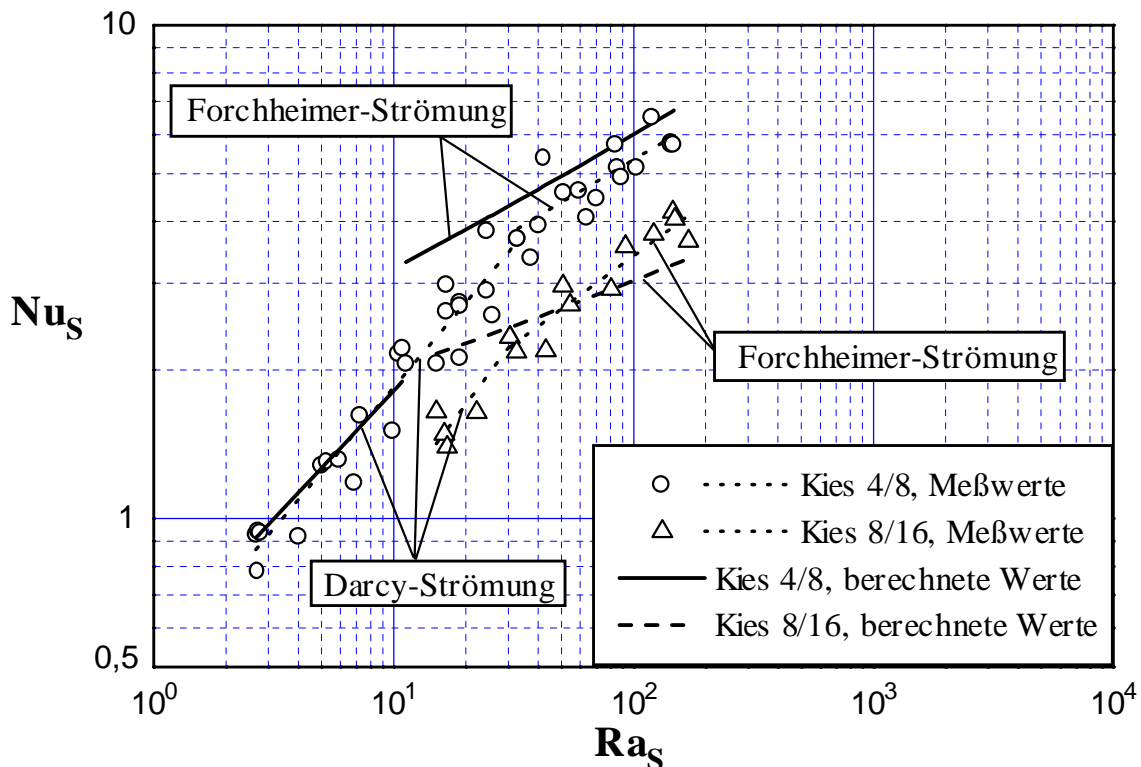


Bild 6.1: Vergleich der Meßwerte mit den Rechenwerten nach den Korrelationsgleichungen von Fand und Yamamoto (Gl. 4.39 und 4.40). Die punktierten Linien sind Ausgleichsgeraden für die Meßwerte.

Für Kies 4/8 im Bereich der Darcy-Strömung zeigen die Meßwerten und die berechneten Werte eine gute Übereinstimmung. Im Bereich der Forchheimer-Strömung liegen die

berechneten Werte für Kies 4/8 bei kleineren Rayleigh-Zahlen $10 < Ra_S < 30$, die nach eigenen Messungen (siehe auch Abs. 6.3) noch zu dem Bereich der Darcy-Strömung gehören, deutlich höher als die gemessenen Werte. Mit steigender Rayleigh-Zahl nähern sich die berechneten Werte wieder den Meßwerten. Die mittlere Abweichung der berechneten Werte von den Meßwerten beträgt 10,3 % für die Darcy-Strömung und 27,8 % für die Forchheimer-Strömung.

Für Kies 8/16 tritt eine größere Abweichung der berechneten Werte von den Meßwerten bei $Ra_S < 30$ auf, wobei die Meßwerte wiederum nach eigenen Messungen noch im Bereich der Darcy-Strömung liegen. Die mittlere Abweichung beträgt 20,3 %.

Die Überschätzung der berechneten Werte kann ihre Ursache in dem verwendeten Schüttgut haben. Die untersuchte Kies/Wasser-Schüttung besitzt eine effektive Wärmeleitfähigkeit λ_S , die um das zwei- bis vierfache größer gegenüber der verwendeten Glaskugel/Wasser- bzw. Glaskugel/Öl-Schüttung von Fand et al. (siehe Tabelle 6.1) ist. Der Effekt der höheren effektiven Wärmeleitfähigkeit wurde bei der Korrelierung nicht berücksichtigt.

In Bild 6.1 kann man erkennen, daß bei dem Übergang Darcy-/Forchheimer-Strömung für Kies 4/8 die berechnete Nusselt-Zahl einen Sprung aufweist. Dies zeigt eine unpassende Anwendung der Gleichungen von Fand und Yamamoto auf die Kies/Wasser-Schüttung, die in dieser Arbeit untersucht wird.

	Kies/Wasser (Diese Arbeit)	Glaskugel/Wasser /Fand (1990)/	Glaskugel/Öl(20 Cs) /Fand (1990)/
λ_{Fl} [W/(m·K)]	0,62	0,62	0,14
λ_K [W/(m·K)]	3,78	1,05	1,05
λ_S [W/(m·K)]	1,88	0,86	0,48

Tabelle 6.1: Zahlenwerte der Wärmeleitfähigkeit von dem Fluid λ_{Fl} , dem Schüttgut λ_K und der gefluteten Schüttung λ_S bei $\vartheta = 30$ °C für die Kies/Wasser-Schüttung und die von Fand et al. verwendeten Glaskugel/Wasser- bzw. Glaskugel/Öl-Schüttungen.

6.1.2 Vergleich mit der Korrelationsgleichung von Streit (1996)

Streit (1996) untersuchte experimentell den Wärmeübergang am horizontalen Wärmeübertragerrohr in einer Kies/Wasser-Schüttung (mit Kies 8/16) mit Bildung und Schmelzen von Eis im Temperaturbereich -10 °C bis 25 °C und gab eine Korrelationsgleichung an:

$$Nu_S = 0,95 + 0,09 Ra_S^{*0,86} \quad (6.1)$$

Dabei ist Ra_S^* die Darcy-Inversions-Rayleigh-Zahl, die wie folgt definiert ist:

$$Ra_S^* = \frac{gKD}{v_{Fl}a_S} \left| \beta_2 (\vartheta_w - \vartheta_\infty) (5,8 - 0,6\vartheta_w - \vartheta_\infty) \right| \quad (6.2)$$

mit $\beta_2 = 8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$.

Die Gleichung gilt im Bereich:

$$0,09 \leq Ra_S^* \leq 150 \quad (\text{entspricht } 0,09 \leq Ra_S \leq 147) \quad (6.3)$$

und gibt die Meßwerte von Streit (1996) mit einer mittleren Abweichung von 23 % wieder.

Bild 6.2 zeigt einen Vergleich zwischen den nach Gl. (6.1) berechneten Nusselt-Zahlen und den eigenen Meßwerten für Kies 8/16. Dabei wurden die berechneten Werte der Darcy-Inversions-Rayleigh-Zahl Ra_S^* in die Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl Ra_S umgerechnet. Während bei kleineren Darcy-modifizierten Rayleigh-Zahlen die Meßwerte gut mit den berechneten Werten übereinstimmen, zeigt sich eine große Abweichung der Meßwerte von den berechneten Werten bei größeren Rayleigh-Zahlen. Der Grund liegt darin, daß der von Streit verwendete Rohrdurchmesser von 32 mm im Bereich von $Ra_S = 100$ bis 147 liegt (Forchheimer-Strömung), während bei den eigenen Messungen (Rohrdurchmesser $D = 8,5$ mm) schon bei $Ra_S = 100$ turbulente Strömung vorliegt, die zum langsamen Anstieg der Nusselt-Zahl führt. Andererseits wurden die von Streit zur Ermittlung der Korrelationsgleichung gemessenen Werte während des zeitabhängigen Vorgangs als stationär betrachtet, was einen großen Fehler (mittlere Abweichung = 23 % nach Streit) bei der Korrelierung zur Folge hatte.

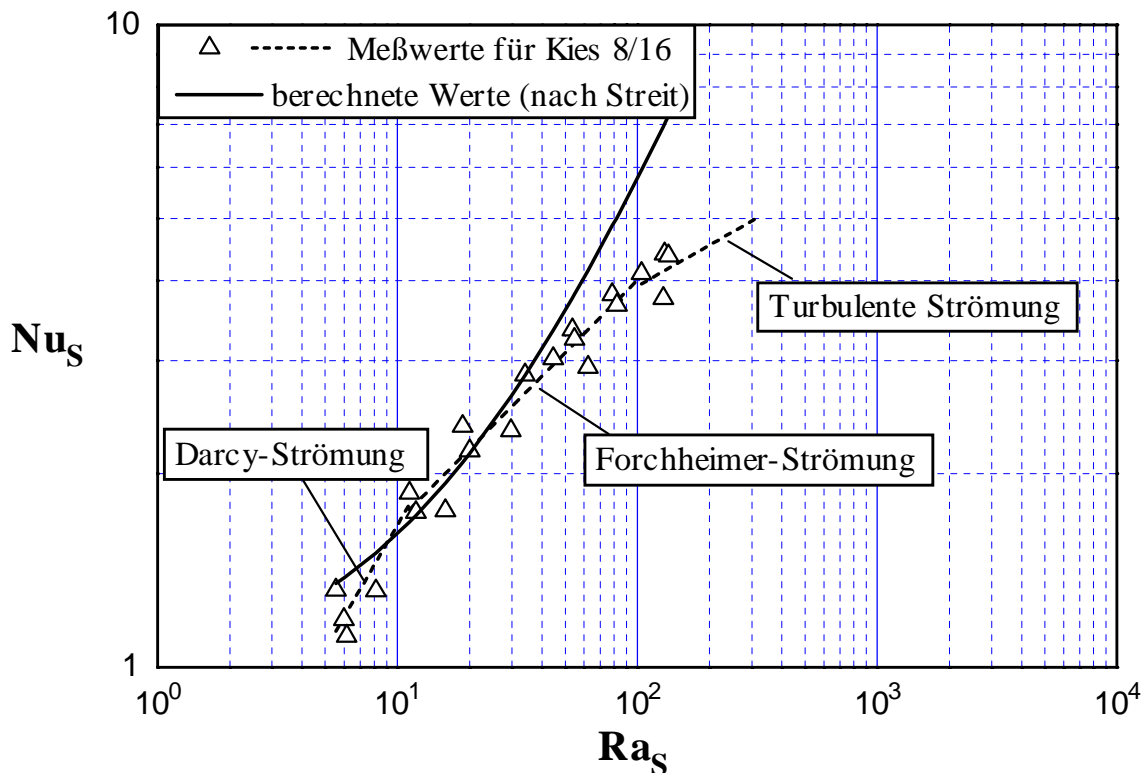


Bild 6.2: Vergleich der Meßwerte mit den berechneten Werten nach Gl. (6.1) von Streit für Kies 8/16. Die gestrichelten Linien sind Ausgleichsgeraden für die Meßwerte.

6.2 Klassifizierung der Strömungsform

In Abschnitt 4.1 und 4.2 wurde die Arbeit von Fand et al. vorgestellt. Die Autoren gaben zwei Korrelationsgleichungen für die Darcy- und Forchheimer-Strömung (siehe Abschnitt 4.2.3) an. Dazu wird für die Berechnung die wandkorrigierte Porosität ε_w (Gl. 4.42) verwendet. Die hier untersuchte Schüttung besitzt eine Porosität von $\varepsilon = 0,376$. Zweckmäßig wird die Gleichung (4.42) für wandkorrigierte Porosität wie folgt umgeschrieben:

$$\varepsilon_w = \varepsilon \cdot \left[(1/\varepsilon) - \frac{(1/\varepsilon - 1)}{\exp\left(0,1 \frac{d}{D}\right)} \right] \quad (6.4)$$

In Bild 6.3 sind die Nusselt-Zahlen Nu_s in Abhängigkeit von der Grashof-Zahl Gr_{max} unter Berücksichtigung des Wandeffekts dargestellt. Es ist zu erkennen, daß die Darcy-Strömung bei $Gr_{max} = 10$ für Kies 4/8 und bei $Gr_{max} = 16$ für Kies 8/16 in die Forchheimer-Strömung übergeht. Der Übergang von Forchheimer- zu turbulenter Strömung findet für Kies 8/16 bei $Gr_{max} = 180$ und für Kies 16/32 bei $Gr_{max} = 435$ statt. Diese Zahlenwerte stimmen nicht mit den von Fand et al. vorgeschlagenen Werten (siehe Bild 4.1 in Abs. 4.1 sowie Gl. 4.35 bis 4.38) überein.

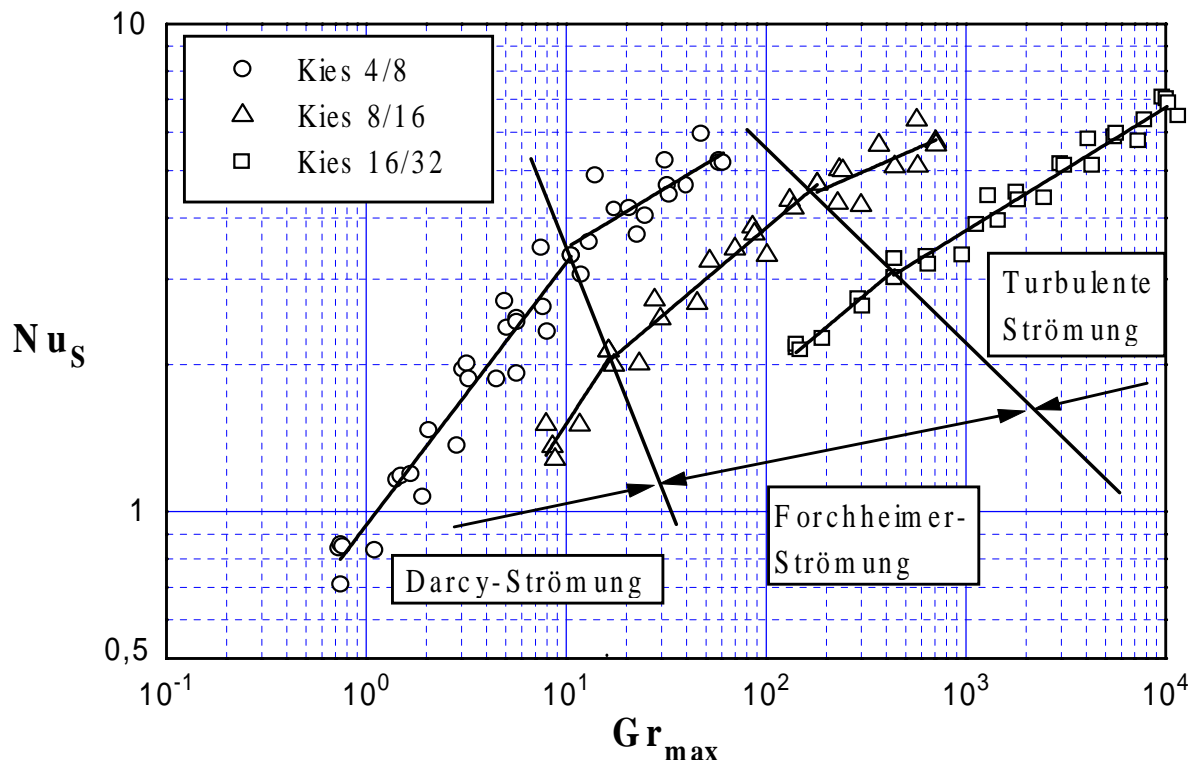


Bild 6.3: Nusselt-Zahlen Nu_s (inkl. Regressionslinie) in Abhängigkeit von der Grashof-Zahl Gr_{max} , die mit der wandkorrigierten Porosität ε_w berechnet wurde.

Nach Fand et al. liegen die Grashof-Zahlen Gr_{max} für den Übergang Darcy-/Forchheimer-Strömung zwischen $Gr_{max} = 2,3$ und $Gr_{max} = 5$ und für den Übergang Forchheimer-/turbulente

Strömung zwischen $Gr_{\max} = 80$ und $Gr_{\max} = 120$. Es ist ersichtlich, daß die in dieser Arbeit gewonnenen Werte viel größer sind als die Angabe von Fand et al. Je größer der Kies ist, desto größer ist die Erhöhung des hier gemessenen Werts für den Übergang der Strömungen gegenüber dem von Fand. D.h. der Wert für den Übergang verschiebt sich mit größer werdender Kies Korngröße zu höheren Grashof-Zahlen (siehe Bild 6.3). Dies deutet auf einen falschen Einsatz der wandkorrigierten Porosität ε_w bei der Berechnung hin.

In Tabelle 6.2 sind die Zahlenwerte für die Porosität (ε und ε_w) und die Permeabilität (K und K_w) vor und nach der Wandeffekt-Korrektur aufgelistet. Man erkennt, daß sich nach der Berücksichtigung der Wand-Korrektur die Porosität um 10,9 % für Kies 4/8 bis 39,6 % für Kies 16/32 vergrößert, während sich die Permeabilität um 56,3 % für Kies 4/8 bis 370 % für Kies 16/32 vergrößert. Aus der Definition der maximalen Grashof-Zahl Gr_{\max} (Gl. 4.35):

$$Gr_{\max} = \frac{g\beta_{\text{Fl}} K d (\vartheta_w - \vartheta_{\infty})}{v_{\text{Fl}}^2} \quad (6.5)$$

wird die Diskrepanz zwischen den Meßwerten und der Angabe von Fand et al. auf eine Überschätzung der Porosität ε_w zurückgeführt, die durch ein höheres Durchmesser-Verhältnis d/D verursacht wird und zu einer noch höheren Permeabilität K_w führt. Schließlich folgt eine überschätzte Grashof-Zahl Gr_{\max} .

	d/D	ε	ε_w	Änderung	K	K_w	Änderung
Kies 4/8	0,679	0,376	0,417	+10,9 %	$2,525 \cdot 10^{-8}$	$3,946 \cdot 10^{-8}$	+56,3 %
Kies 8/16	1,358		0,456	+21,3 %	$1,010 \cdot 10^{-7}$	$2,370 \cdot 10^{-7}$	+135 %
Kies 16/32	2,715		0,525	+39,6 %	$4,040 \cdot 10^{-7}$	$1,898 \cdot 10^{-6}$	+370 %

Tabelle 6.2: Zahlenwerte für die Porosität (ε und ε_w) und die Permeabilität (K und K_w) vor und nach der Berücksichtigung der Wandeffekt-Korrigierung

Obwohl der Wandeffekt einen Einfluß auf die Porosität nahe dem Rohr und damit auf den Wärmeübergang am Rohr hat, ist es fraglich, ob dieser Effekt auch in die Berechnung der Grashof-Zahl Gr_{\max} eingehen muß, da die aufgrund der freien Konvektion am Rohr entstandene Strömung endlich weit entfernt von dem Rohr nach oben, wo die Porosität nicht mehr durch die Rohrwand beeinflußt wird, fließen muß. Andererseits hat der kleinere Rohrdurchmesser D bei größeren Verhältnissen d/D weniger Einfluß auf die lokale Porosität in der Nähe des Rohres. Aus dieser Überlegung heraus sollte die Grashof-Zahl Gr_{\max} nicht mit der wandkorrigierten Porosität ε_w berechnet werden.

In Bild 6.4 werden die Nusselt-Zahlen Nu_S über der Grashof-Zahl Gr_{\max} aufgetragen. Dabei wurde für die Berechnung die nicht wandkorrigierte Porosität ε eingesetzt. Es ist deutlich zu

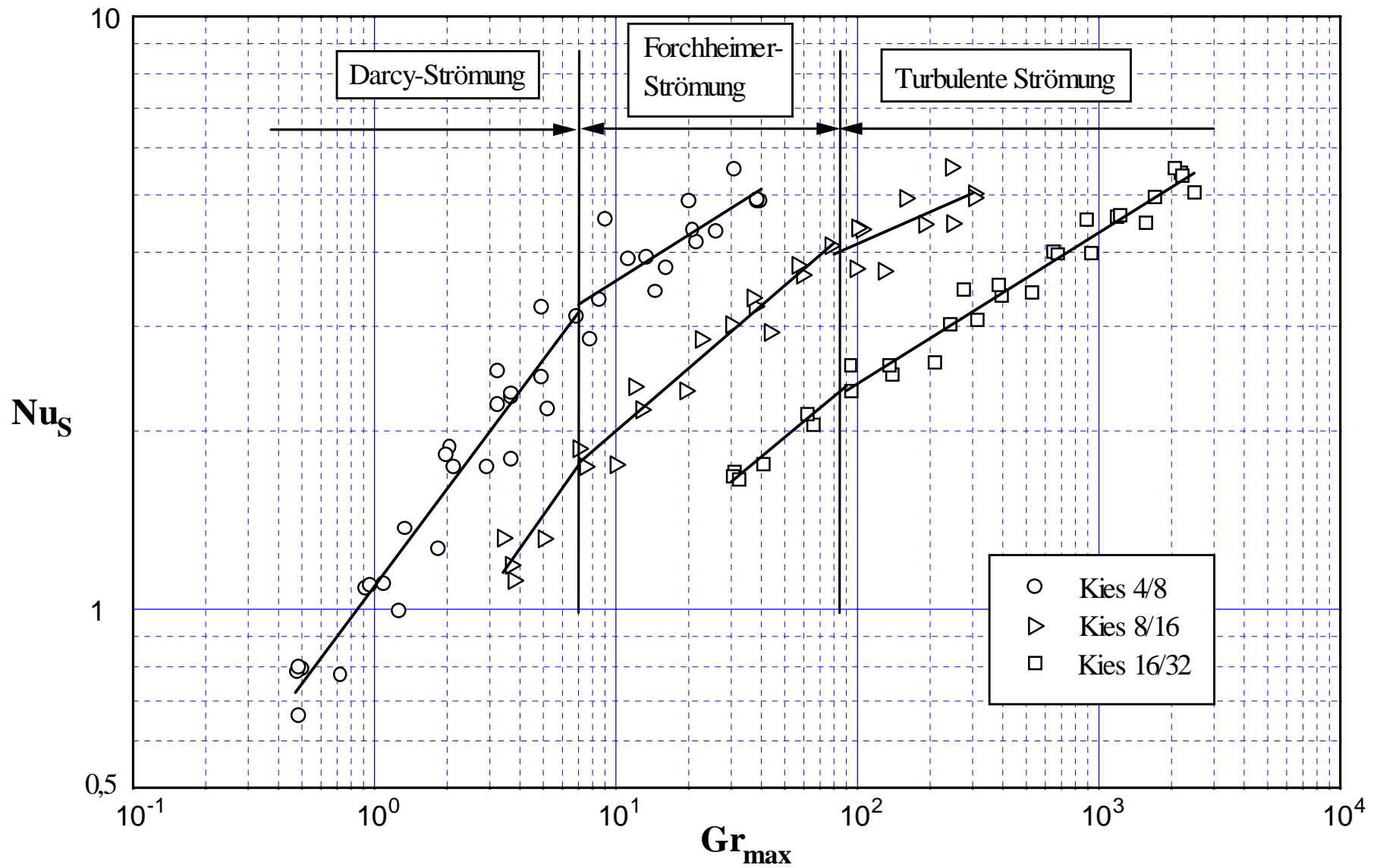


Bild 6.4: Nusselt-Zahlen Nu_S am Einzelrohr in der Schüttung in Abhängigkeit von der Grashof-Zahl Gr_{max} , die mit der Porosität ε berechnet wurde, und die jeweiligen Regressionslinien

erkennen, daß unabhängig von der Kies-Korngröße die Übergänge bei den folgenden Grashof-Zahlen Gr_{\max} vorkommen:

$$\text{Übergang Darcy/Forchheimer-Strömung:} \quad Gr_{\max} \approx 7 \quad (6.6)$$

$$\text{Übergang Forchheimer-/turbulente Strömung:} \quad Gr_{\max} = 80 \sim 90 \quad (6.7)$$

Die Werte der Grashof-Zahl Gr_{\max} für den Übergang Forchheimer-/turbulente Strömung stimmen mit den Werten von Fand et al. ($Gr_{\max} = 80 \sim 120$) gut überein, während die Werte für den Übergang Darcy-/Forchheimer-Strömung ein wenig größer als diejenigen von Fand ($Gr_{\max} = 2,3 \sim 5$) sind. Es ist zu beachten, daß die von Fand et al. angegebenen Werte (siehe Gl. 4.36 bis 4.38 und Bild 4.1) die Reynolds-Zahlen $Re = wd/v$ sind, die aus den Versuchen an zwangsdurchströmten Schüttungen gewonnen wurden. Sie unterscheiden sich von den analytisch hergeleiteten maximalen Reynolds-Zahlen Re_{\max} bzw. Grashof-Zahlen Gr_{\max} (Gl. 4.35, für freie Konvektion).

Es bleibt festzustellen, daß zur Beurteilung der Strömungsform die nicht wandkorrigierte Porosität ϵ bei der Berechnung von Gr_{\max} bzw. K zu verwenden ist. Der untersuchte Bereich der Grashof-Zahl $0,48 < Gr_{\max} < 2483$ läßt sich in drei Teilbereiche unterteilen:

$$\text{Darcy-Strömung:} \quad Gr_{\max} \leq 7 \quad (6.8)$$

$$\text{Forchheimer-Strömung:} \quad 7 < Gr_{\max} \leq 85 \quad (6.9)$$

$$\text{Turbulente Strömung:} \quad 85 < Gr_{\max} \quad (6.10)$$

6.3 Wärmeübergang am Einzelrohr in der Kies/Wasser-Schüttung

Es ist üblich, die zwei dimensionslosen Größen, Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl Ra_S und Nusselt-Zahl Nu_S , zur mathematischen Beschreibung der freien Konvektion im porösen Medium zu verwenden. Um den Wärmeübergang an Rohren in der Kies/Wasser-Schüttung mit dem in reinem Wasser zu vergleichen, wurden hier auch die Nusselt-Zahlen Nu_{FI} über der Rayleigh-Zahl Ra_{FI} aufgetragen. Für die Berechnung wurde die nicht wandkorrigierte Porosität ϵ eingesetzt, wie in Abschnitt 6.2 erklärt.

In Bild 6.5 sind die Nusselt-Zahlen Nu_{FI} am Einzelrohr sowohl in der Kies/Wasser-Schüttung als auch in Wasser in Abhängigkeit von der Rayleigh-Zahl Ra_{FI} und die jeweiligen dazugehörenden Regressionslinien dargestellt. Mit eingezeichnet sind die Meßwerte von Fand et al. (1986) für die Glaskugel/Wasser-Schüttung mit Korndurchmesser $d = 2, 3$ und 4 mm.

Die Nusselt-Zahlen am Rohr in reinem Wasser sind am größten. Die Meßwerte für Kies 16/32 liegen ein wenig niedriger, da der Zwischenraum zwischen den Kiespartikeln so groß ist, daß die Kiespartikel geringen Einfluß auf die aufwärts gerichtete Strömung aufgrund der freien

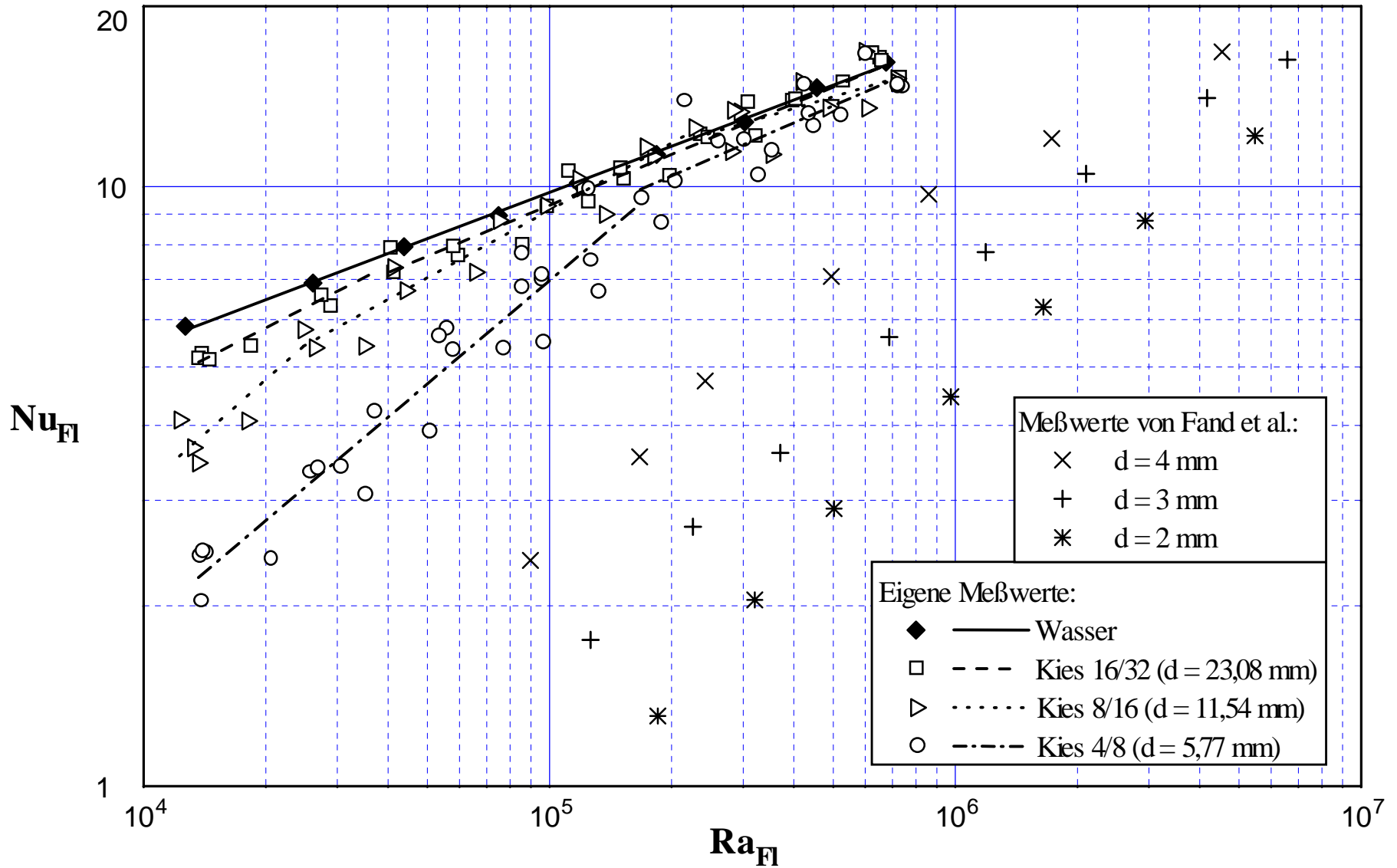


Bild 6.5: Nusselt-Zahlen Nu_{Fl} am Einzelrohr sowohl in der Kies/Wasser-Schüttung als auch in Wasser in Abhängigkeit von der Rayleigh-Zahl Ra_{Fl} und die jeweiligen Regressionslinien. Mit eingezeichnet sind die Meßwerte von Fand et al. (1986) für die Glaskugel/Wasser-Schüttung mit Korndurchmesser $d = 2, 3$ und 4 mm.

Konvektion am Rohr haben. Damit nähern sich die Linien für Wasser und für gefluteten Kies 16/32 an. Mit kleiner werdender Korngröße nimmt die Nusselt-Zahl weiter ab, da die Geschwindigkeit des nach oben strömenden Wassers durch die Kiespartikel gebremst wird. Dadurch wird die Wärme langsamer nach oben zur Kühlplatte abgeführt und das Temperaturniveau in der Umgebung des Rohres steigt an, was zu einem geringeren Wärmeübergang führt. Dies kann anhand der gemessenen Temperaturen zwischen Heizrohr und Kühlplatte (Bild 6.6) bestätigt werden. Sowohl bei kleinerer als auch bei größerer Rayleigh-Zahl Ra_{Fl} zeigt sich für Kies 4/8 die höchste Temperatur in der Umgebung des Heizrohres. Mit größerer Korngröße wird die Temperatur kleiner.

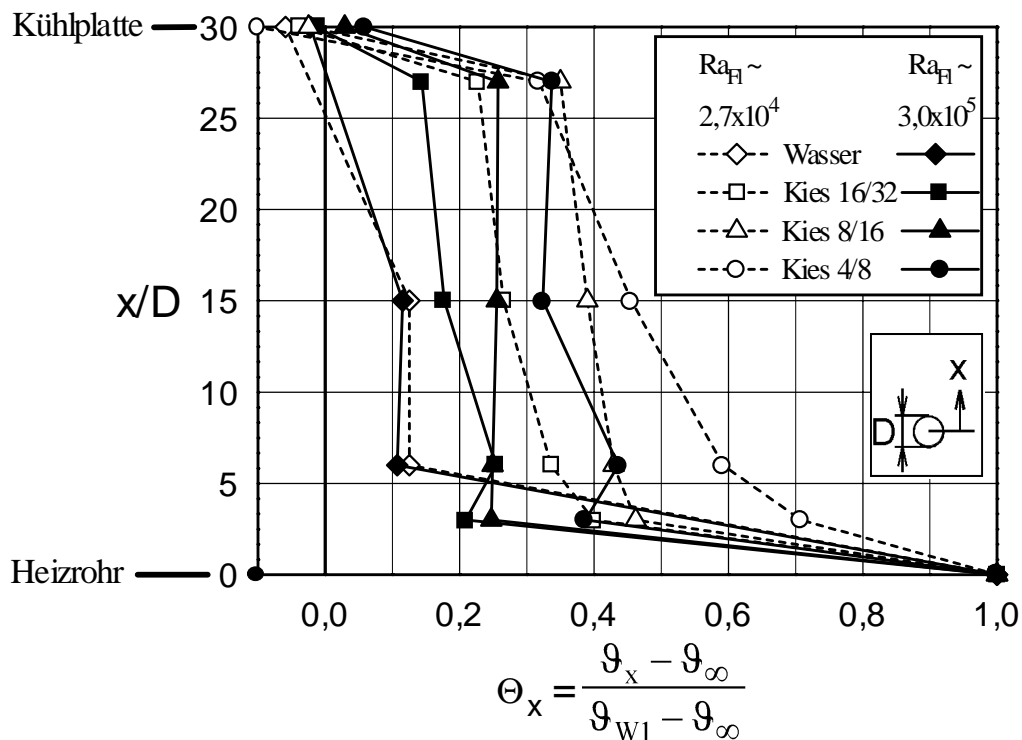


Bild 6.6: Dimensionslose Temperaturen zwischen Heizrohr ($x/D = 0$) und Kühlplatte ($x/D = 30$) bei den Rayleigh-Zahlen $Ra_{Fl} \approx 2,7 \cdot 10^4$ und $Ra_{Fl} \approx 3,0 \cdot 10^5$

Bei höheren Rayleigh-Zahlen (Bild 6.5) nähern sich die Nusselt-Zahlen für alle drei Kieszusammensetzungen den Werten in Wasser an, da die Wärme leichter durch die verstärkte Konvektion abgeführt wird. In Bild 6.6 erkennt man auch, daß die dimensionslosen Temperaturen bei höherer Rayleigh-Zahl $Ra_{Fl} \approx 3,0 \cdot 10^5$ in der Umgebung des Rohres ($x/D \leq 6$) niedriger sind gegenüber denen bei niedrigerer Rayleigh-Zahl $Ra_{Fl} \approx 2,7 \cdot 10^4$. Diese Verringerung der dimensionslosen Temperatur für die Kies/Wasser-Schüttung wird auf die verstärkte Konvektion bei höheren Rayleigh-Zahlen zurückgeführt. Diese erhöhte Konvektion kann das Hindernis "Kies" überwinden und die Wärme schneller nach oben abführen. D.h. der Einfluß der höherliegenden Kiespartikel auf den Wärmeübergangskoeffizienten bei höheren Rayleigh-Zahlen ist geringer als bei niedrigeren Rayleigh-Zahlen.

Gegenüber den gemessenen Werten liegen die Meßwerte von Fand et al. (kleinerer Korndurchmesser) erwartungsgemäß niedriger. Qualitativ ist diese Tendenz richtig, quantitativ sind die beiden Messungen nicht miteinander vergleichbar, da die zwei Versuche mit unterschiedlichen Schüttungsmedien durchgeführt wurden.

In Bild 6.7 sind die Nusselt-Zahlen Nu_S in Abhängigkeit von der Darcy-modifizierten Rayleigh-Zahl Ra_S dargestellt. Die Strömungsform für jede Kiessorte ist auch im Bild angegeben. Die Klassifizierung der Strömungsform entspricht der in Abschnitt 6.2 vorgestellten.

Für jede Strömungsform streben die Meßwerte von verschiedenen Kieszusammensetzungen nicht einer Ausgleichsline zu, sondern verschieben sich mit größer werdender Kies Korngröße nach unten. Dies deutet darauf hin, daß die Nusselt-Zahl Nu_S nicht nur von der Darcy-modifizierten Rayleigh-Zahl Ra_S abhängt, sondern auch von anderen Größen. Für jeden Strömungsbereich lassen sich die Meßwerte in der Form korrelieren:

$$Nu_S = f\left(Gr_S, Pr_S, \frac{d}{D}\right) \quad (6.11)$$

Nach systematischer Variierung der Konstanten C_1 , C_2 und C_3 mit Hilfe eines Computerprogramms ergibt sich die neue Korrelationsgleichung unter Anwendung der Methode der kleinsten Fehlerquadrate:

$$Nu_S = C_1 Ra_S^{C_2} Pr_S^{-C_3 \ln\{1 + [\arctan(d/D)]^{2,5}\}} \quad (6.12)$$

Dabei ist die Form der Potenz ähnlich wie in der Gleichung von Fand (Gl. 4.41). Die Anwendungsbereiche und die Konstanten C_1 , C_2 und C_3 sind in Tabelle 6.3 aufgelistet.

Einen quantitativen Vergleich zwischen den aus Meßwerten gebildeten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,exp}$ und den nach Gleichung (6.12) berechneten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,calc}$ zeigt Bild 6.8 für den Bereich der Darcy-Strömung, Bild 6.9 für den der Forchheimer-Strömung und Bild 6.10 für denjenigen der turbulenten Strömung.

Die Meßwerte lassen sich mit Gl. (6.12) gut wiedergeben. Für die Darcy-, Forchheimer- und turbulente Strömung beträgt die mittlere Abweichung jeweils 9,76 %, 6,35 % bzw. 5,71 %, die maximale Abweichung 21,7 %, 31,6 % bzw. 13,7 %. Dabei wurde die mittlere Abweichung wie folgt berechnet:

$$\overline{\Delta Nu_S \%} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|Nu_{S,exp} - Nu_{S,calc}|}{Nu_{S,calc}} \cdot 100\% \quad , \quad (6.13)$$

wobei n die Anzahl der Meßwerte ist.

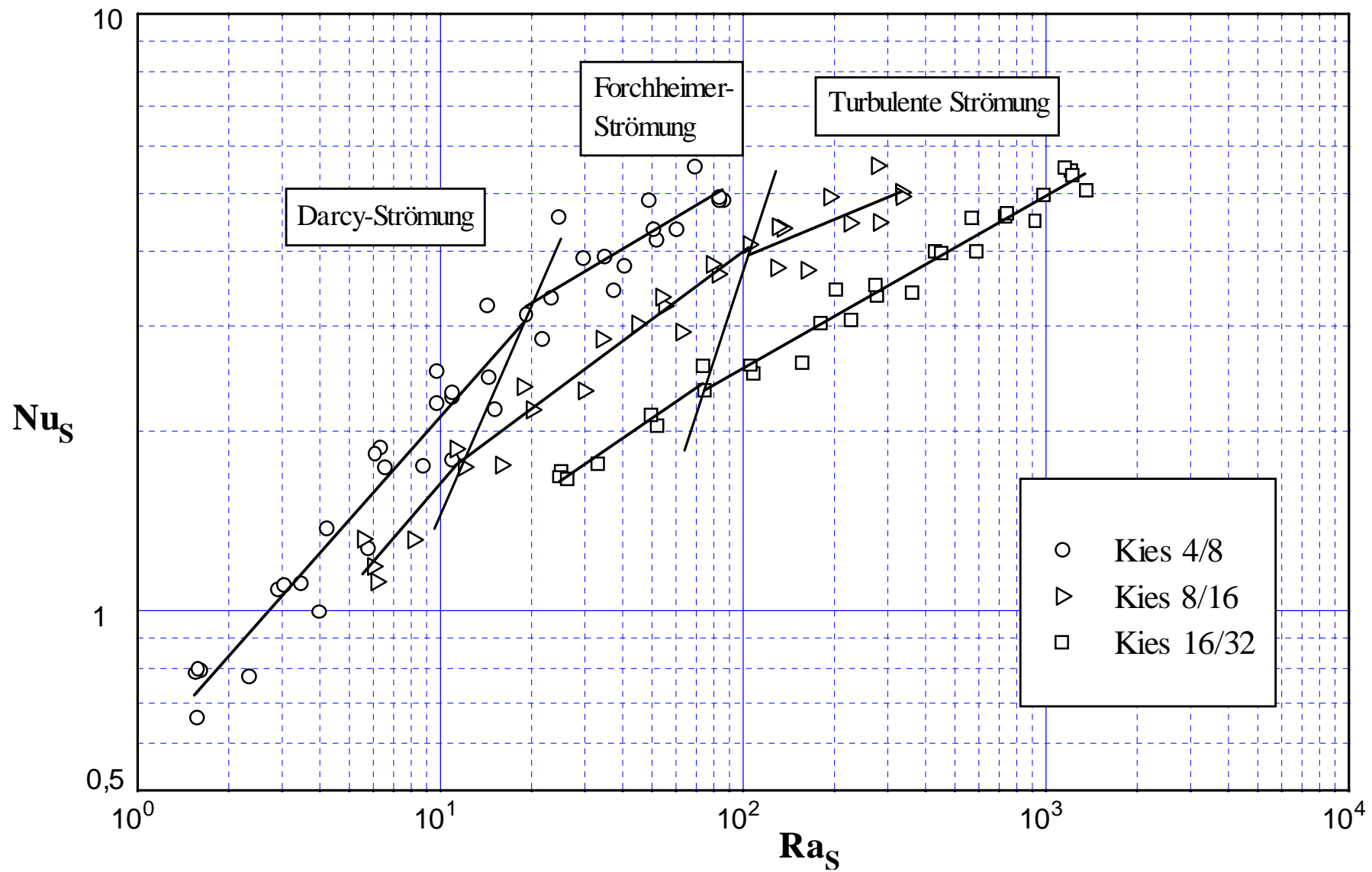


Bild 6.7: Darstellung der Nusselt-Zahlen Nu_S (inkl. Regressionslinie) am Einzelrohr für Kies 4/8, Kies 8/16 und Kies 16/32 in Abhängigkeit von der Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl Ra_S

	Anwendungsbereich	C_1	C_2	C_3	Mittlere Abweichung	Maximale Abweichung
Darcy-Strömung ($Gr_{max} \leq 7$)	$0,68 \leq \frac{d}{D} \leq 1,36$ $1,5 \leq Ra_S \leq 20$	0,6816	0,5712	0,8989	9,76 %	21,7 %
Forchheimer-Strömung ($7 < Gr_{max} \leq 85$)	$0,68 \leq \frac{d}{D} \leq 2,72$ $10 \leq Ra_S \leq 100$	1,6169	0,2931	1,1874	6,35 %	31,6 %
Turbulente Strömung ($85 < Gr_{max}$)	$1,36 \leq \frac{d}{D} \leq 2,72$ $70 \leq Ra_S \leq 1340$	2,9592	0,1437	1,0768	5,71 %	13,7 %

Tabelle 6.3: Konstanten C_1 , C_2 und C_3 der Gleichung (6.12) und die mittlere und maximale Abweichung

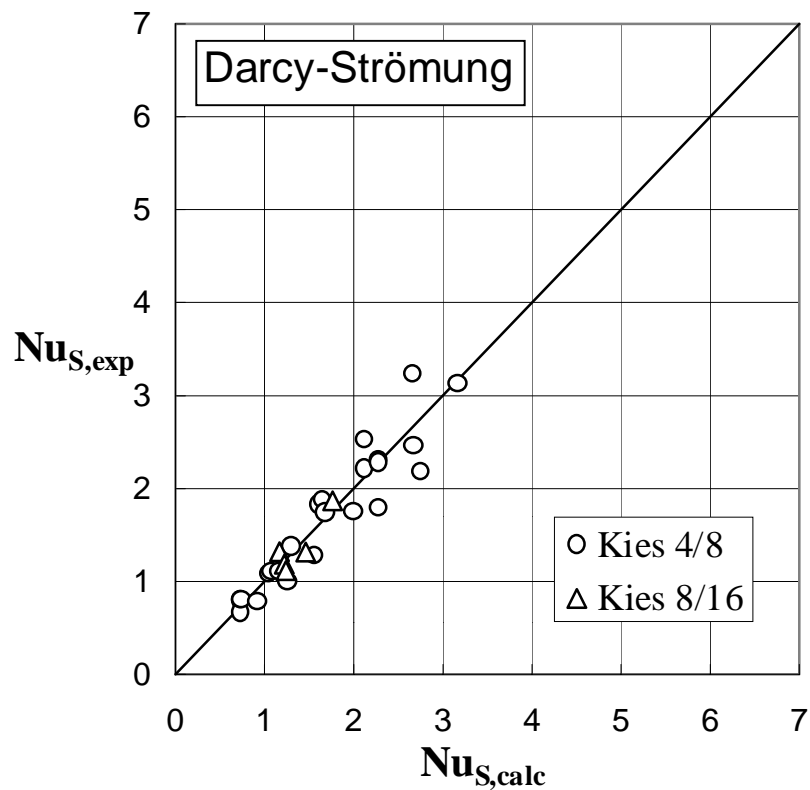


Bild 6.8: Vergleich zwischen den aus Meßwerten gebildeten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,exp}$ und den nach Gl. (6.12) berechneten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,calc}$ für die Darcy-Strömung

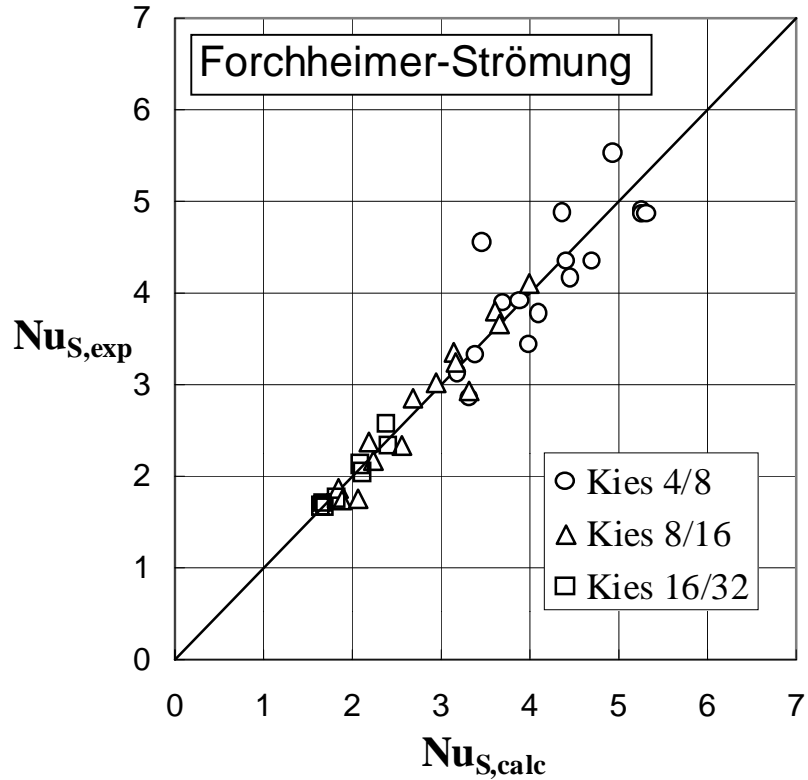


Bild 6.9: Vergleich zwischen den aus Meßwerten gebildeten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,exp}$ und den nach Gl. (6.12) berechneten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,calc}$ für die Forchheimer-Strömung

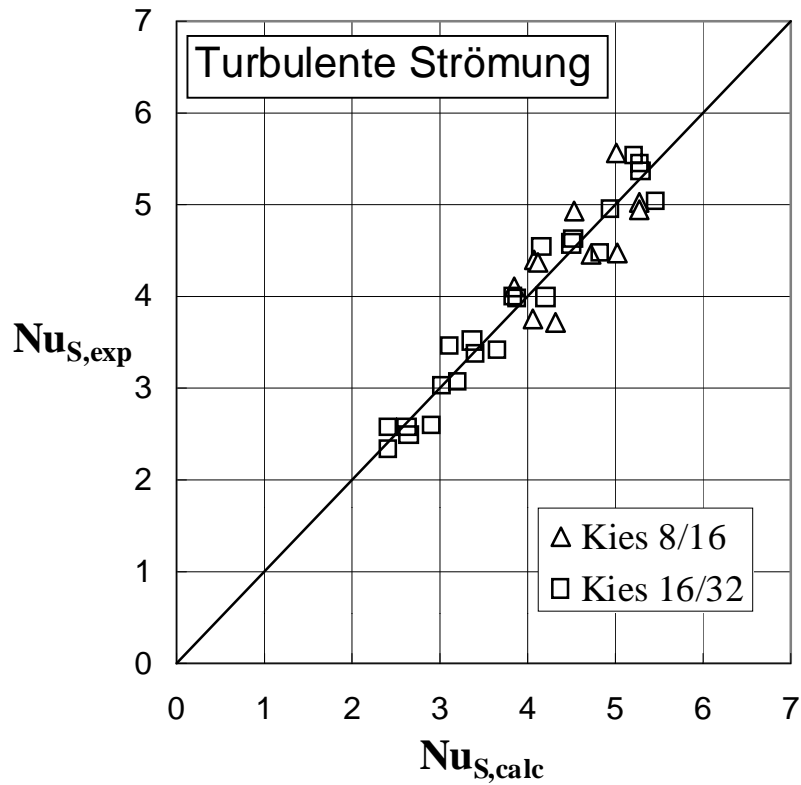


Bild 6.10: Vergleich zwischen den aus Meßwerten gebildeten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,exp}$ und den nach Gl. (6.12) berechneten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,calc}$ für die turbulente Strömung

6.4 Erweiterung des Anwendungsbereichs der Korrelationsgleichung

Um den Anwendungsbereich der Korrelationsgleichung (6.12) für den Wärmeübergang zu erweitern, wurden für die Darcy- und Forchheimer-Strömung die Daten von Fand et al. (1986 und 1990) hinzugenommen. Es wurden vier Datenreihen von Fand et al. nach den Korrelationsgleichungen (Gl. 4.39 und 4.40) wiedergegeben. Tabelle 6.4 zeigt die gewählten Parameter für die wiedergegebenen Datenreihen von Fand et al. und die Parameter der eigenen Messungen. In Bild 6.11 sind die Daten von Fand et al. und diejenigen der eigenen Messungen dargestellt.

Die Datenpunkte lassen sich in ähnlicher Form wie Gleichung (6.12) korrelieren:

$$\text{Nu}_S = C_1 \text{Ra}_S^{C_2} \left(\text{Gr}_S^{C_3} \text{Pr}_{\text{Fl}}^{C_4} \right)^{-\ln\left\{1 + [\arctan(d/D)]^{1,3}\right\}} \quad (6.14)$$

Die Anwendungsbereiche und die Konstanten C_1 , C_2 , C_3 und C_4 sind in Tabelle 6.5 aufgelistet.

Bild 6.12 und Bild 6.13 zeigen einen Vergleich zwischen den nach der neuen Gleichung (6.14) berechneten Nusselt-Zahlen $\text{Nu}_{S,\text{neu}}$ und den aus den alten Gleichungen wiedergegebenen Nusselt-Zahlen $\text{Nu}_{S,\text{alt}}$ jeweils für die Darcy- und die Forchheimer-Strömung.

Die Meßwerte lassen sich mit der Gleichung (6.14) recht gut wiedergeben. Unter Berücksichtigung der von Fand und Yamamoto (1990) angegebenen mittleren Abweichung 11 % für ihre Gleichungen beträgt insgesamt die mittlere Abweichung für die Darcy-Strömung 13,7 % und für die Forchheimer-Strömung 15,1 %.

	Schüttung	Strömungsform	d [mm]	D [mm]	d/D
Daten 1 (Fand)	Glaskugel/Wasser	Darcy-S.	1,238	11,43	0,1083
Daten 2 (Fand)	Glaskugel/Wasser	D.- und F.-S.	2,098	11,45	0,1832
Daten 3 (Fand)	Glaskugel/Wasser	D.- und F.-S.	5,969	11,43	0,5222
Daten 4 (Fand)	Glaskugel/Wasser	D.- und F.-S.	5,969	5,613	1,0634
Kies 4/8	Kies/Wasser	D.- und F.-S.	5,77	8,5	0,6788
Kies 8/16	Kies/Wasser	D.- und F.-S.	11,54	8,5	1,3576
Kies 16/32	Kies/Wasser	Forchheimer-S.	23,08	8,5	2,7153

Tabelle 6.4: Parameter für die vier aus den Korrelationsgleichungen von Fand et al. (1986 und 1990) wiedergegebenen Datenreihen und für eigene Messungen

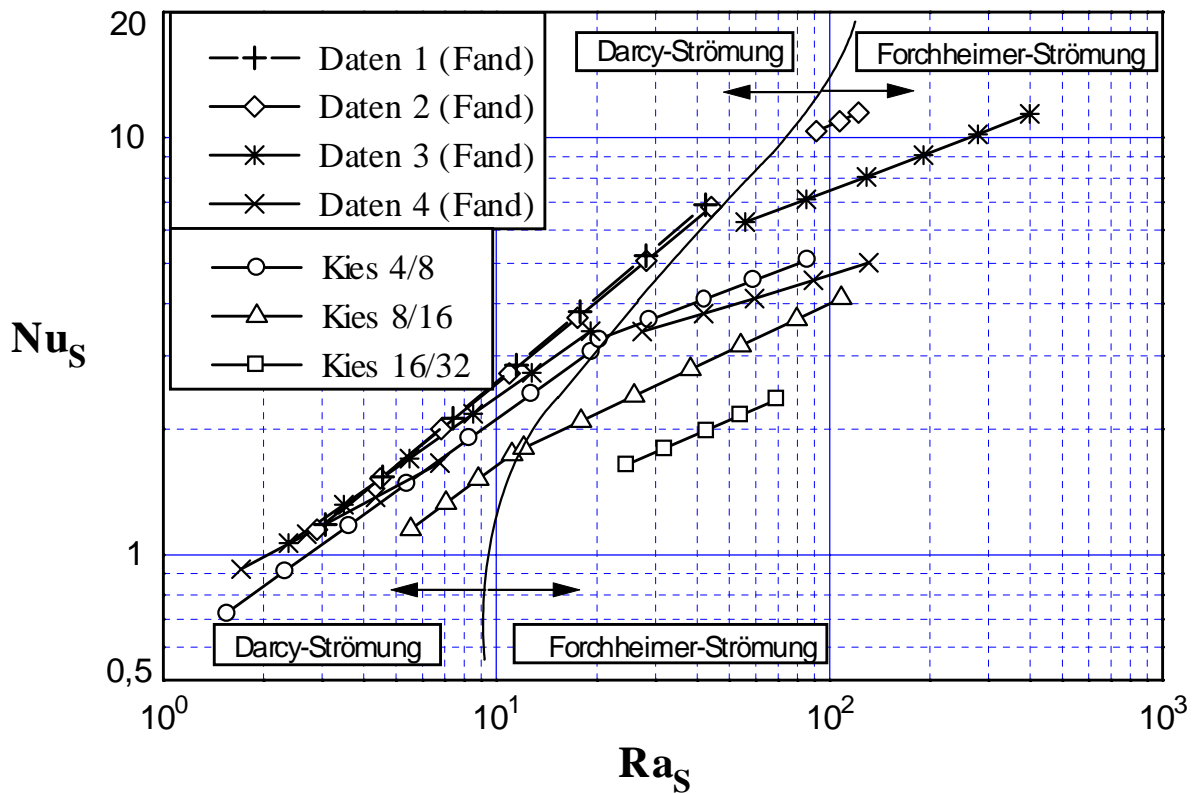


Bild 6.11: Wiedergegebene Daten für die Glaskugel/Wasser-Schüttung (nach Fand et al.) und die Kies/Wasser-Schüttung (eigene Messungen)

	Anwendungsbereich	C_1	C_2	C_3	C_4	Mittlere Abweichung
Darcy-Strömung ($Gr_{\max} \leq 7$)	$0,11 \leq \frac{d}{D} \leq 1,36$ $1,5 \leq Ra_S \leq 45$	0,5592	0,6904	0,3588	0,1090	13,7 %
Forchheimer-S. ($7 < Gr_{\max} \leq 85$)	$0,18 \leq \frac{d}{D} \leq 2,72$ $10 \leq Ra_S \leq 400$	1,6143	0,4419	0,2369	0,5325	15,1 %

Tabelle 6.5: Konstanten C_1 , C_2 , C_3 und C_4 der Gleichung (6.14) und die mittlere Abweichung

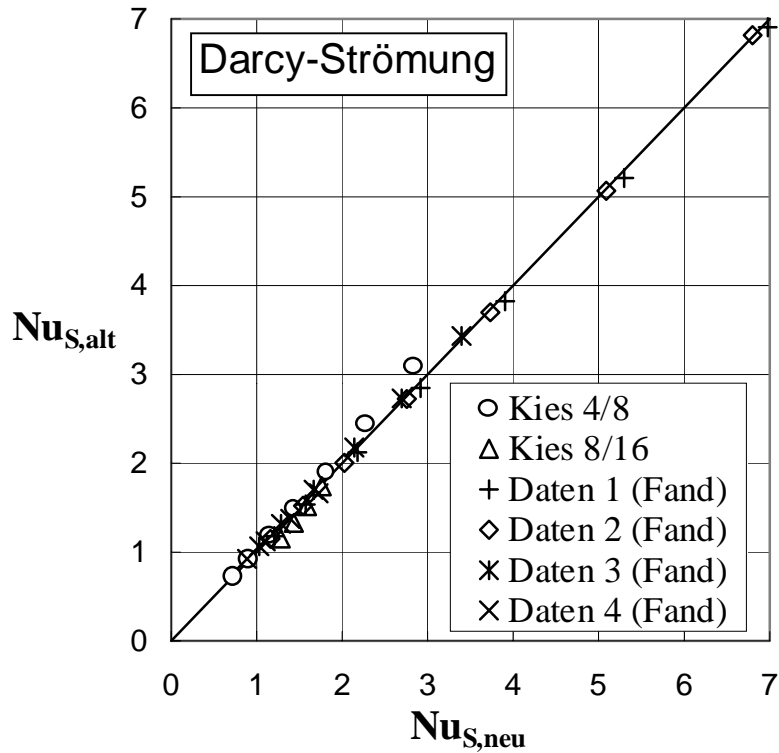


Bild 6.12: Vergleich zwischen den nach der neuen Gleichung (6.14) berechneten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,neu}$ und den aus den alten Korrelationsgleichungen (Gl. 4.39 and Gl. 6.12) wiedergegebenen Nusselt-Zahlen $Nu_{S,alt}$ für die Darcy-Strömung

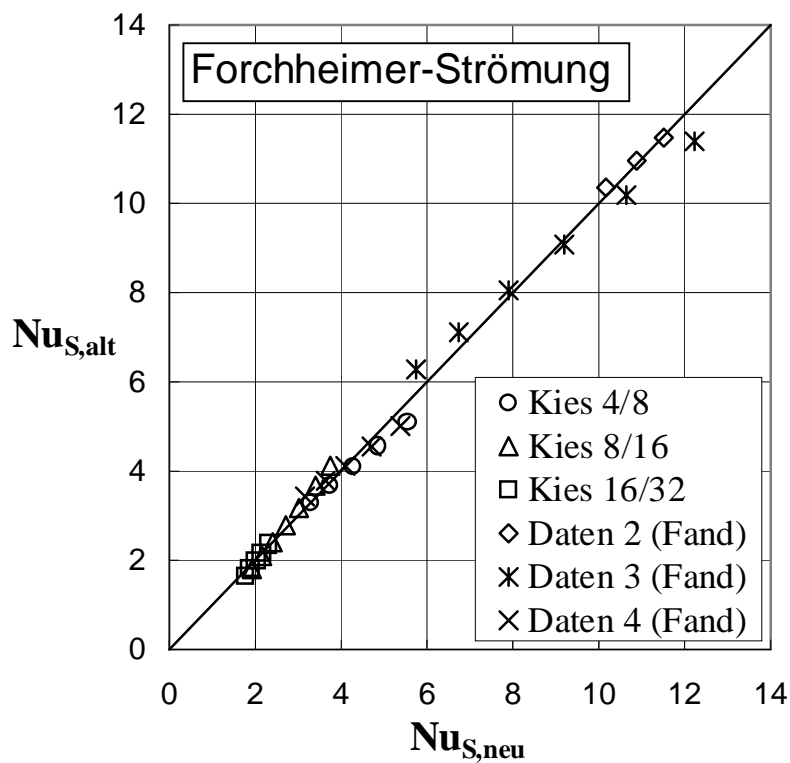


Bild 6.13: Vergleich zwischen den nach der neuen Gleichung (6.14) berechneten Nusselt-Zahlen $Nu_{S,neu}$ und den aus den alten Korrelationsgleichungen (Gl. 4.40 and Gl. 6.12) wiedergegebenen Nusselt-Zahlen $Nu_{S,alt}$ für die Forchheimer-Strömung

7 Ergebnisse der Versuche mit 3 Heizrohren

Bei den Versuchen mit 3 Heizrohren (siehe Bild 2.3b) wurde der Wärmeübergang an drei übereinander liegenden Rohren in der Kies/Wasser-Schüttung bzw. in Wasser gemessen. Die Wärmestromdichte \dot{q} (580 bis 15150 W/m²), das Teilungsverhältnis S/D (10, 5 und 3) sowie die Kieszusammensetzung (Kies 4/8, Kies 8/16, Kies 16/32 und Wasser) wurden variiert. Die Messungen mit den 3 Heizrohren wurden unmittelbar nach den Meßreihen mit den 7 Heizrohren durchgeführt, ohne die Schüttung umzubauen. Es wurden nur drei von den sieben Rohren, die mittlere Rohrreihe (Rohr 1 bis 3), beheizt. Die anderen Rohre 4 bis 7 blieben unbeheizt. Für jede Meßreihe wurden sieben Messungen bei verschiedenen Wärmestromdichten vorgenommen. Die Meßergebnisse sind in Tabelle A.3, im Anhang A zusammengestellt.

Entsprechend den Bemerkungen in Kapitel 2.4 werden Wandtemperaturen und Nusselt-Zahlen sowohl mit Bezug auf die ungestörte Temperatur des umgehenden Wassers (ϑ_∞) als auch mit Bezug auf die Anströmtemperatur (ϑ_{zui}) angegeben.

7.1 Wandtemperatur der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_∞)

In Bild 7.1 bis Bild 7.4 sind die dimensionslosen Temperaturen:

$$\Theta_i = \frac{\vartheta_{wi} - \vartheta_\infty}{\vartheta_{w1} - \vartheta_\infty} \quad (7.1)$$

der Rohre 1 bis 3 bei Variation der Medien, der Teilungsverhältnisse und der Wärmestromdichten dargestellt. $i = 1$ bis 3; ϑ_∞ wurde 1 cm über der Bodenplatte gemessen.

Für die Anordnung mit 3 Heizrohren in der Kies/Wasser-Schüttung (Bild 7.2 bis 7.4) liegen zwar ähnliche Temperaturverläufe wie später für die Anordnung mit 7 Heizrohren (Bild 8.2 bis 8.4) vor, jedoch weisen die Rohre 2 und 3 niedrigere Werte der dimensionslosen Temperatur auf. Dies läßt sich durch die kältere seitliche Zuströmung erklären. Mit kleinerem Kies wird die Verringerung der dimensionslosen Temperatur an Rohren 2 und 3 gegenüber der Anordnung mit 7 Heizrohren immer deutlicher.

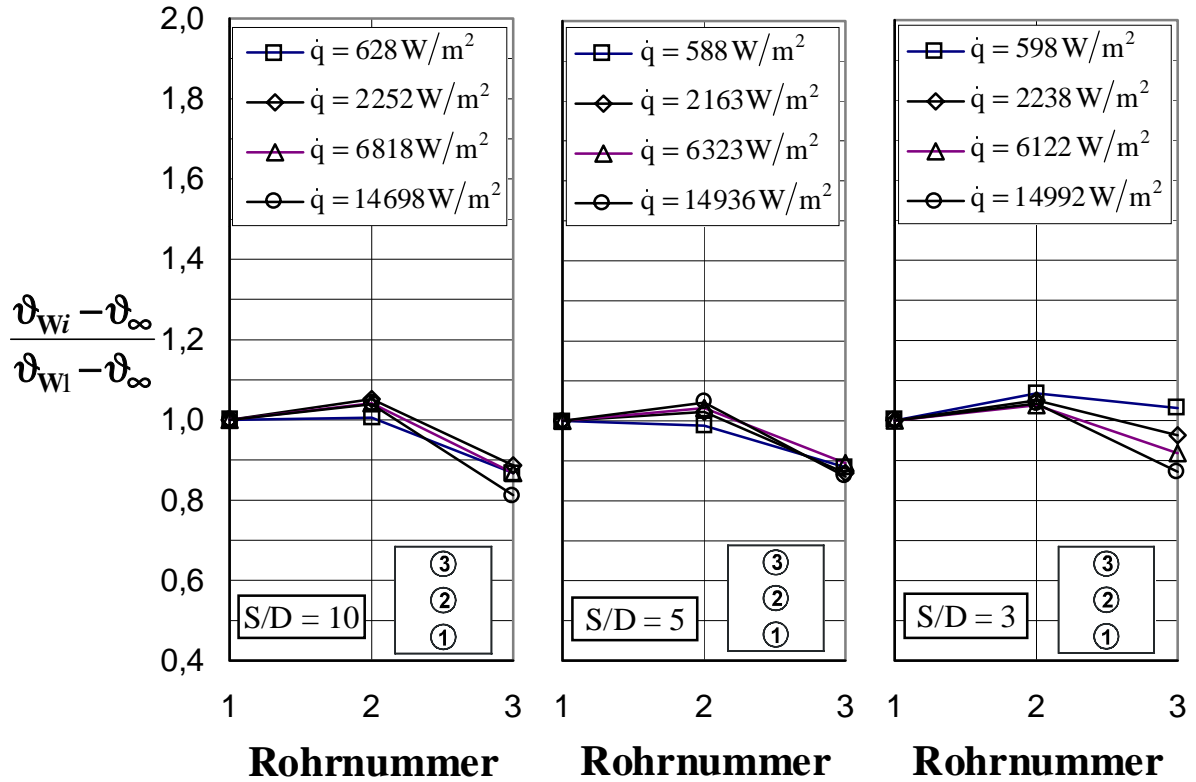


Bild 7.1: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in **Wasser** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 ($\vartheta_{W1}, \vartheta_{\infty}$ siehe Anhang A, Tab. A3)

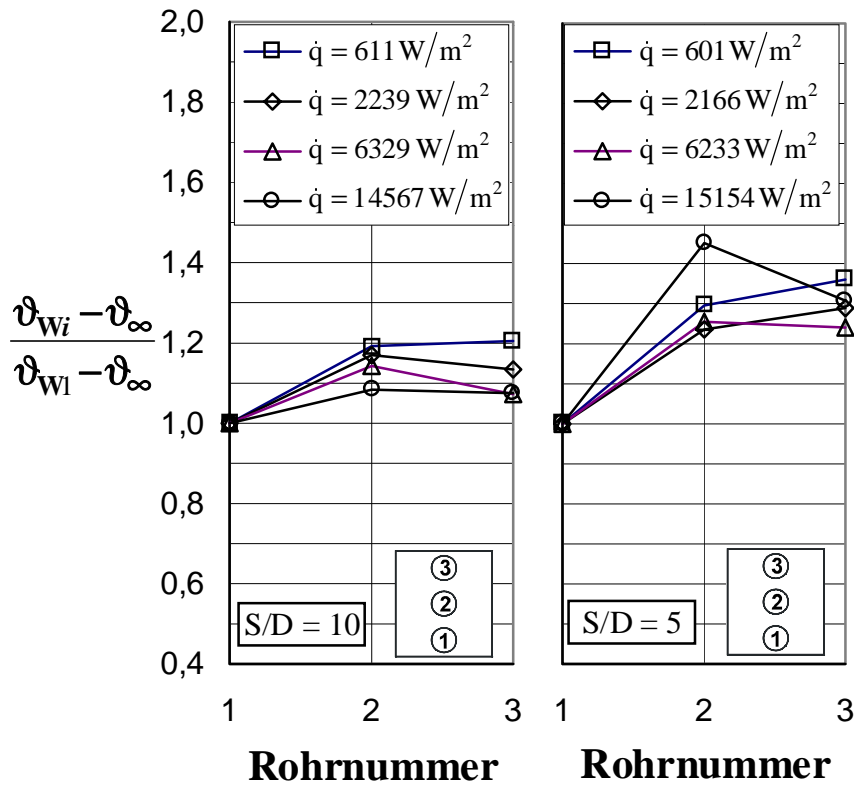


Bild 7.2: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 16/32** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

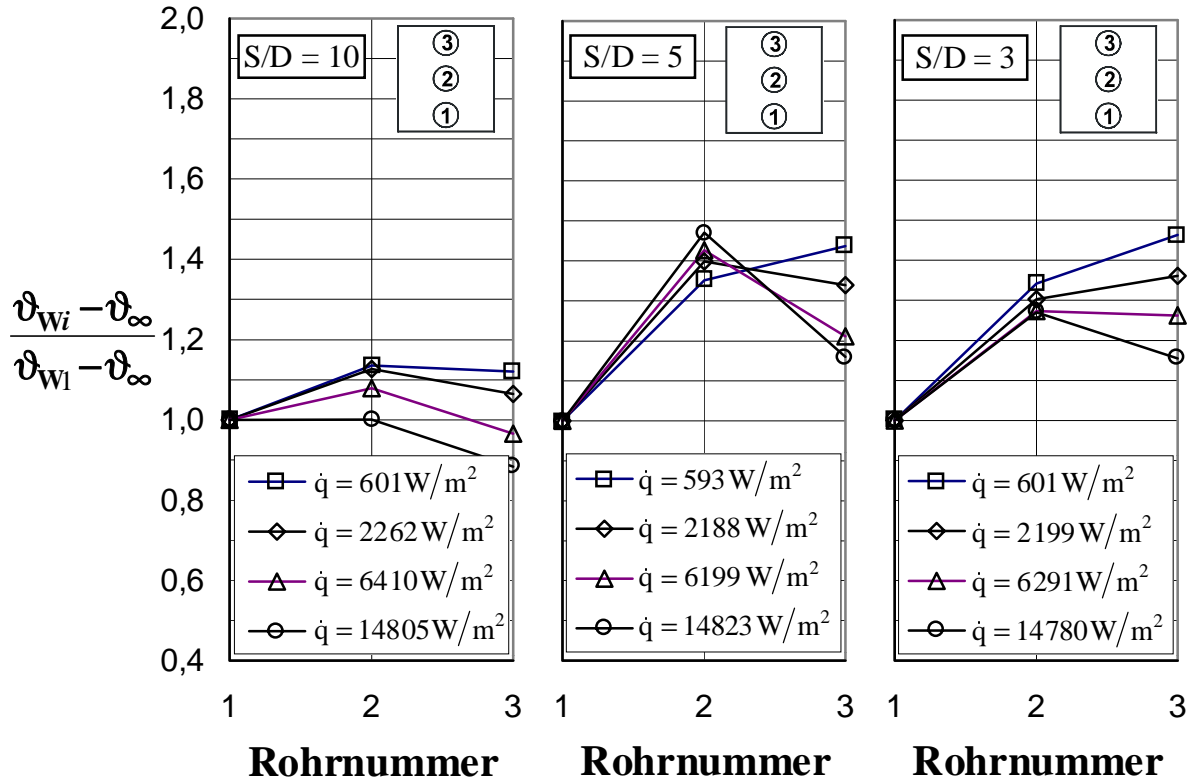


Bild 7.3: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 8/16** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

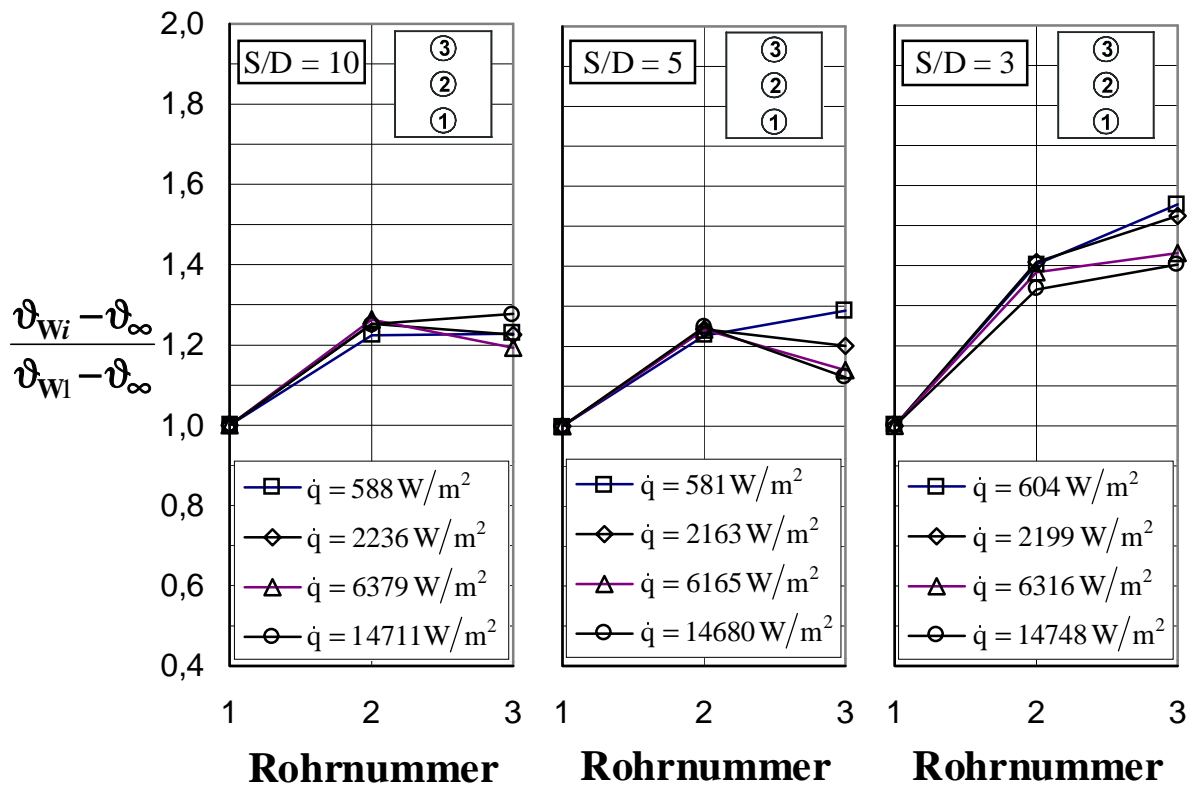


Bild 7.4: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 4/8** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

7.2 Wandtemperatur der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})

Wie in Kapitel 2.4 dargelegt, führt die Auftragung nach Gl. (7.1) mit ϑ_∞ zu Verzerrungen, da die wirklichen physikalischen Gegebenheiten gegenüber den praktisch möglichen zurückgestellt wurden. Eine Auftragung mit ϑ_{zui} nach Gl. (7.1a):

$$\Theta_{zui} = \frac{\vartheta_{wi} - \vartheta_{zui}}{\vartheta_{w1} - \vartheta_\infty} \quad (7.1a)$$

liefert die im folgenden aufgeführten Diagramme (Bild 7.1a bis Bild 7.4a).

Da in Gl. (7.1a) der Zähler für $i > 1$ stets kleiner ist als in Gl. (7.1), liegen die entsprechenden dimensionslosen Temperaturen stets tiefer als in den Bildern 7.1 bis 7.4.

In Wasser (Bild. 7.1a) nimmt die dimensionslose Temperatur Θ_{zui} vom Rohr 1 bis 3 ab ($\Theta_{zu1} > \Theta_{zu2} > \Theta_{zu3}$). In der Schüttung (Bild 7.2a bis 7.4a) ist zumeist $\Theta_{zu1} > \Theta_{zu2} > \Theta_{zu3}$, jedoch kommt bei einigen Messungen vor, daß bei hoher Wärmestromdichte $\Theta_{zu2} > \Theta_{zu1}$ ist und bei niedriger Wärmestromdichte $\Theta_{zu3} > \Theta_{zu2}$ ist.

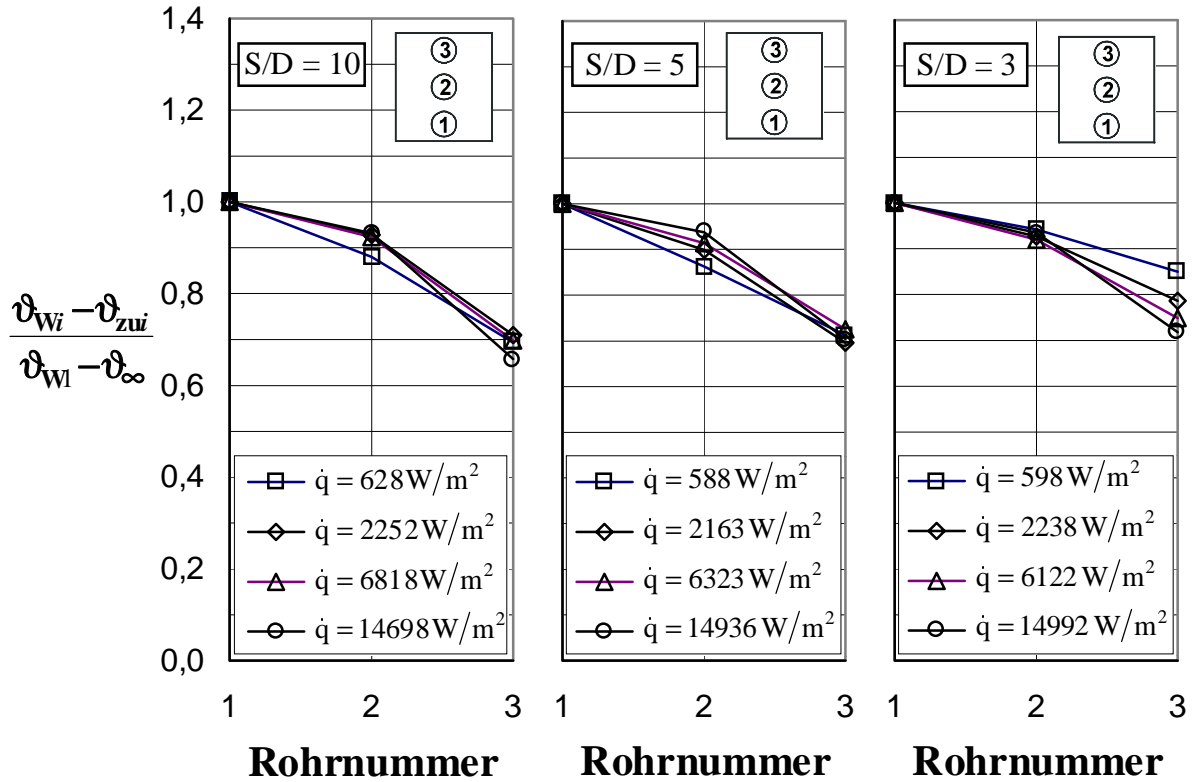


Bild 7.1a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in **Wasser** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

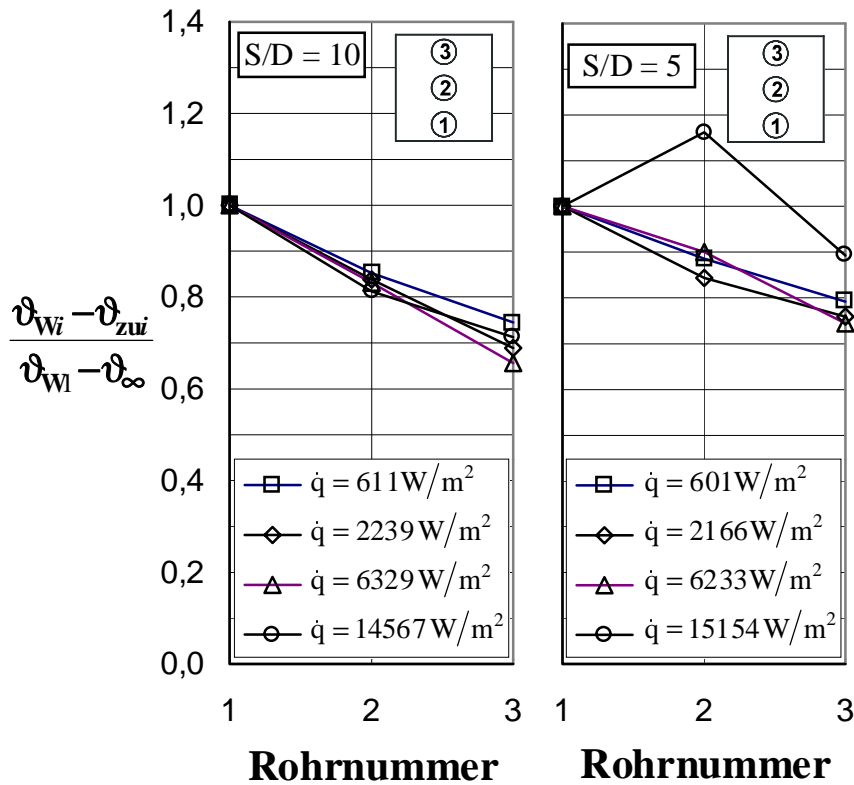


Bild 7.2a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 16/32** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

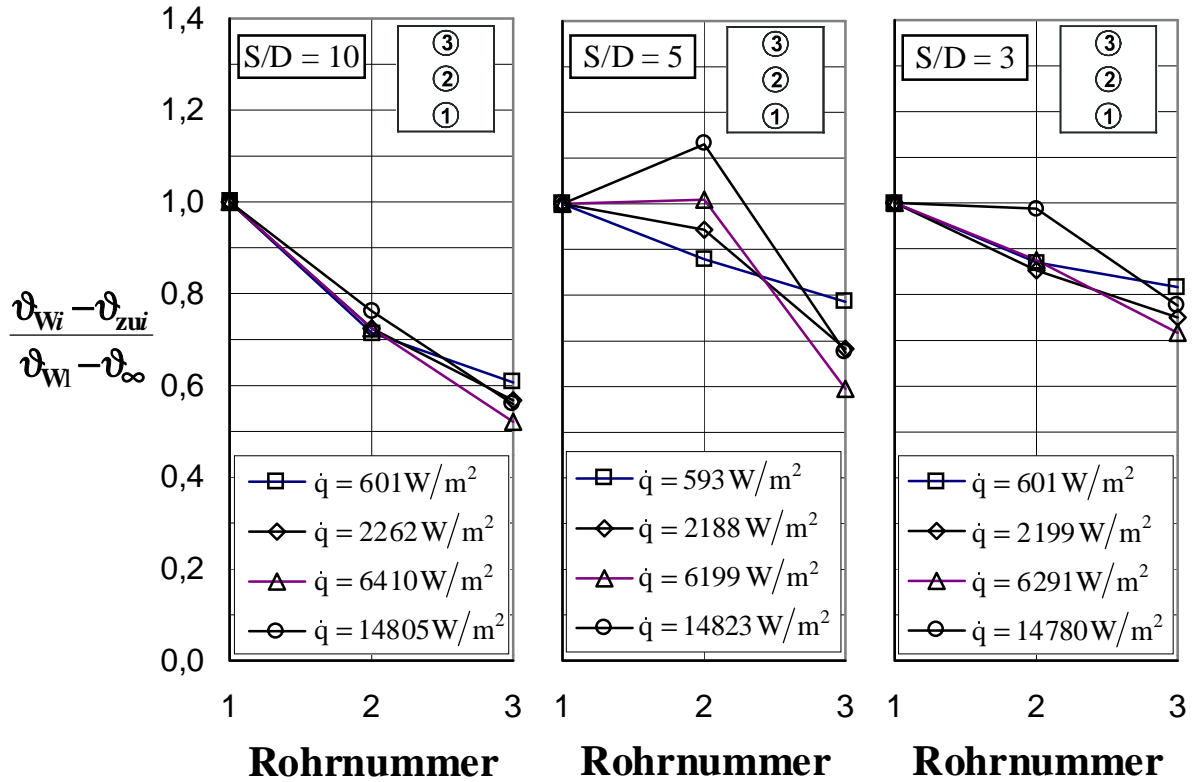


Bild 7.3a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 8/16** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

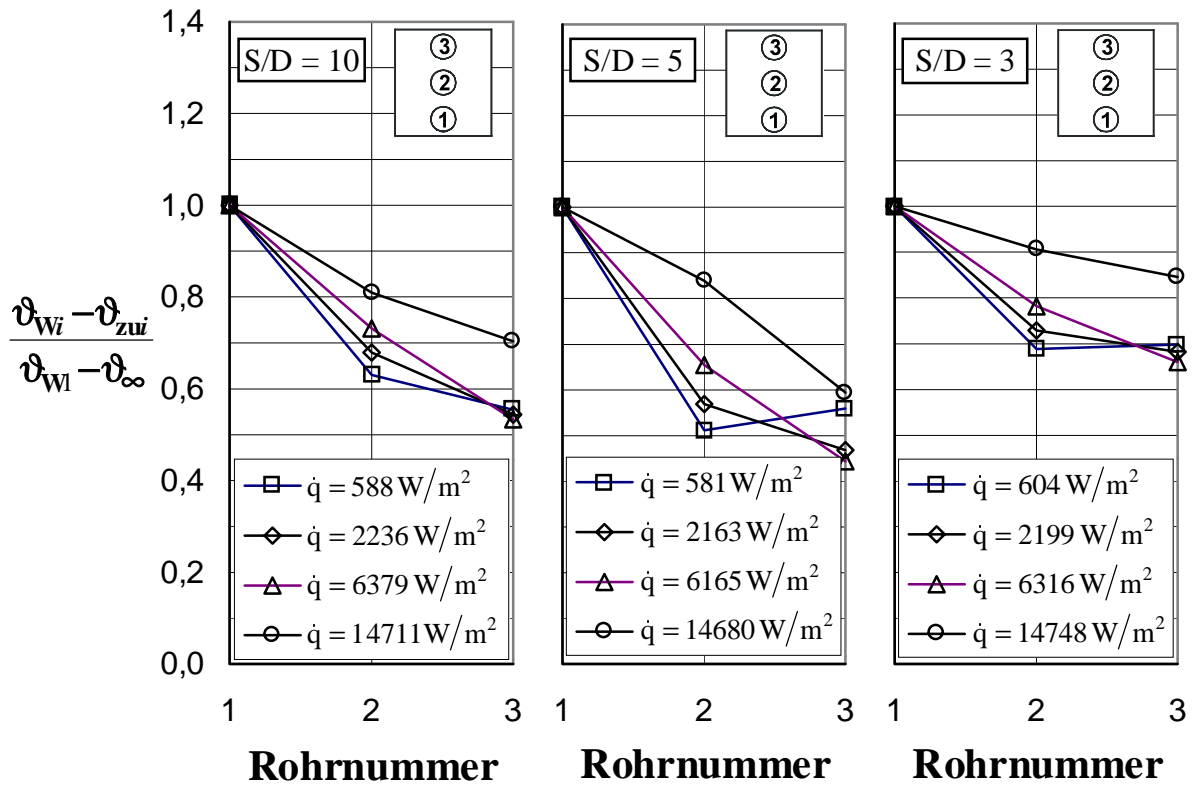


Bild 7.4a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 4/8** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

7.3 Nusselt-Zahlen der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_∞)

Um den Einfluß der Verwendung von Rohrbündel auf den Wärmeübergang gegenüber dem Einzelrohr zu verdeutlichen, ist es zweckmäßig, die Nusselt-Zahl Nu eines Rohres im Rohrbündel auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bei derselben Wärmestromdichte zu beziehen.

Die Nusselt-Zahl Nu für Rohrbündel wurde aus den gemessenen Werten \dot{q} , ϑ_{Wi} und ϑ_∞ bzw. ϑ_{zui} (siehe Anhang A, Tab. A3 bzw. Anhang B) berechnet:

$$Nu|_{Fl} = \frac{\alpha D}{\lambda_{Fl}} = \frac{\dot{q} D}{\Delta \vartheta \lambda_{Fl}} \quad (7.2)$$

$$Nu|_S = \frac{\alpha D}{\lambda_S} = \frac{\dot{q} D}{\Delta \vartheta \lambda_S} \quad (7.3)$$

λ_{Fl} ist die Wärmeleitfähigkeit des Wassers und λ_S die effektive Wärmeleitfähigkeit der Kies/Wasser-Schüttung, $\Delta \vartheta = \vartheta_{Wi} - \vartheta_\infty$ bzw. $\vartheta_{Wi} - \vartheta_{zui}$. Als Bezugstemperatur zur Berechnung der Stoffwerte ist die mittlere Filmtemperatur $\vartheta_{Film} = (\vartheta_W + \vartheta_\infty)/2$ bzw. $(\vartheta_W + \vartheta_{zui})/2$ einzusetzen.

Um die Bezugs-Nusselt-Zahl (aus Einzelrohr) von der Nusselt-Zahl Nu des Rohrbündels zu unterscheiden, wird dieser Bezugswert mit Index "0" bezeichnet. Die Bezugs-Nusselt-Zahl Nu_0 wurde nach den Korrelationsgleichungen Gl. (C.1) und (D.1) für Einzelrohr (siehe Anhang C und D) wie folgt berechnet:

$$Nu_0|_{Fl} (= \frac{\alpha D}{\lambda_{Fl}}) = C_1 \dot{q}_{Bündel}^{C_2} \quad (7.4)$$

$$Nu_0|_S (= \frac{\alpha D}{\lambda_S}) = C_1 \dot{q}_{Bündel}^{C_2} \quad (7.5)$$

Dabei ist $\dot{q}_{Bündel}$ die gemessene Wärmestromdichte \dot{q} der Rohre im Bündel, mit $\dot{q}_{Bündel}$ in W/m^2 .

Ein Vergleich zwischen den beiden Verhältnissen der Nusselt-Zahl $\left. \frac{Nu}{Nu_0} \right|_{Fl}$ und $\left. \frac{Nu}{Nu_0} \right|_S$ zeigt,

daß der Unterschied lediglich innerhalb von 1 % liegt, d. h.,

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \left. \frac{Nu}{Nu_0} \right|_{Fl} \approx \left. \frac{Nu}{Nu_0} \right|_S \quad (7.6)$$

Die im folgenden angegebenen Nu-Verhältnisse sind mit $\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_0} \Big|_{\text{Fl}}$ mit nur geringer Genauigkeitseinbuße gemacht, um die Ergebnisse für die Schüttung mit denen für Wasser vergleichen zu können.

Die so gebildeten Verhältnisse Nu/Nu_0 der Nusselt-Zahl sind in Bild 7.5 bis Bild 7.8 für die untersuchten Medien und Korngrößen jeweils für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte dargestellt. Entsprechende Auftragungen sind für das 7Rohr-Bündel in den Bildern 8.9 bis 8.12 gemacht.

Zwar zeigt Bild 7.5 (Wasser) ähnliche Kurvenverläufe wie in Bild 8.9, jedoch haben alle drei Rohre größere Nusselt-Zahlen als diejenigen bei Einsatz von 7 Heizrohren. Dies läßt sich durch die kühlere seitliche Zuströmung erklären.

In Bildern 7.6 bis 7.8 für Kies 16/32, Kies 8/16 und Kies 4/8 weist das unterste Rohr 1 fast identische Nusselt-Zahlen im Vergleich zu der Anordnung mit 7 Heizrohren (Bild 8.10 bis 8.12) auf, während sich die Nusselt-Zahlen der Rohre 2 und 3 nun deutlich erhöhen. Alle Nusselt-Zahlen für das unterste Rohr liegen am höchsten. Eine Ausnahme bildet Kies 8/16 bei $S/D = 10$ (Bild 7.7). Bei großen Wärmestromdichten liegen die Meßwerte des Rohres 1 unterhalb der des Rohres 3.

Für die Schüttung mit Kies 4/8 (Bild 7.8) nimmt die normierte Nusselt-Zahl Nu/Nu_0 für alle drei Rohre bei hohen Wärmestromdichten mit steigender Wärmestromdichte leicht ab. Dies trifft auch auf das Rohr 1 bei der Anordnung mit 7 Heizrohren (mit Kies 4/8 bzw. Kies 8/16) bei $S/D = 3$ zu und läßt sich durch die schlechte Wärmeabfuhr bei kleinerer Permeabilität erklären.

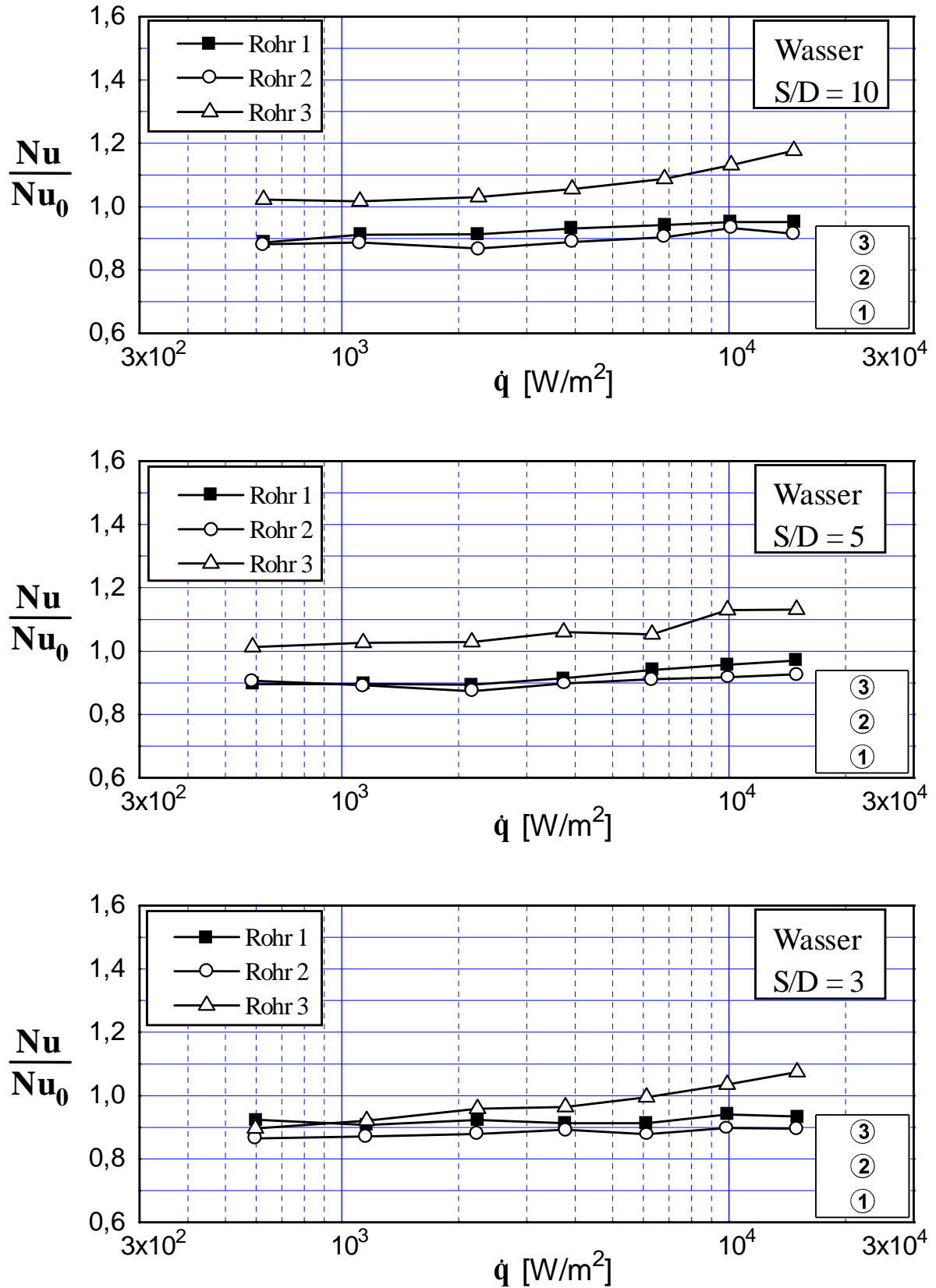


Bild 7.5: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 3 in **Wasser** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

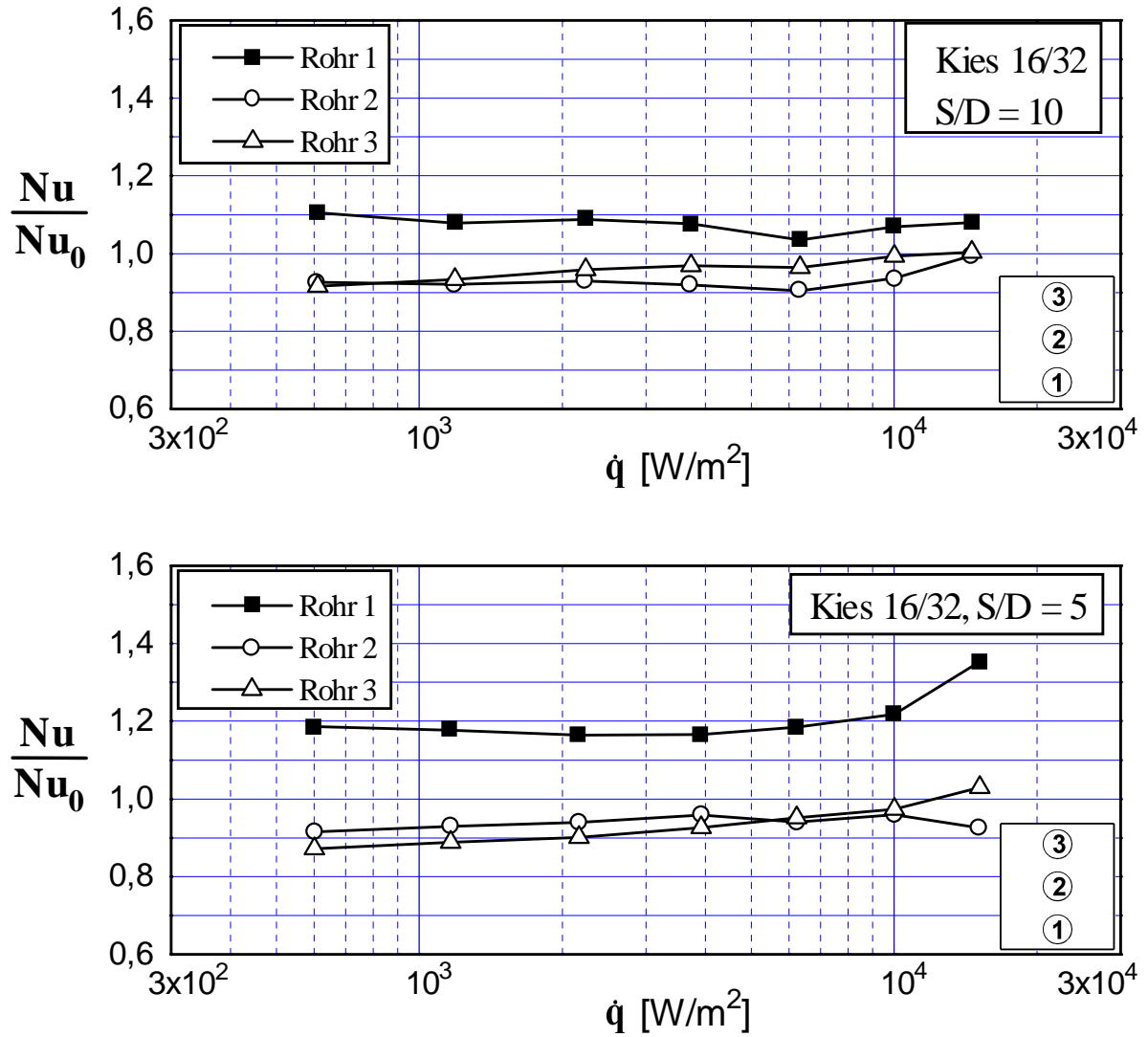


Bild 7.6: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 16/32** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

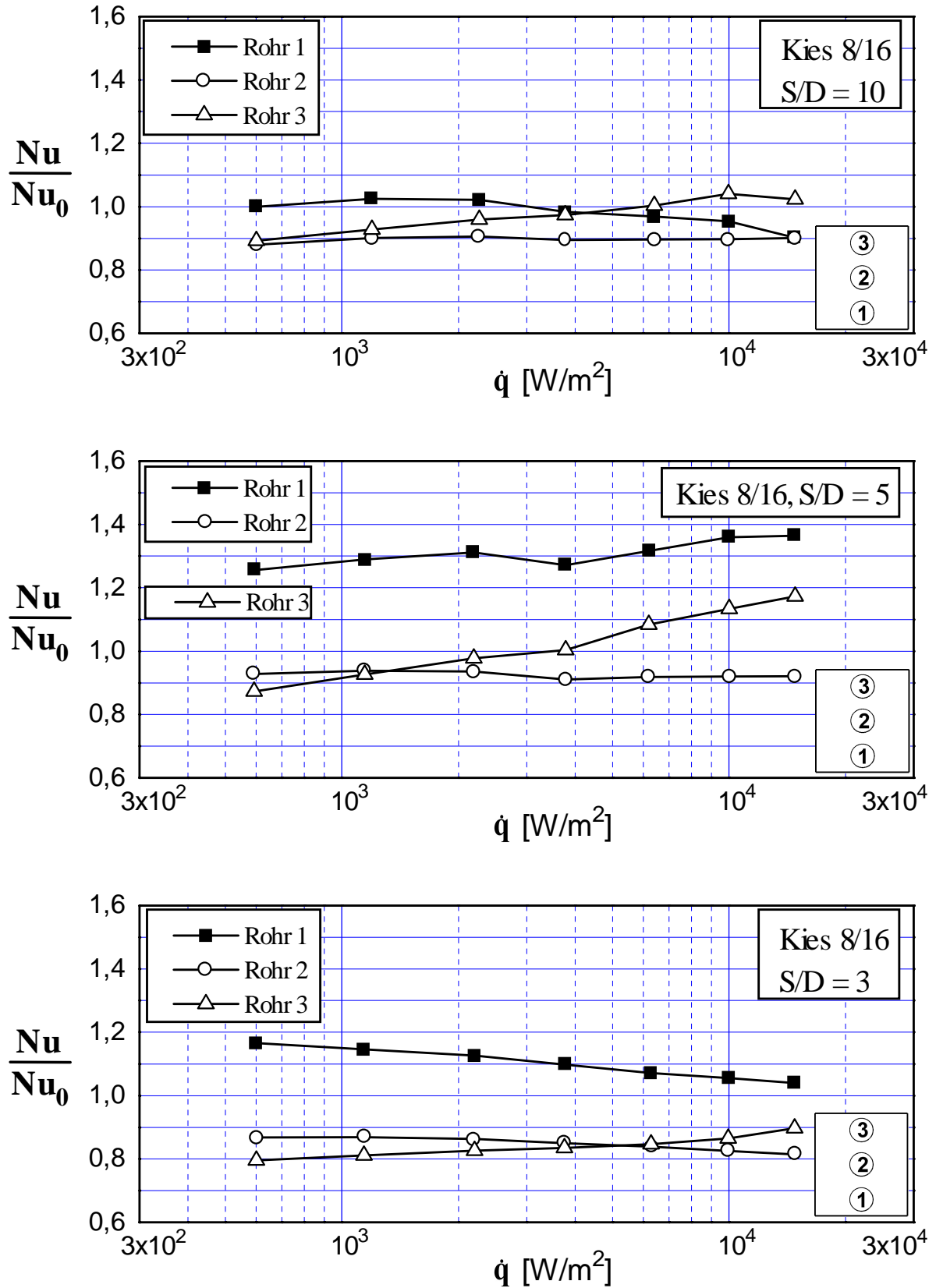


Bild 7.7: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 8/16** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

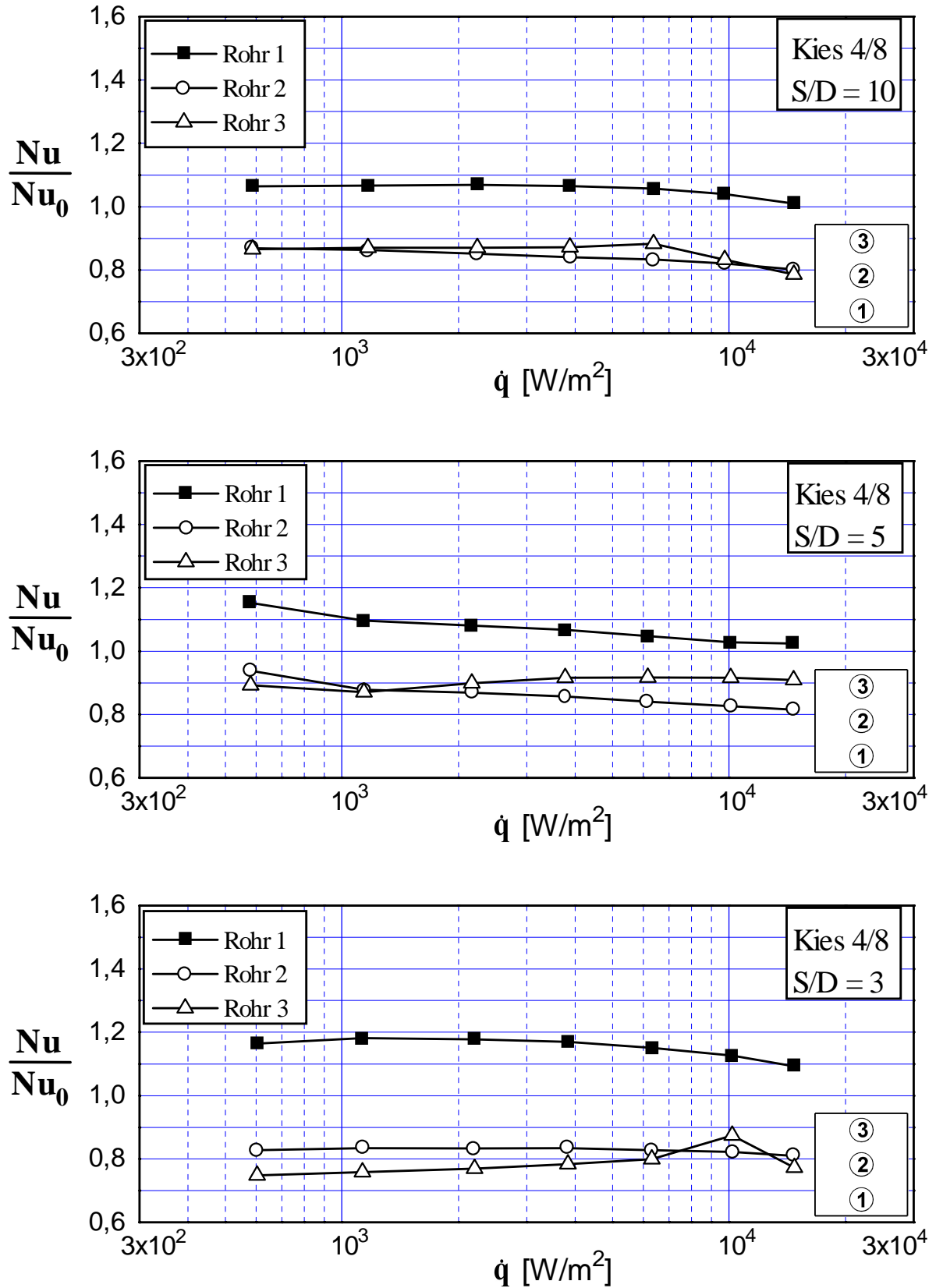


Bild 7.8: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 4/8** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

7.3.1 Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des 3Rohr-Bündels (Bezug auf \varnothing_∞)

In Bild 7.9 bis Bild 7.12 sind die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen mittleren Nusselt-Zahlen Nu_m bei jeweils derselben Wärmestromdichte für verschiedene Medien und für verschiedene Teilungsverhältnisse Einzelrohres in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte dargestellt. Zusätzlich sind die entsprechenden Verhältnisse S/d auch im Bild angegeben.

Die mittlere Nusselt-Zahl der Rohre wird wie folgt berechnet:

$$Nu_m = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 Nu_i \quad (7.7)$$

mit Nu_i als die Nusselt-Zahl der einzelnen Rohre bei 3 Heizrohren (aus den Bildern 7.5 bis 7.8).

Der Einfluß des Teilungsverhältnisses auf die mittlere Nusselt-Zahl in Wasser bzw. in der Schüttung mit Kies 16/32 und Kies 4/8 ist sehr gering, während sich in der Schüttung mit Kies 8/16 bei $S/D = 5$ eine deutliche Erhöhung der mittleren Nusselt-Zahlen gegenüber denen bei $S/D = 10$ und $S/D = 3$ zeigt.

Für alle drei Kieszusammensetzungen und drei Teilungsverhältnisse zeigt sich bei niedrigen Wärmestromdichten ein von der Wärmestromdichte nahezu unabhängiger Verlauf der normierten mittleren Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 . Für die Schüttung mit Kies 4/8 nimmt die normierte mittlere Nusselt-Zahl bei hohen Wärmestromdichten leicht ab. Dies läßt sich schon bei der Darstellung der Nusselt-Zahl für einzelne Rohre erkennen (siehe Bild 7.8).

Im Vergleich zu der Anordnung mit 7 Heizrohren kann man erkennen, daß die Werte der normierten mittleren Nusselt-Zahl für die Anordnung mit 3 Heizrohren größer sind. Dies kann man durch eine niedrigere Umgebungstemperatur in der Nähe der Rohre erklären. Die mittlere Erhöhung der normierten mittleren Nusselt-Zahl gegenüber der Anordnung mit 7 Heizrohren liegt zwischen 2,4 % und 19,8 %. Dabei wurde der mittlere Wert aus den sieben Messungen über den Bereich der Wärmestromdichte für jede Versuchsreihe ermittelt. Tabelle 7.1 zeigt die Zahlenwerte. In Wasser erhöht sich die mittlere Nusselt-Zahl am größten. Mit Kies, vor allem bei kleinem Teilungsverhältnis $S = 3$, wird die Erhöhung der mittleren Nusselt-Zahl kleiner, da bei kleinem Rohrabstand der Wärmeübergang hauptsächlich durch das darunterliegende Rohr bzw. die Anströmtemperatur von unten bestimmt wird. Dagegen wird bei großem Teilungsverhältnis $S/D = 10$ die Erhöhung der mittleren Nusselt-Zahl größer, da der Einfluß der kühleren seitlichen Zuströmung stärker wird.

	Wasser	Kies 16/32	Kies 8/16	Kies 4/8
S/D = 10	+19,8 %	+14,2 %	+11,7 %	+10,2 %
S/D = 5	+13,4 %	+12,1 %	+13,4 %	+6,9 %
S/D = 3	+14,4 %	-	+2,4 %	+4,6 %

Tabelle 7.1: Mittlere Erhöhung der normierten mittleren Nusselt-Zahl für die Anordnung mit 3 Heizrohren gegenüber der Anordnung mit 7 Heizrohren

Die Feststellung für die Anordnung mit 7 Heizrohren in Abschnitt 8.3.1 trifft für die Anordnung mit 3 Heizrohren zu:

In Wasser ergibt sich die größte mittlere Nusselt-Zahl beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$, in der Kies/Wasser-Schüttung tritt der größte Wert zwischen $S'/d = 1,47$ und $2,95$ auf.

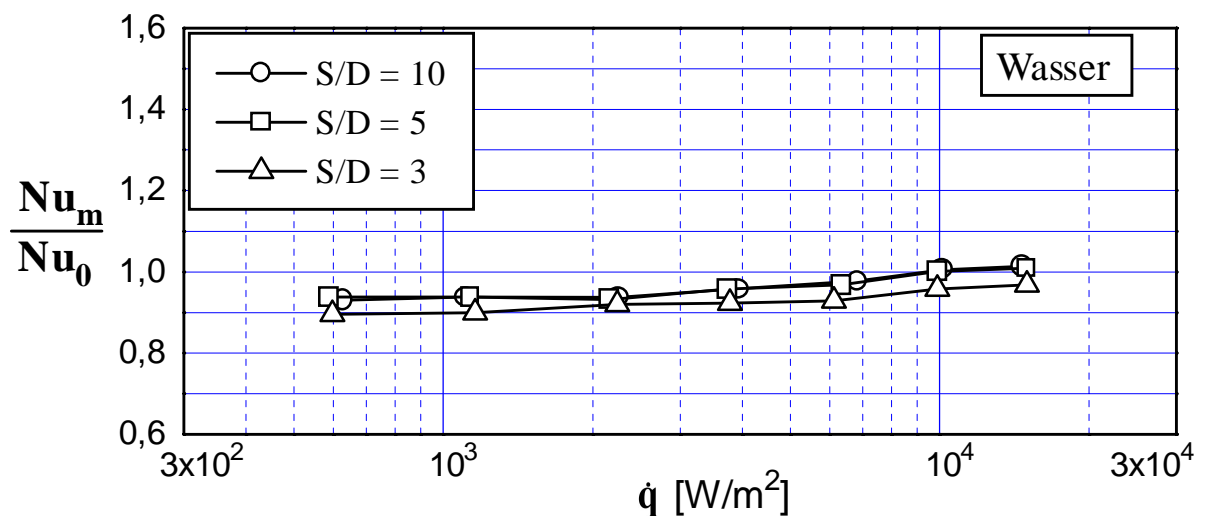


Bild 7.9: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für Wasser

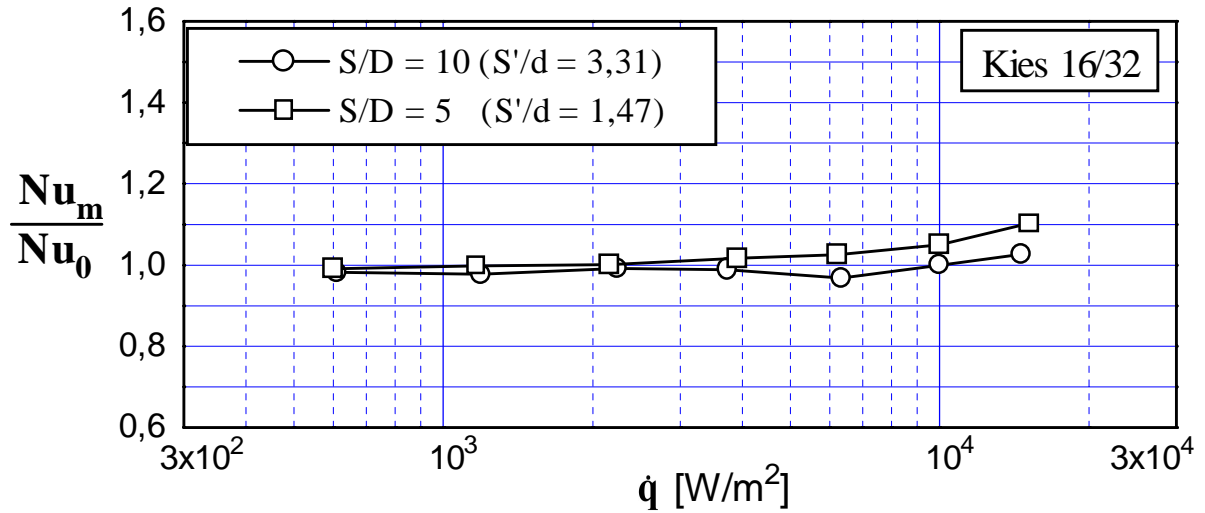


Bild 7.10: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit **Kies 16/32**

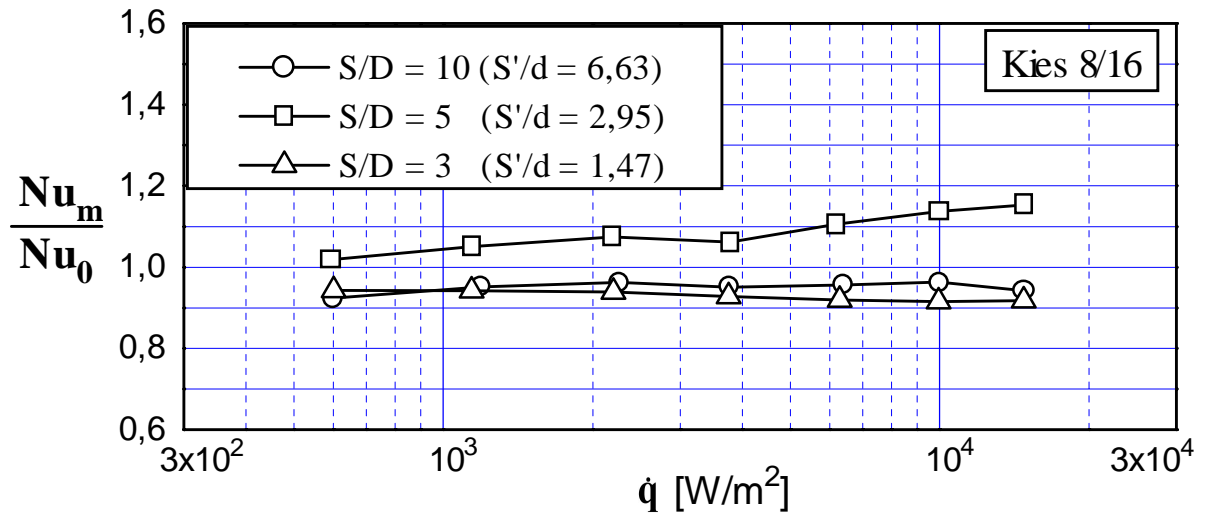


Bild 7.11: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit **Kies 8/16**

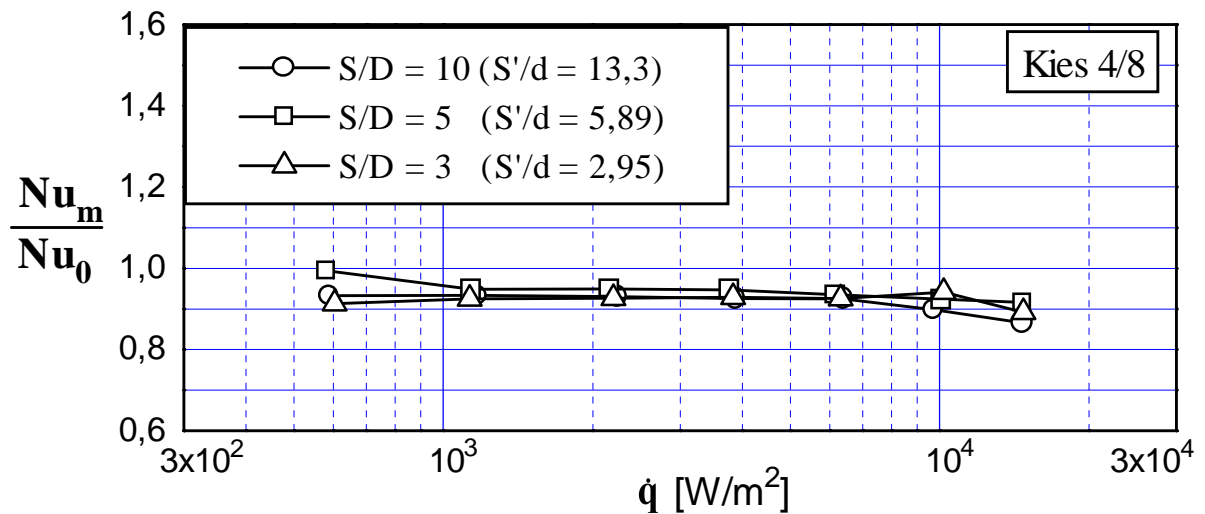


Bild 7.12: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit **Kies 4/8**

7.3.2 Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des 3Rohr-Bündels (Bezug auf \varnothing_∞)

In Bild 7.13 bis Bild 7.15 sind die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen mittleren Nusselt-Zahlen Nu_m bei jeweils derselben Wärmestromdichte für verschiedene Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 und für verschiedene Kieszusammensetzungen (Korngrößen) in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte dargestellt. Zum Vergleich sind die Messungen in Wasser auch im Bild eingezeichnet.

Für alle drei Teilungsverhältnisse nähern sich die Werte der normierten mittleren Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 in Wasser schon bei niedrigen Wärmestromdichten den Werten in der Schüttung mit Kies 4/8 und werden mit steigender Wärmestromdichte immer größer (siehe auch Bild 8.17 bis 8.19).

Beim Teilungsverhältnis $S/D = 10$ (Bild 7.13) nimmt die mittlere Nusselt-Zahl mit kleiner werdender Kieskorngröße ab. Für Kies 16/32 mit dem Verhältnis $S'/d = 3,31$ liegen die Werte am höchsten.

Beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$ (Bild 7.14) zeigen sich deutlich für Kies 8/16 die größten mittleren Nusselt-Zahlen. Dies entspricht einem Verhältnis von $S'/d = 2,95$.

Beim Teilungsverhältnis $S/D = 3$ (Bild 7.15) nähern sich die beiden Kurven für Kies 8/16 und Kies 4/8 an. Die beiden Zusammensetzungen haben die Verhältnisse $S'/d = 1,47$ und $2,95$.

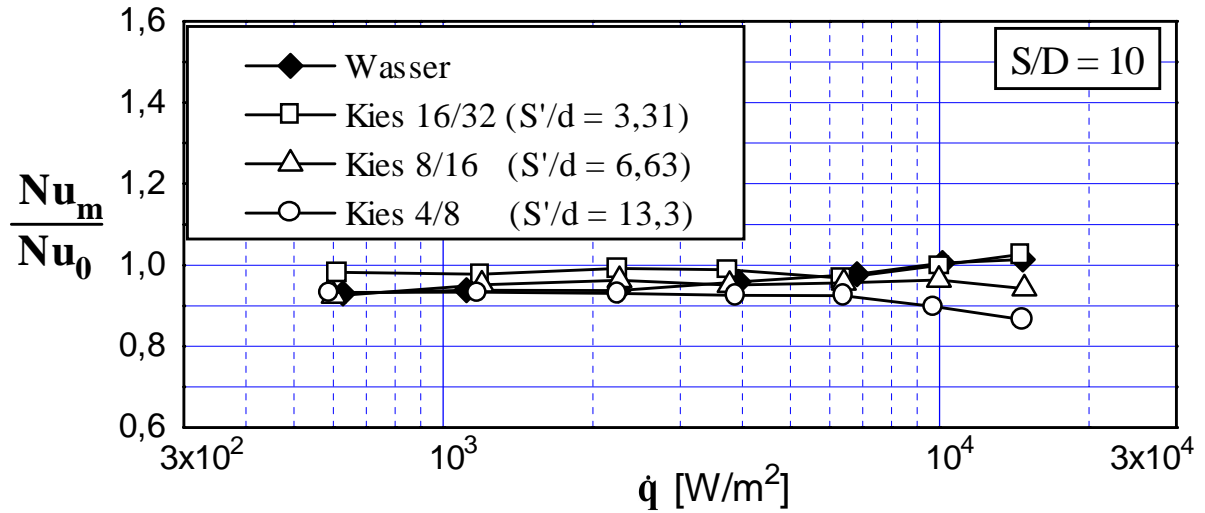


Bild 7.13: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 10$

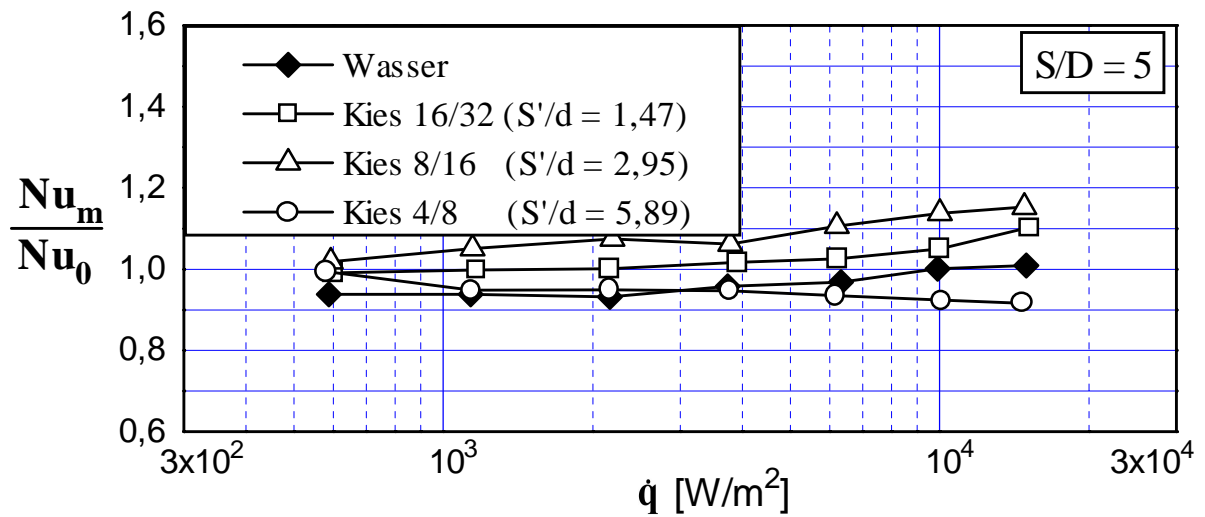


Bild 7.14: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$

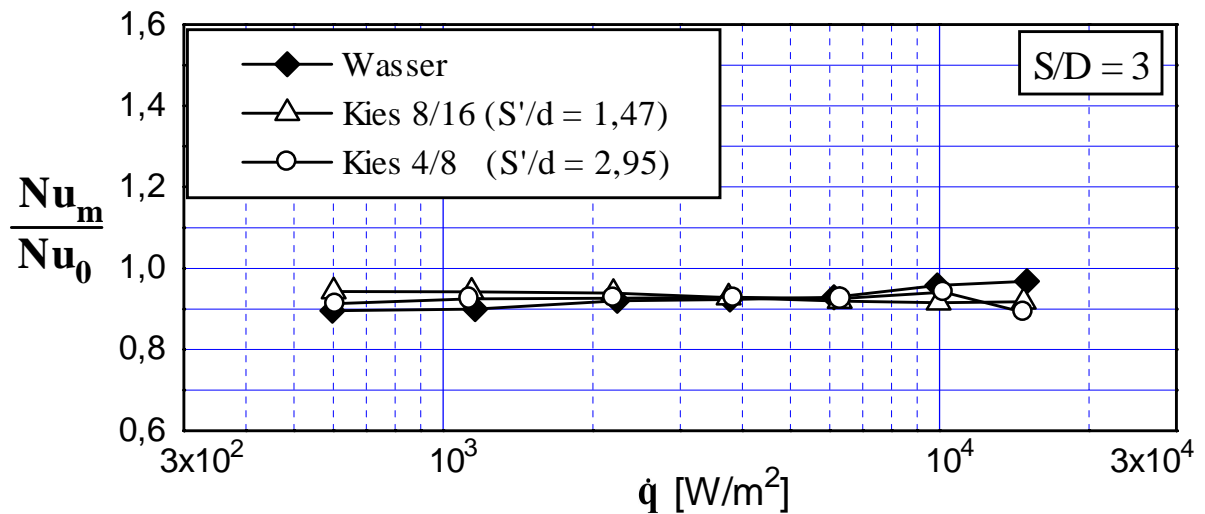


Bild 7.15: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 3$

7.4 Nusselt-Zahlen der Rohre im 3Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})

Im folgenden sind die Nusselt-Zahlen der Rohre unter Zugrundlegung der jeweiligen Anströmtemperatur ϑ_{zui} gezeigt. Der Wärmeübergangskoeffizient ist dabei nach Gl. (2.2a) berechnet.

In den Bildern 7.5a bis 7.15a zeigen sich zum Teil erhebliche Unterschiede zu 7.5 bis 7.15 sowohl in der Lage der einzelnen Kurven als auch in deren Verlauf. Eine Tabelle der berechneten Werte ist im Anhang E gegeben.

In Wasser (Bild 7.5a) zeigt sich eine ständige Erhöhung der wirklichen Nusselt-Zahl vom Rohr 1 bis 3. Beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$ für Kies 8/16 (Bild 7.7a) und Kies 4/8 (Bild 7.8a) zeigen die Kurven für das oberste Rohr deutlich einen glockenförmigen Verlauf.

Der Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl Nu_m wird im Abschnitt 7.4.1 gezeigt. Sowohl in Wasser als auch in der Schüttung weist das Teilungsverhältnis $S/D = 5$ die größten mittleren Nusselt-Zahlen bei gleicher Wärmestromdichte auf.

Der Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl Nu_m wird im Abschnitt 7.4.2 gezeigt. Außer bei höheren Wärmestromdichten ergibt sich die größte normierte mittlere Nusselt-Zahl für Kies 4/8 bei allen drei Teilungsverhältnissen $S/D = 10, 5$ und 3.

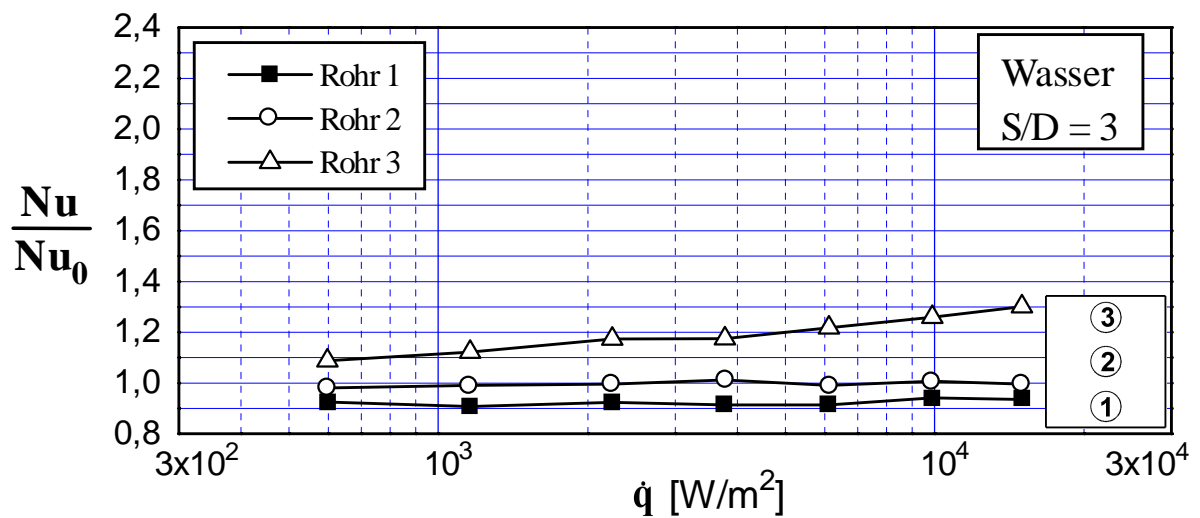
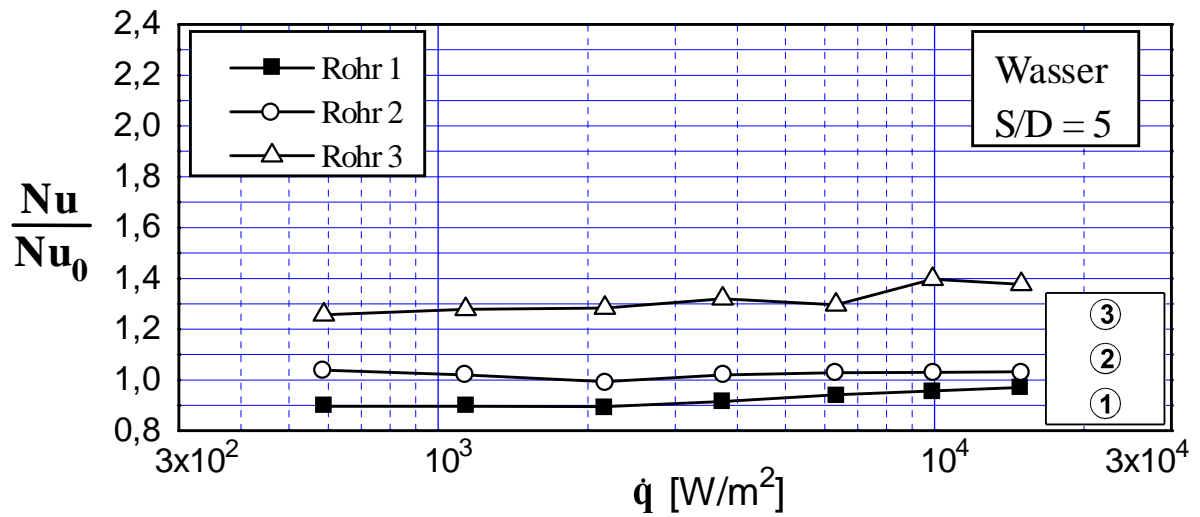
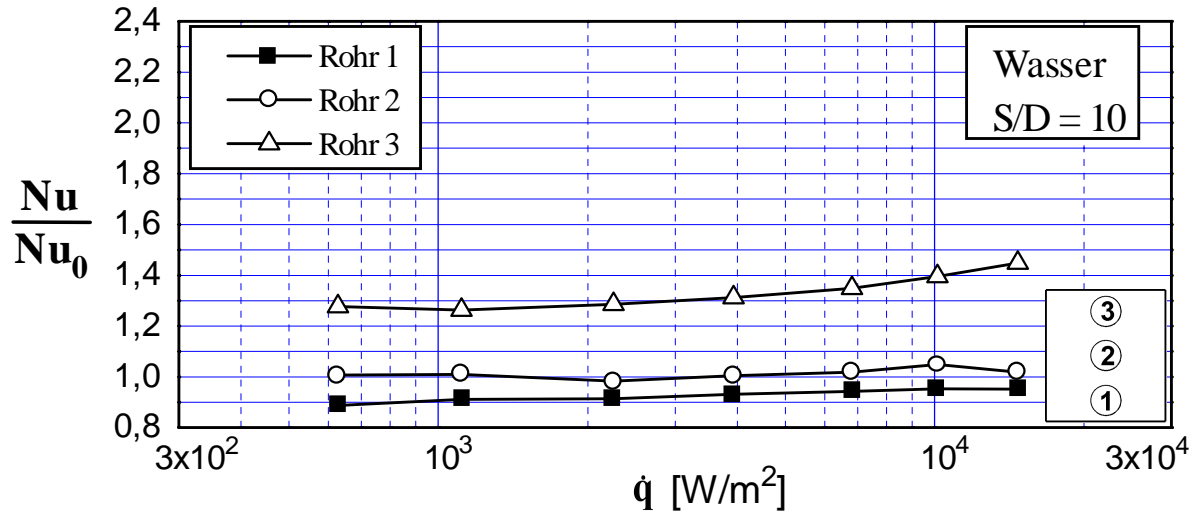


Bild 7.5a: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 3 in Wasser bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

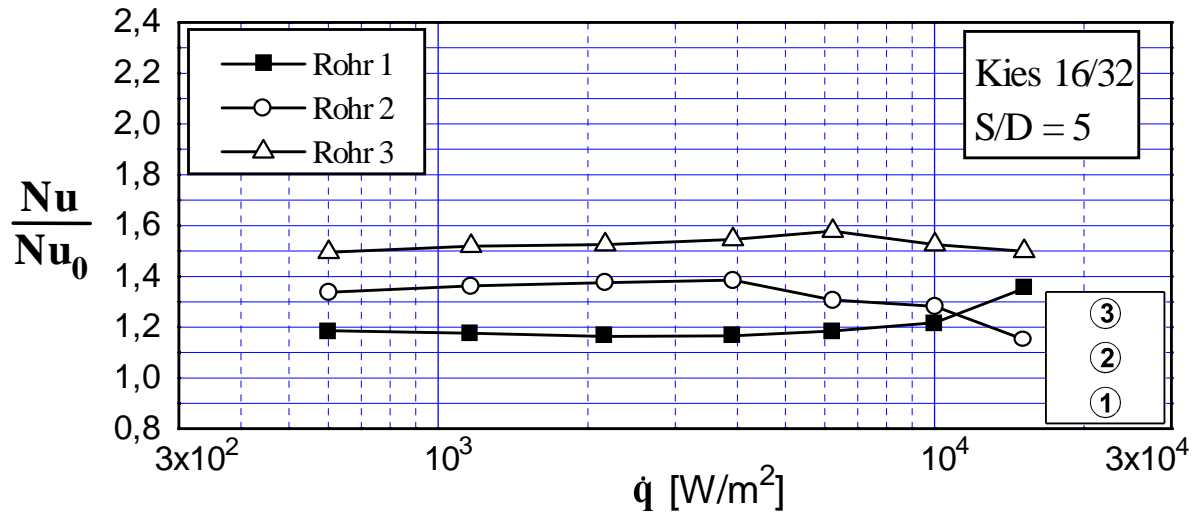
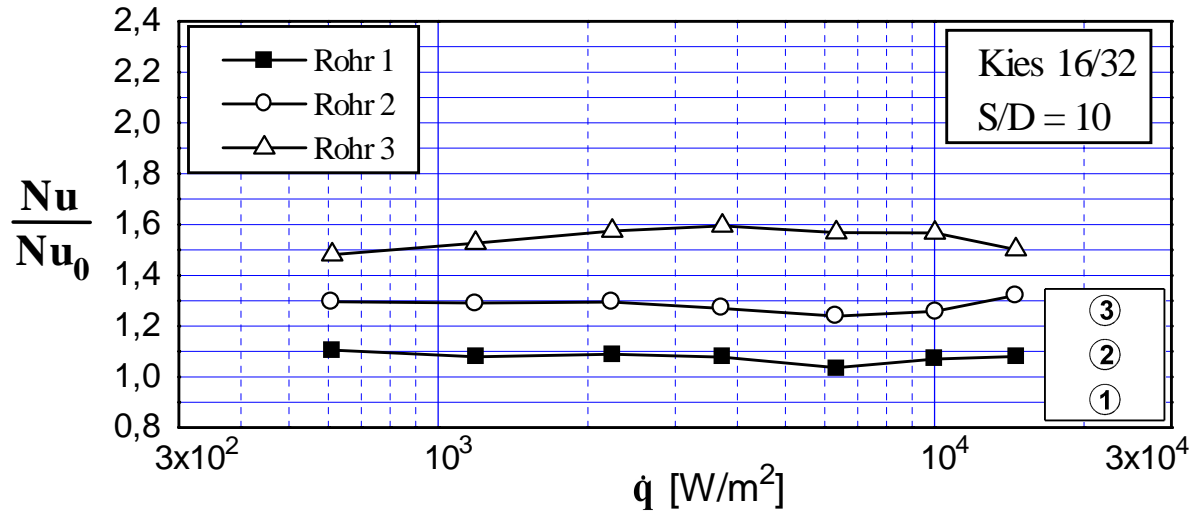


Bild 7.6a: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 16/32** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

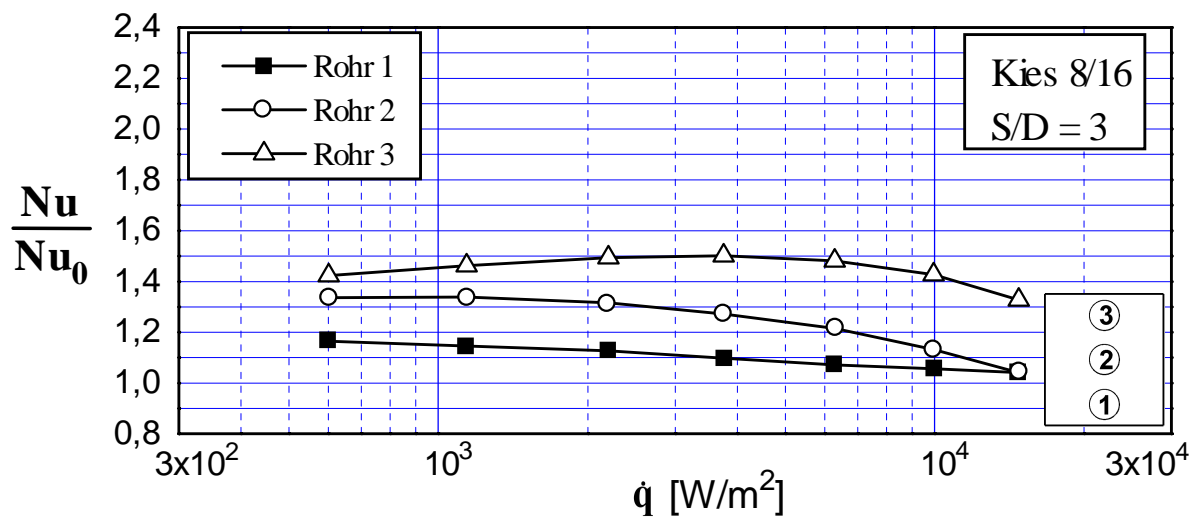
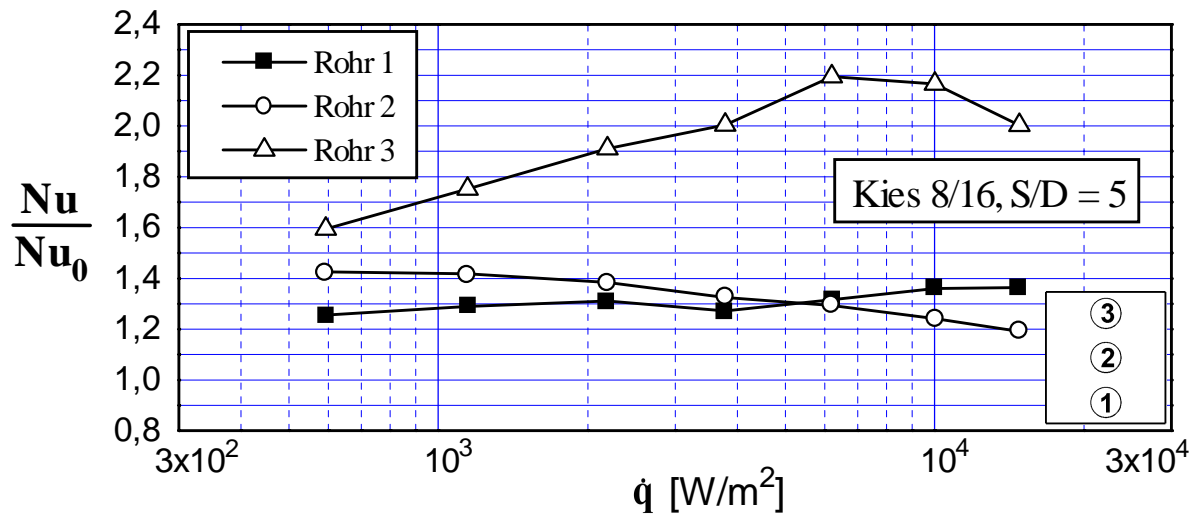
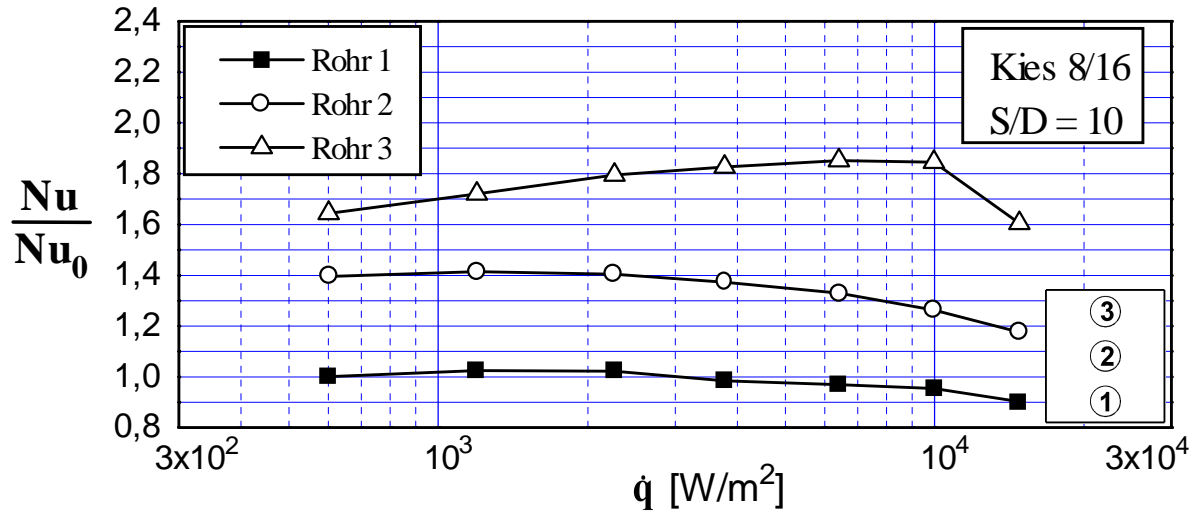


Bild 7.7a: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 8/16** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

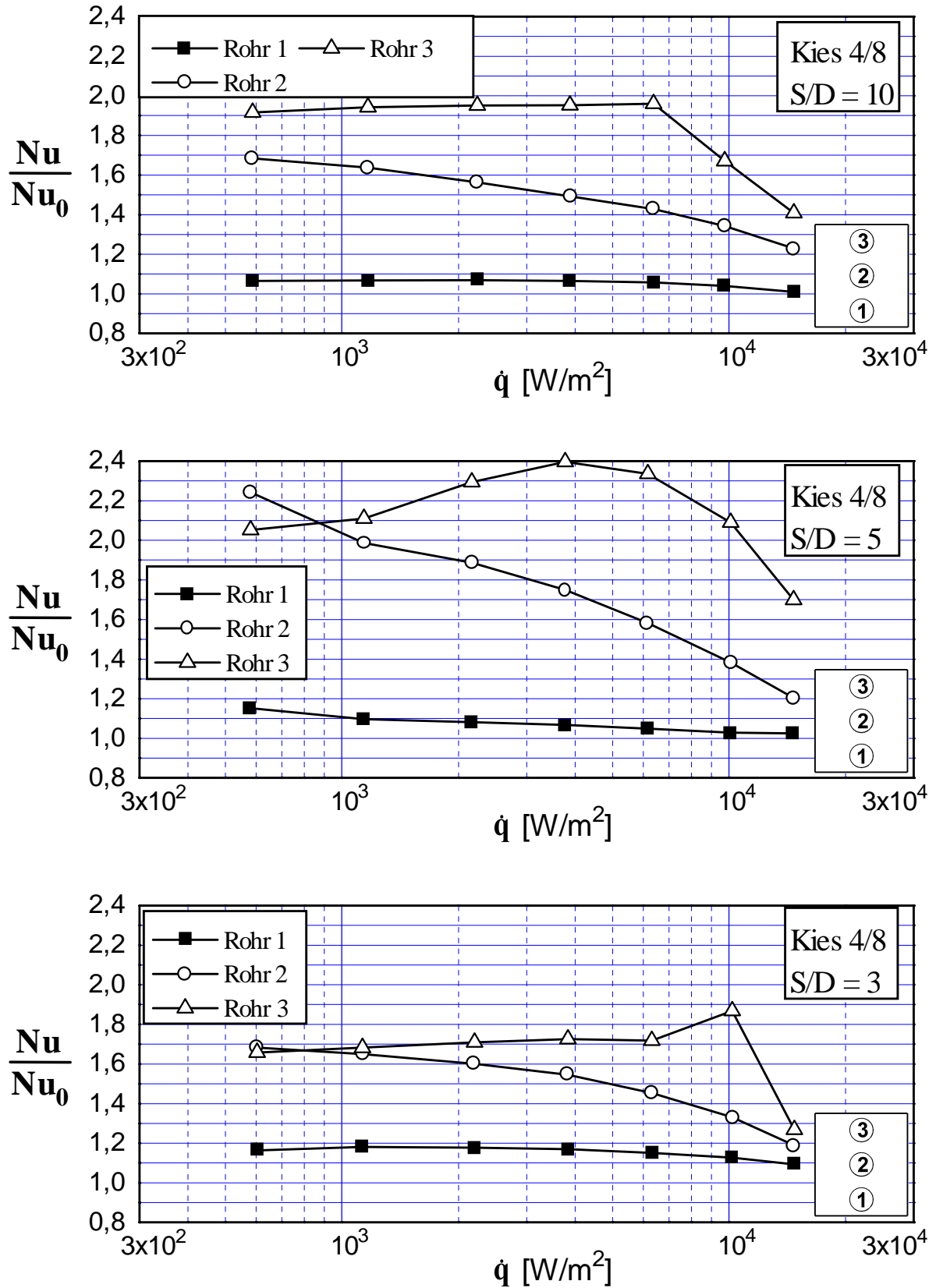


Bild 7.8a: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 4/8** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

7.4.1 Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des 3Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})

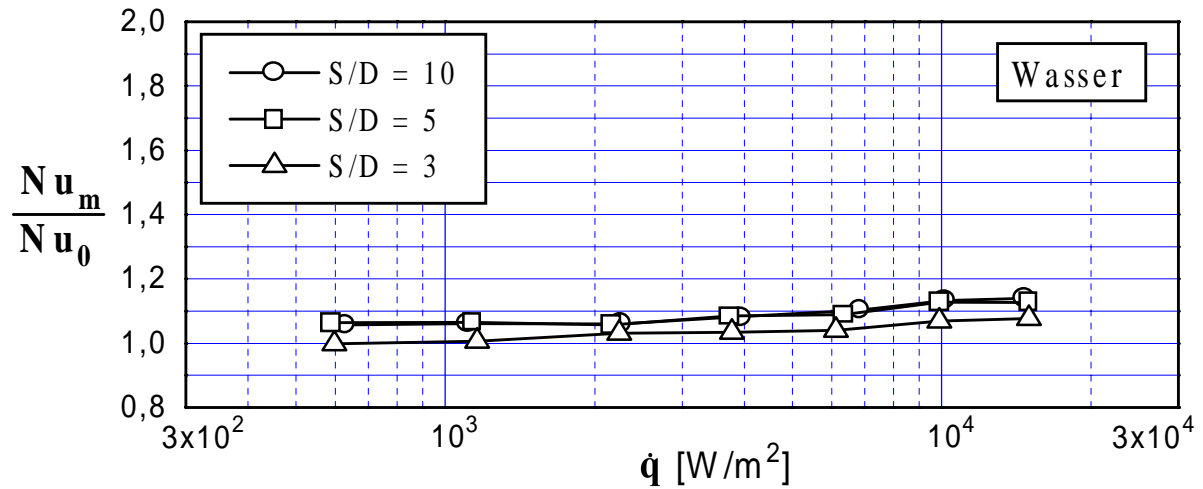


Bild 7.9a: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für Wasser

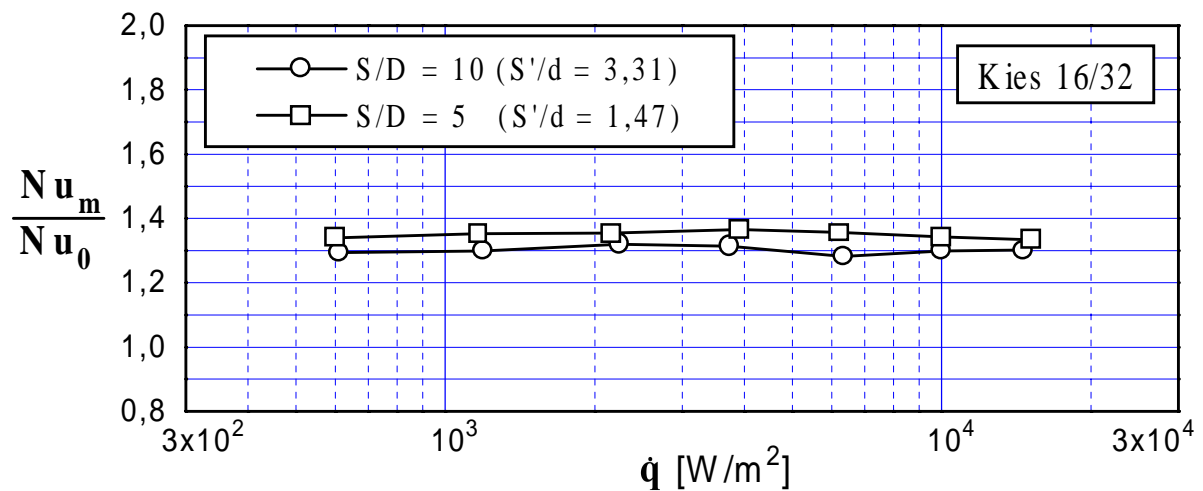


Bild 7.10a: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit Kies 16/32

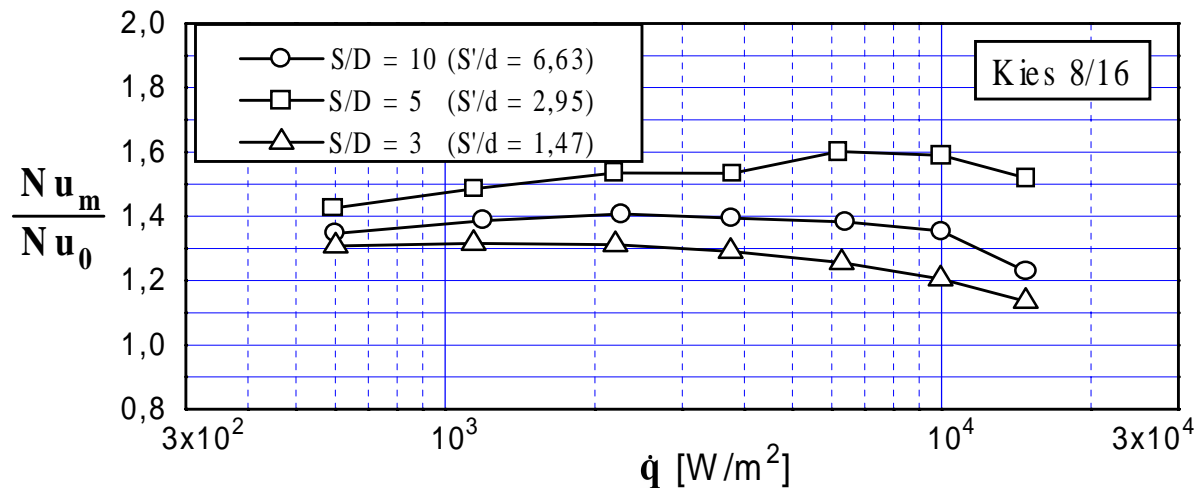


Bild 7.11a: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit Kies 8/16

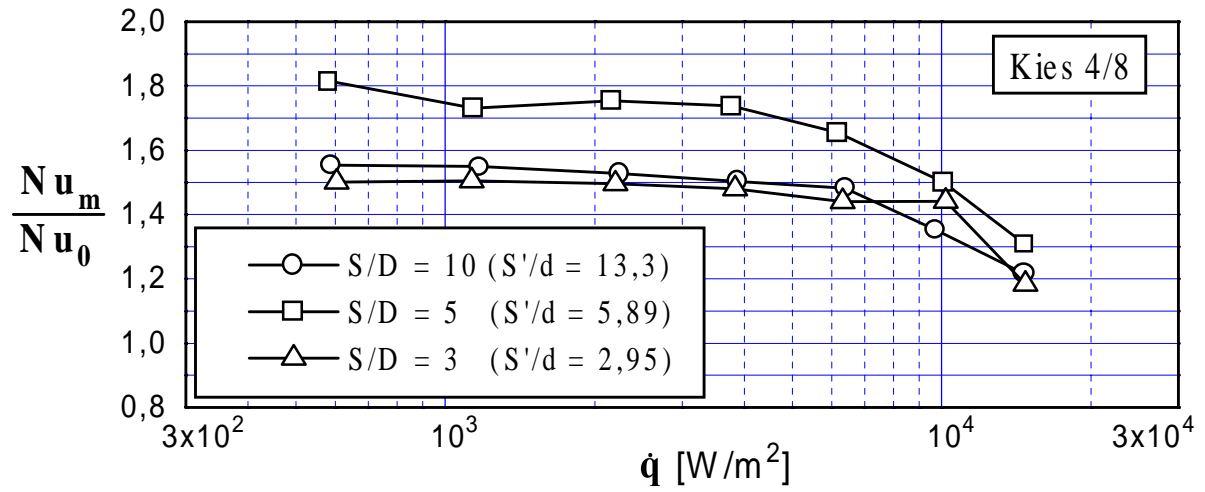


Bild 7.12a: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit **Kies 4/8**

7.4.2 Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des 3Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})

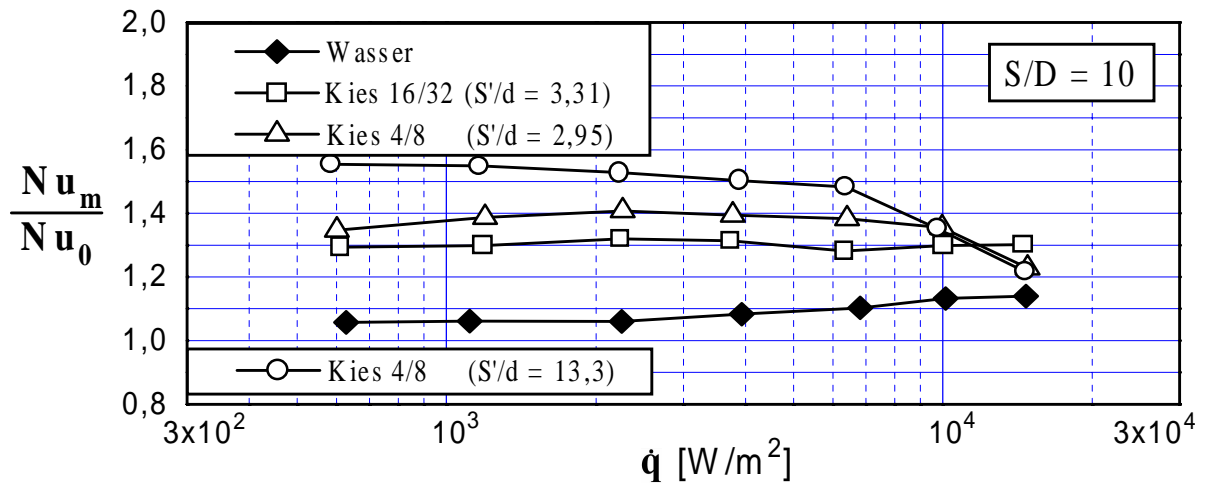


Bild 7.13a: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 10$

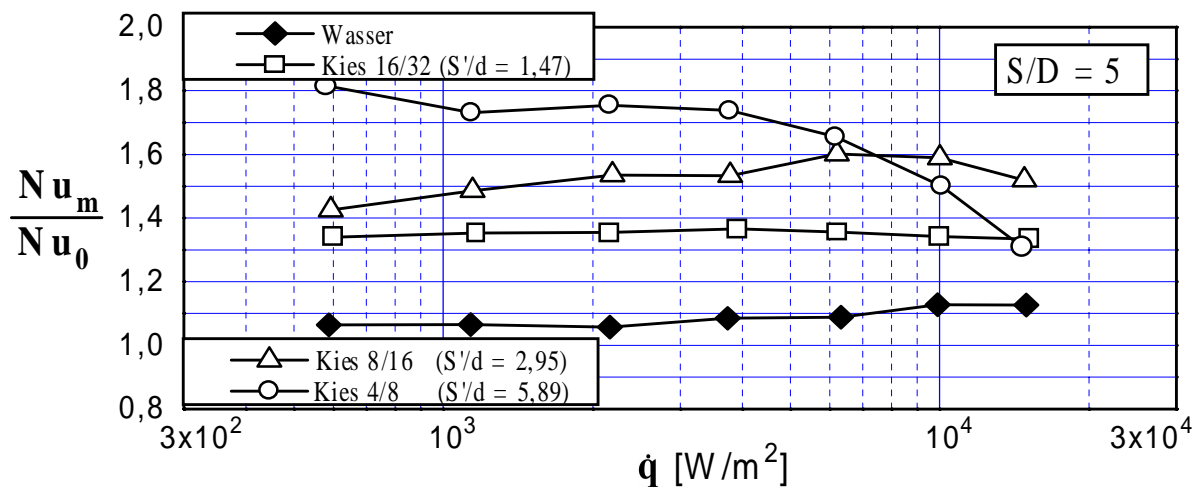


Bild 7.14a: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$

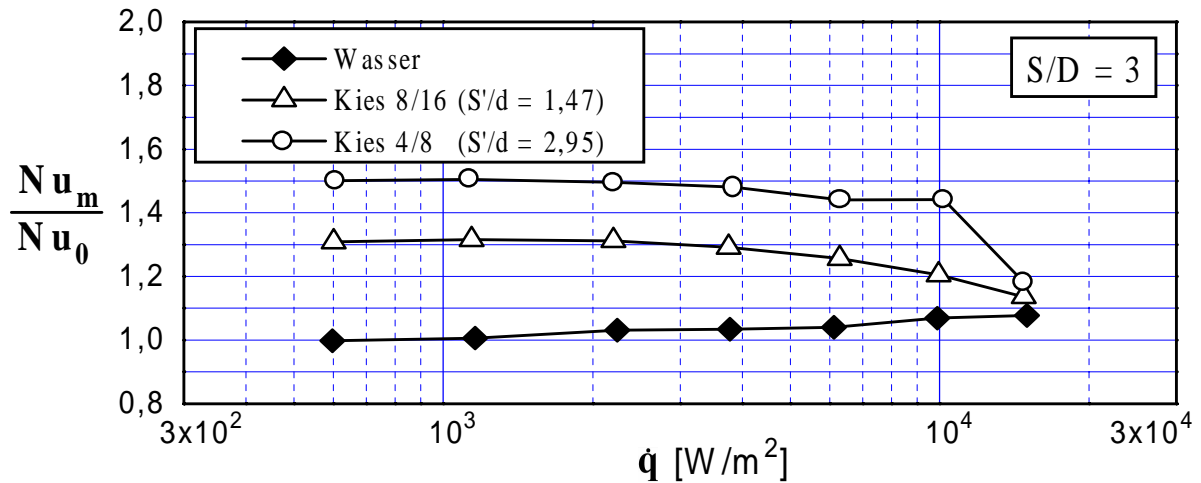


Bild 7.15a: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 3$

8 Ergebnisse der Versuche mit 7 Heizrohren

Bei den Versuchen mit 7 Heizrohren (siehe Bild 2.3c) wurde der Wärmeübergang an sieben versetzt angeordneten Rohren in der Kies/Wasser-Schüttung bzw. in Wasser gemessen. Die Wärmestromdichte \dot{q} , das Teilungsverhältnis S/D (10, 5 und 3) sowie das Schüttmedium wurden variiert. Für jede Versuchsreihe wurden sieben Messungen bei verschiedenen Wärmestromdichten vorgenommen. Die Wärmestromdichte \dot{q} variiert zwischen 570 und 15370 W/m², die entsprechende Rayleigh-Zahl Ra_{Fl} liegt zwischen $1,41 \cdot 10^4$ und $6,34 \cdot 10^5$. Die Meßergebnisse sind in Tabelle A.4, im Anhang A zusammengestellt. Wegen der symmetrischen Anordnung der Rohre werden in Abs. 8.1 und 8.2 nur die Werte für die Rohre 1 bis 5 betrachtet (siehe Bild 2.3c). Dabei wurden die Werte für das Rohr 4 bzw. das Rohr 5 als Mittelwert aus den Meßwerten der Rohre 4 und 6 bzw. der Rohre 5 und 7 gebildet.

Die Wärmeübergänge an den 7 und den 3 Heizrohren unterscheiden sich darin, daß die seitlich liegenden Rohre (Rohr 4 bis 7) bei Beheizung über alle 7 Rohre zu einer höheren Umgebungstemperatur in der Nähe der Rohre 1 bis 3 führen, was zu einer Verschlechterung des Wärmeübergangs an den Rohren führt. Sonst verhalten sich die beiden Anordnungen im Prinzip sehr ähnlich.

Die Ergebnisse werden auch hier entsprechend den Bemerkungen in Kapitel 2.4 sowohl mit Bezug auf ϑ_∞ als auch mit Bezug auf ϑ_{zui} angegeben.

8.1 Wandtemperatur der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_∞)

In Bild 8.1 bis Bild 8.4 sind die dimensionslosen Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in Wasser sowie in geflutetem Kies 16/32, Kies 8/16 und Kies 4/8 jeweils für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 bei verschiedenen Wärmestromdichten dargestellt. Dabei wird die dimensionslose Temperatur wie folgt definiert:

$$\Theta_i = \frac{\vartheta_{wi} - \vartheta_\infty}{\vartheta_{w1} - \vartheta_\infty} \quad (8.1)$$

mit $i = 1$ bis 3 , für Rohr 1 bis 3. ϑ_∞ wurde 1 cm über der Bodenplatte gemessen.

Um für die praktische Anwendung die Rohrwandtemperatur aus den folgenden Diagrammen zu bestimmen, muß nur die Wandtemperatur des untersten Rohres (ϑ_{w1}) und die Temperatur der umgebenden Flüssigkeit (ϑ_∞) gemessen werden.

Im Vergleich zu den Temperaturverläufen bei 3 Heizrohren in Wasser (siehe Bild 7.1) zeigt Bild 8.1 (Medium Wasser) den Verlauf bei 7 Heizrohren. Es ist kaum ein Unterschied festzustellen.

In Bild 8.1 ist zu sehen, daß die Temperaturverläufe in Wasser für alle drei Teilungsverhältnisse S/D ähnlich sind. Das Rohr 2 hat eine höhere Temperatur als das Rohr 1, da sich die Temperatur des Rohres 2 durch das warme anströmende Wasser vom Rohr 1 und den Sog des höherliegenden Rohres 3 erhöht. Bei $S/D = 3$ zeigen die dimensionslosen Temperaturen des Rohres 2 niedrige Werte als bei $S/D = 5$ und 10. Dies trifft nicht für die Messungen aus der Literatur (siehe Bild 3.2 und 3.4) an Luft und 3 Rohren zu. Der Grund liegt wohl darin, daß bei 7 Rohren die seitlich liegenden Rohre zur Beschleunigung der Strömung beitragen. Dies führt zu einer Verbesserung des Wärmeübergangs und damit zu einer niedrigeren Temperatur. Gegenüber der Temperatur des Rohres 2 sinkt diejenige des Rohres 3 deutlich, da sich oberhalb des Rohres 3 statt eines warmen Rohres das kühlere Medium befindet. Wie in Abschnitt 3.2 erwähnt, kann dies auch durch Entstehung der Turbulenz verursacht werden.

In Abschnitt 3.2 wurde eine ständige Erhöhung des Temperaturverlaufs vom Rohr 1 bis 3 bei kleinem Teilungsverhältnis beschrieben. Ab einer gewissen Höhe der Grashof-Zahl Gr_x ($6,7 \cdot 10^5$ bis $8 \cdot 10^6$) tritt ein Temperaturabfall des obersten Rohres auf (siehe Abs. 3.2). Bei den durchgeführten Messungen in Wasser, tritt ein solcher Temperaturabfall selbst beim kleinsten Teilungsverhältnis $S/D = 3$ (bei $x = 2S$) mit der Wärmestromdichte $\dot{q} = 577 \text{ W/m}^2$ auf. Hierfür ergibt sich die Grashof-Zahl Gr_x :

$$Gr_x = (2S/D)^3 \cdot Gr_{Fl} = 6^3 \cdot 2,639 \cdot 10^3 = 5,7 \cdot 10^5 \quad (8.2)$$

Obwohl dieser Wert noch nicht den Wert für einen Temperaturabfall erreicht, ist die Temperatur des Rohres 3 schon kleiner als diejenige des Rohres 2. Dies deutet darauf hin, daß neben dem Effekt der erzwungenen Strömung bzw. der turbulenten Strömung auch die kühlere Zone zwischen Rohr 3 und Kühlplatte einen Einfluß auf den Wärmeübergang hat.

Bei Messungen in einer Kies/Wasser-Schüttung ändert sich der Temperaturverlauf der Rohre wesentlich. In Bild 8.2 für Kies 16/32 mit $S/D = 10$ zeigt sich eine ständige Erhöhung der Temperatur von Rohr 1 bis 3 und die dimensionslosen Temperaturen der Rohre 2 und 3 sind höher als die in reinem Wasser (siehe Bild 8.1, $S/D = 10$). Hier ist die Anströmtemperatur der entscheidende Faktor. Die Strömungsgeschwindigkeit wird durch die höherliegenden Kiespartikel gebremst, die Wärme wird langsamer abgeführt und das Temperaturniveau in der Umgebung des Rohres steigt an bis Erreichung eines stationären Zustands. Mit kleinerem Teilungsverhältnis $S/D = 5$ erhöht sich die dimensionslose Temperatur Θ_2 im Vergleich zu der für $S/D = 10$, da die Anströmtemperatur aufgrund des kleineren Rohrabstands steigt.

Die dimensionslose Temperatur Θ_3 steigt bei niedrigeren Wärmestromdichten gegenüber Θ_2 weiter an, bei höheren Wärmestromdichten $\dot{q} > 6335 \text{ W/m}^2$ aber sinkt Θ_3 gegenüber Θ_2 . Dies läßt sich durch die erhöhte Anströmgeschwindigkeit des Rohres 3 erklären.

Der Einfluß der Strömungsform auf die Temperaturen der Rohre ist sehr komplex und bedarf eingehenderer Untersuchungen.

Bild 8.3 (für Kies 8/16) und Bild 8.4 (für Kies 4/8) zeigen ähnliche Verläufe wie in Bild 8.2 (für Kies 16/32) gezeigt. Wenn man die Werte für die niedrigste Wärmestromdichte $\dot{q} \approx 600 \text{ W/m}^2$ betrachtet, die im Bereich der Darcy-Strömung liegen, weisen die Rohrtemperaturen eine ständige Erhöhung von dem untersten Rohr 1 bis zum obersten Rohr 3 auf. Sowohl mit kleiner werdender Kies Korngröße als auch mit kleiner werdendem Teilungsverhältnis nimmt die dimensionslose Temperatur Θ_2 bzw. Θ_3 zu. Dies läßt sich auf die erhöhte Temperatur des anströmenden Mediums zurückführen.

Mit steigender Wärmestromdichte nimmt Θ_3 gegenüber Θ_2 ab. Dies ist für $S/D = 5$ (für alle drei Kieszusammensetzungen) besonders deutlich und läßt sich durch die erhöhte Anströmgeschwindigkeit erklären, während bei zu kleinem Teilungsverhältnis $S/D = 3$ die Änderung der dimensionslosen Temperatur Θ_3 gegenüber Θ_2 weniger stark ausgeprägt ist, da in diesem Fall die Anströmtemperatur aufgrund des kleinen Rohrabstands eine wichtigere Rolle als die Anströmgeschwindigkeit spielt. Dies wird noch deutlicher für Kies 4/8 bei $S/D = 3$ (Bild 8.4). Dabei wird die Anströmgeschwindigkeit durch die kleinen Kiespartikel erheblich gesenkt, deshalb zeigt sich auch bei höheren Wärmestromdichten eine ständige Erhöhung der Temperatur vom Rohr 1 bis 3.

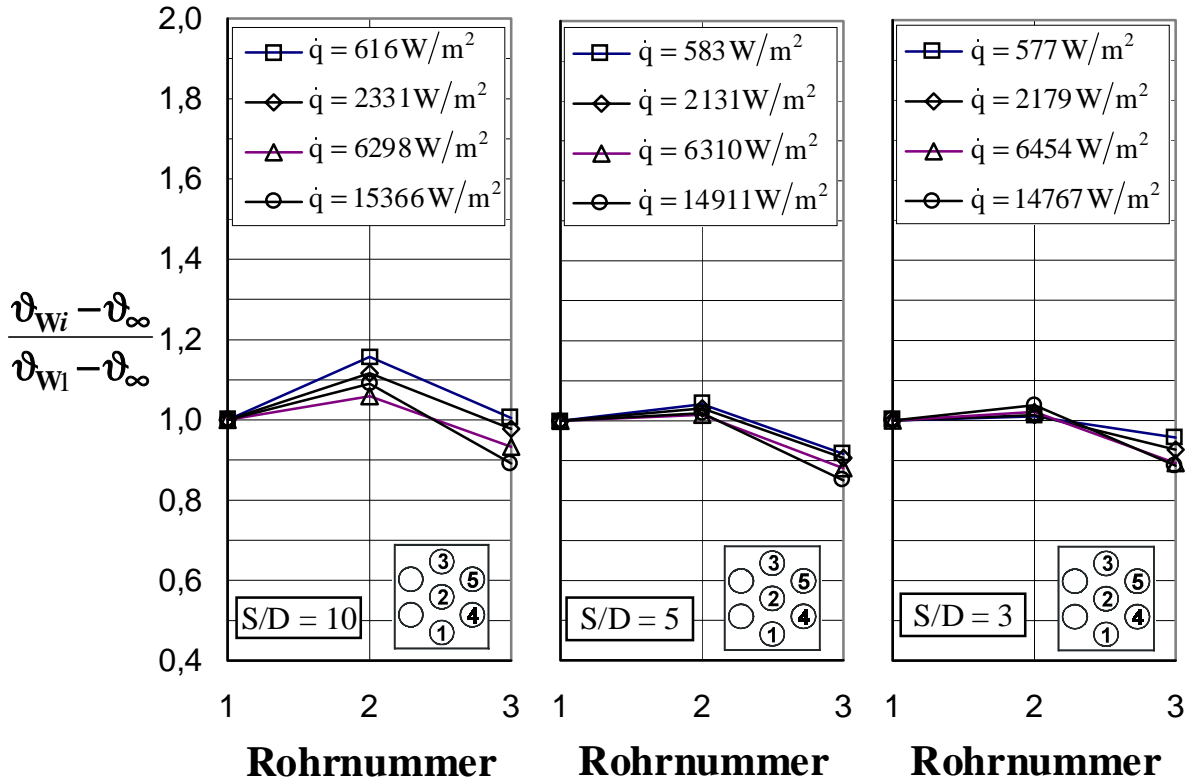


Bild 8.1: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in Wasser für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 ($\vartheta_{W1}, \vartheta_{\infty}$ siehe Anhang A, Tab. A4)

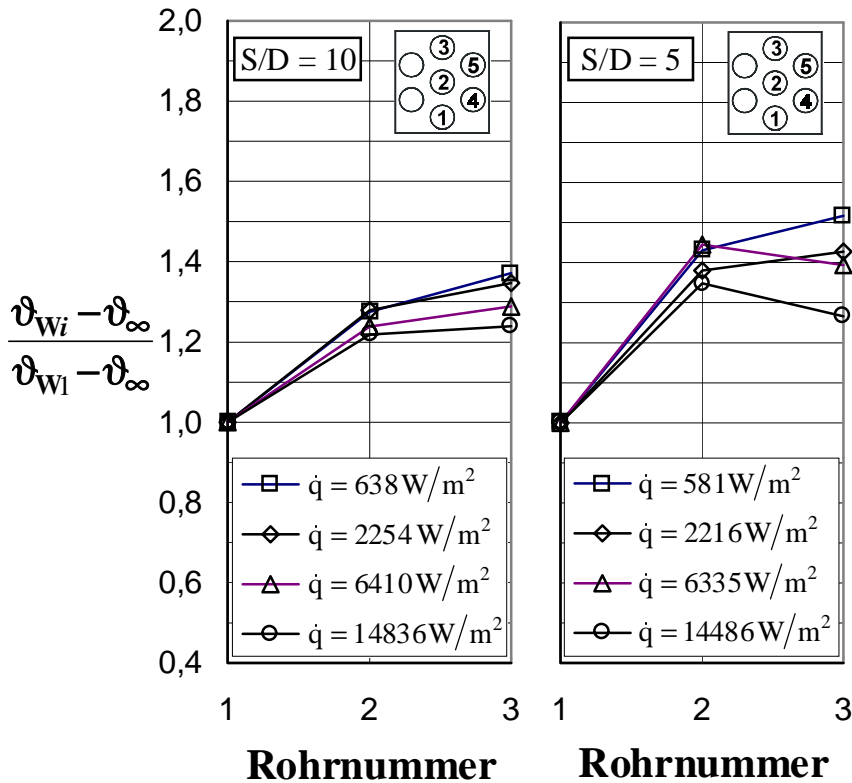


Bild 8.2: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit Kies 16/32 für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

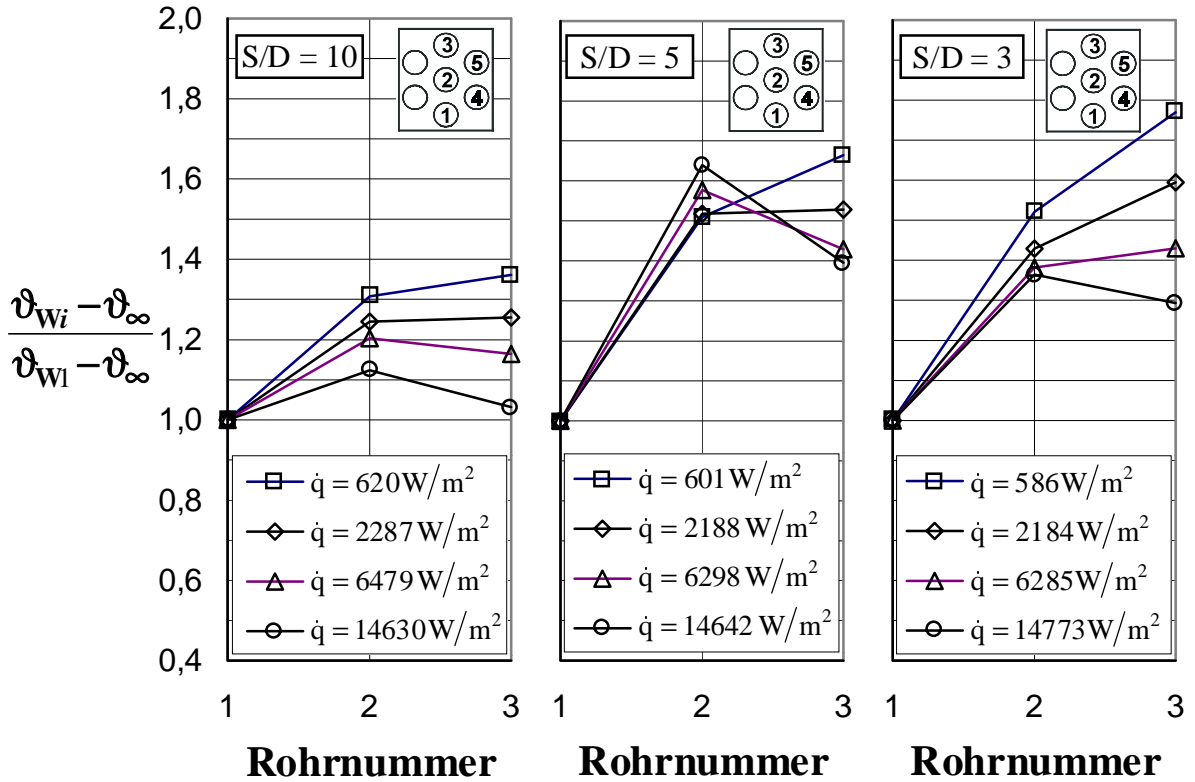


Bild 8.3: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 8/16** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

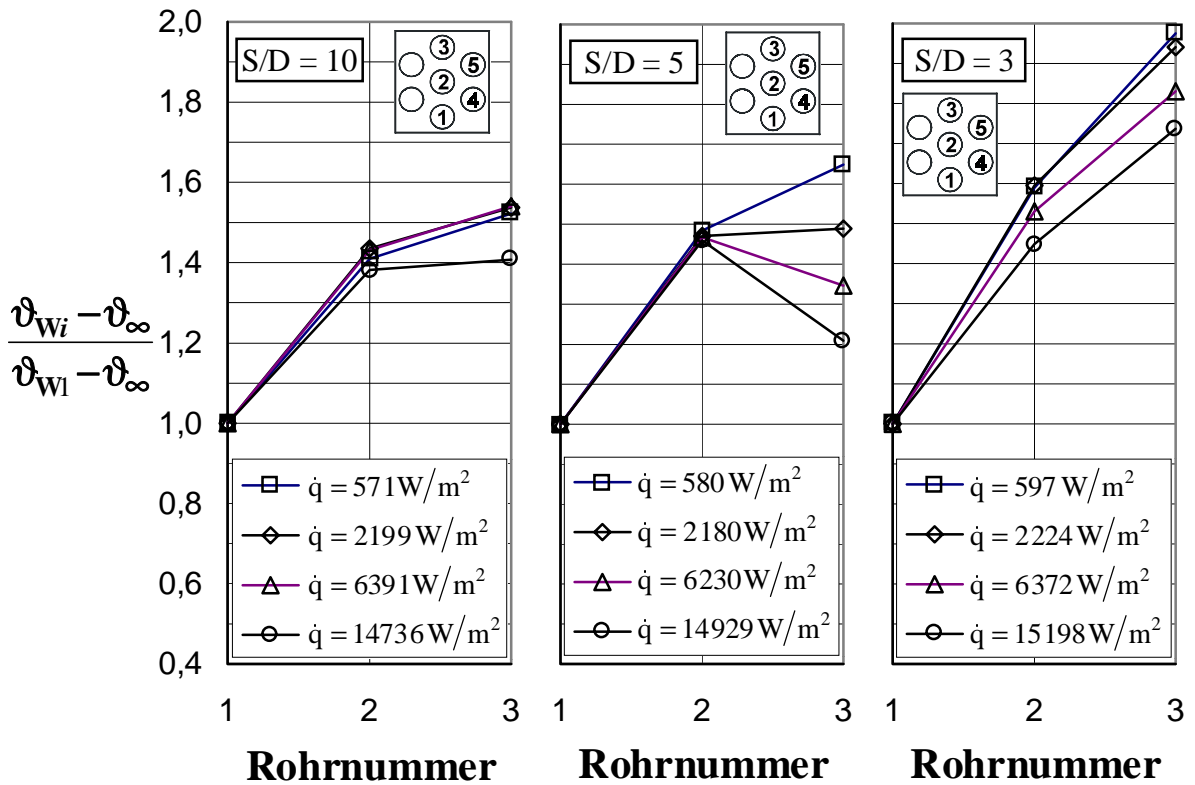


Bild 8.4: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 4/8** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

In Bild 8.5 bis 8.8 sind die dimensionslosen Temperaturen der Rohre 4 und 5 in den untersuchten Medien bei verschiedenen Wärmestromdichten dargestellt. Zur Verdeutlichung des Einflusses der Rohrtemperatur ϑ_{W4} auf die des Rohres 5 wird die auf die Temperaturdifferenz ($\vartheta_{W4} - \vartheta_{\infty}$) bezogene, dimensionslose Temperatur wie folgt definiert:

$$\Theta_i = \frac{\vartheta_{Wi} - \vartheta_{\infty}}{\vartheta_{W4} - \vartheta_{\infty}} \quad (8.3)$$

mit $i = 4$ und 5 , für Rohr 4 und 5.

In Bild 8.5 (Wasser als Medium) zeigen alle Temperaturen bei den drei Teilungsverhältnissen ähnliche Verläufe. Die dimensionslosen Temperaturen Θ_5 liegen sehr eng zusammen und sind kleiner als $\Theta_4 = 1$. Da in manchen Fällen (bei $S/D = 3$ bzw. 5 , mit kleinerer Wärmestromdichte) die Grashof-Zahl Gr_x bei $x = S$ (an der Stelle des Rohres 5) noch nicht den Wert ($Gr_x = 6,7 \cdot 10^5$ bis $8 \cdot 10^6$) für einen Temperaturabfall erreicht hat, läßt sich dies wie für Rohr 3 durch die kühlere Zone oberhalb des Rohres 5 erklären.

In der Kies/Wasser-Schüttung sind die Temperaturverläufe anders. Zumeist ist Θ_5 größer als Θ_4 . Bei niedriger Wärmestromdichte $\dot{q} \approx 600 \text{ W/m}^2$ nimmt die dimensionslose Temperatur Θ_5 mit kleiner werdender Kies Korngröße und mit kleiner werdendem Teilungsverhältnis zu. Mit steigender Wärmestromdichte nimmt Θ_5 gegenüber Θ_4 ab. Dies läßt sich wiederum durch die erhöhte Anströmgeschwindigkeit wie für Θ_3 erklären.

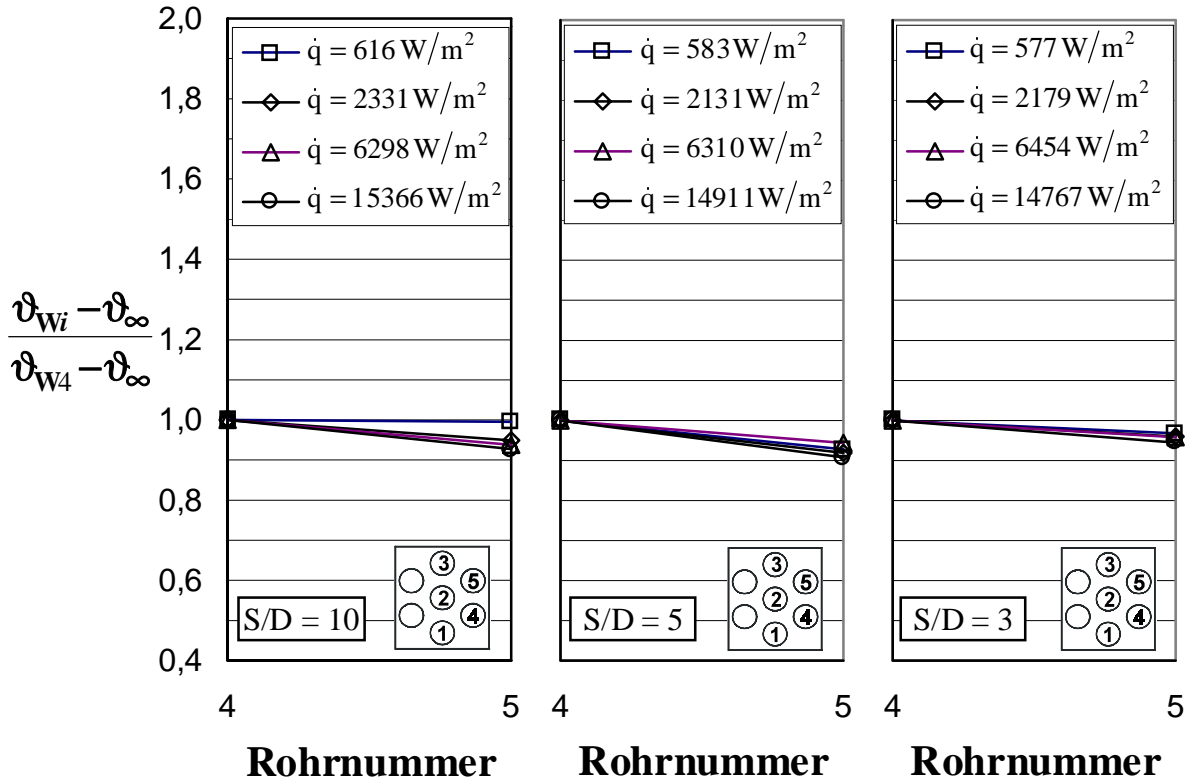


Bild 8.5: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 4 und 5 in Wasser für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

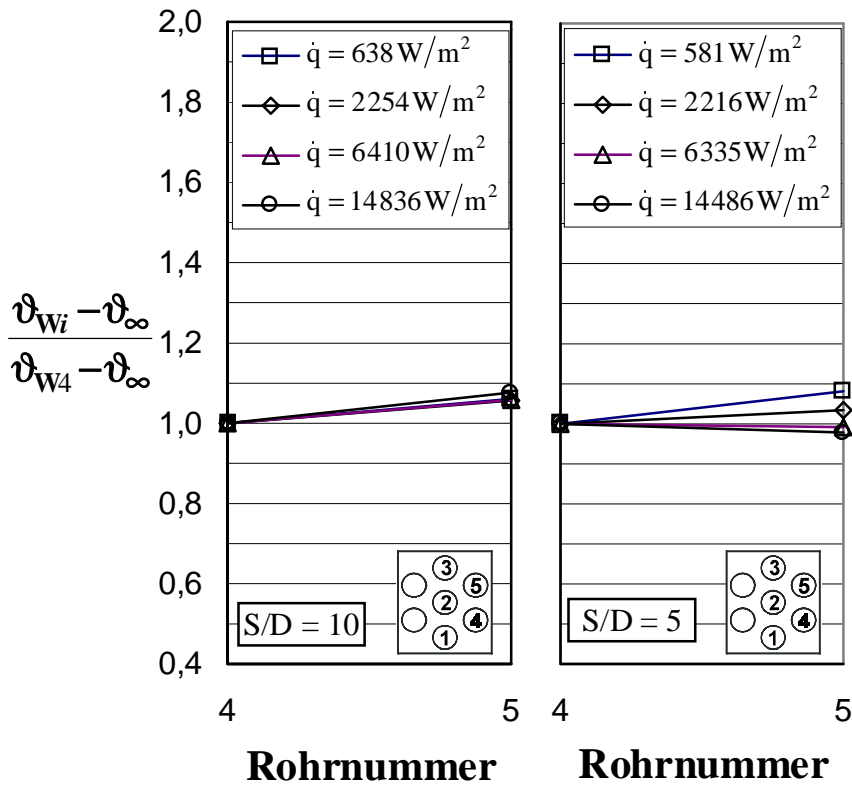


Bild 8.6: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 4 und 5 in der Schüttung mit **Kies 16/32** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

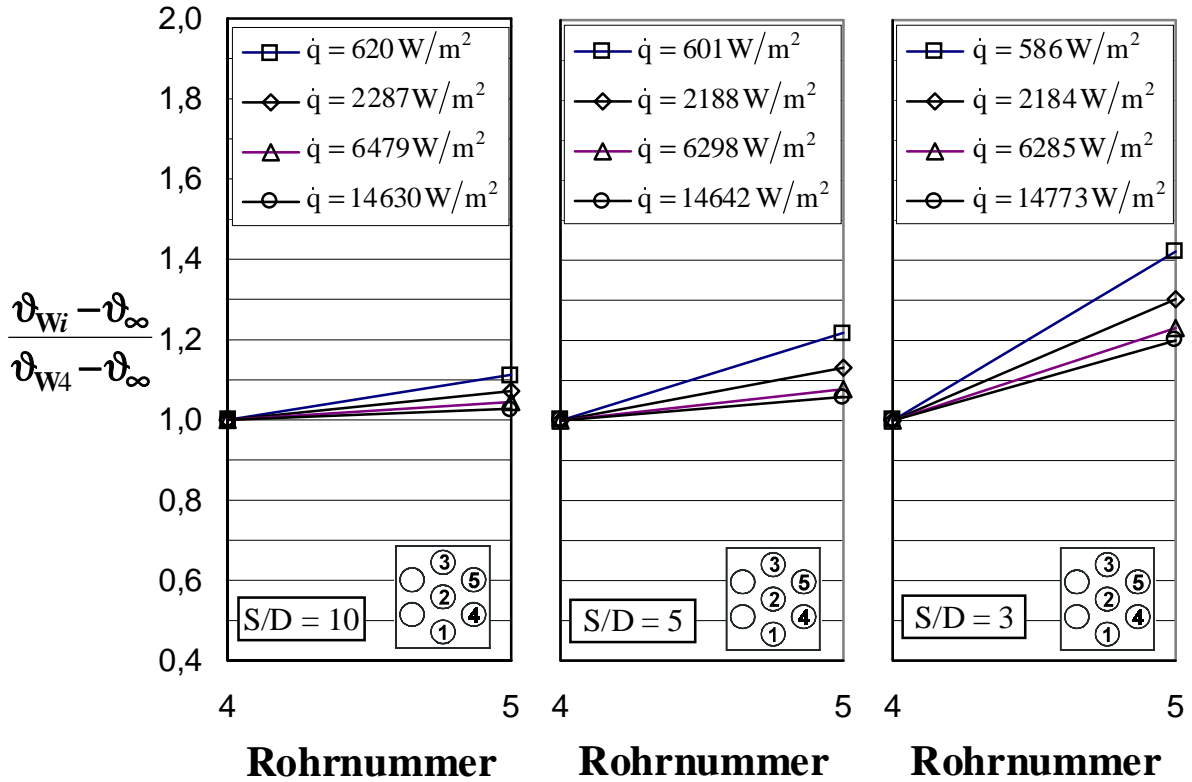


Bild 8.7: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 4 und 5 in der Schüttung mit **Kies 8/16** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

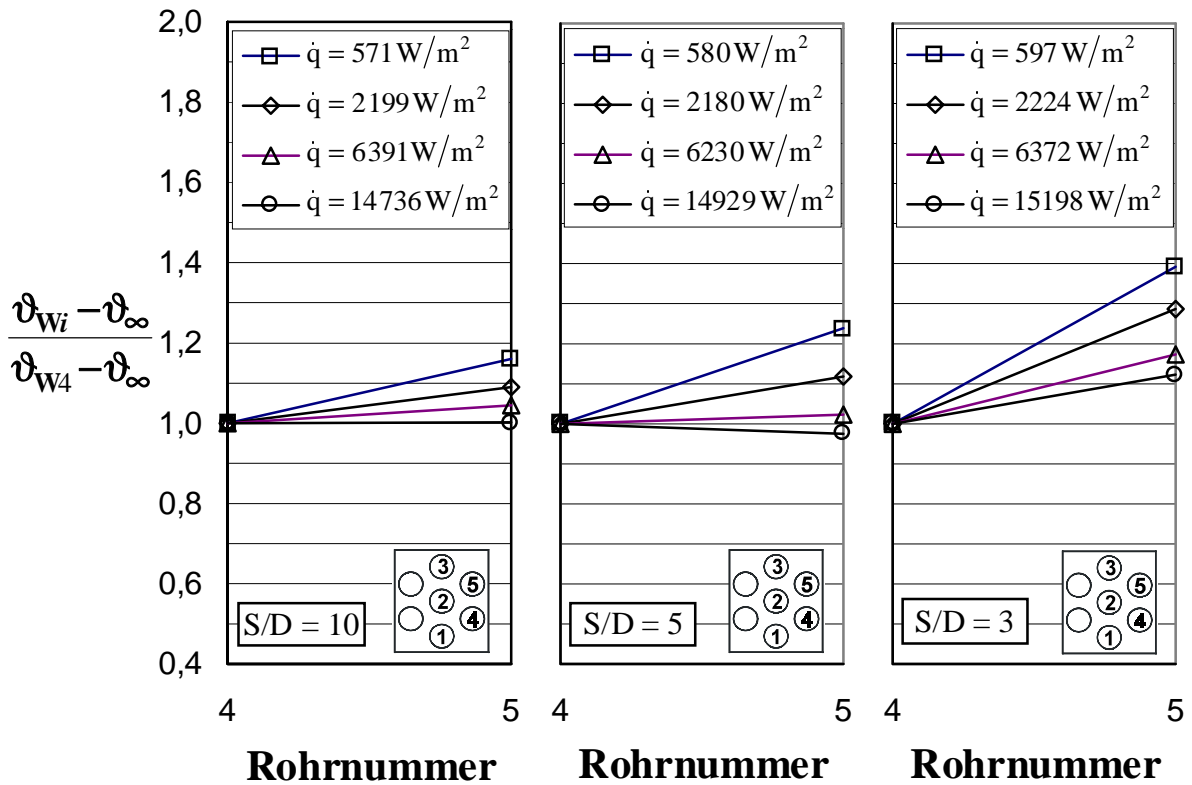


Bild 8.8: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 4 und 5 in der Schüttung mit **Kies 4/8** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

8.2 Wandtemperatur der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})

Wie in Kapitel 2.4 dargelegt, führt die Auftragung nach Gl. (8.1) mit ϑ_{∞} zu Verzerrungen, da die wirklichen physikalischen Gegebenheiten gegenüber den praktisch möglichen zurückgestellt sind. Eine Auftragung mit ϑ_{zui} nach Gl. (8.1a):

$$\Theta_{zui} = \frac{\vartheta_{wi} - \vartheta_{zui}}{\vartheta_{w1} - \vartheta_{\infty}} \quad (8.1a)$$

liefert die im folgenden aufgeführten Diagramme (Bild 8.1a bis Bild 8.8a).

Da in Gl. (8.1a) der Zähler für $i > 1$ stets kleiner ist als in Gl. (8.1), liegen die entsprechenden dimensionslosen Temperaturen stets tiefer.

In Wasser (Bild. 8.1a) zeigt sich außer bei $S/D = 10$, $\dot{q} = 616 \text{ W/m}^2$ eine ständige Verringerung der dimensionslosen Temperatur Θ_{zui} von Rohr 1 bis 3 ($\Theta_{zu1} > \Theta_{zu2} > \Theta_{zu3}$). In der Schüttung (Bild 8.2a bis 8.4a) nimmt die dimensionslose Temperatur Θ_{zui} vom Rohr 1 bis Rohr 2 bei manchen Messungen zu (insbesondere bei $S/D = 5$ und 3), und dann vom Rohr 2 bis Rohr 3 ab.

Vom Rohr 4 bis 5 nimmt die dimensionslose Temperatur Θ_{zui} zumeist ab. Eine Ausnahme stellen die Kurven für Kies 8/16 und 4/8 bei $S/D = 3$ bei der kleinsten Wärmestromdichte dar.

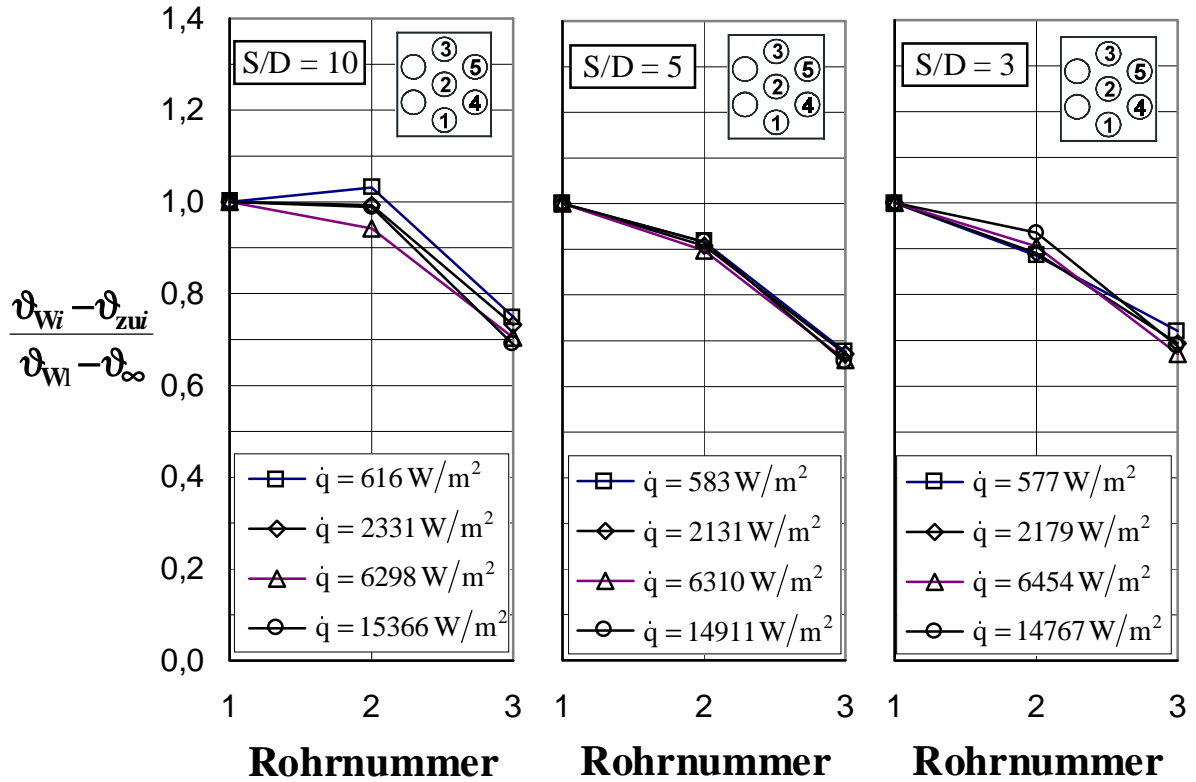


Bild 8.1a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in Wasser für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 (ϑ_{Wi} , ϑ_{∞} siehe Anhang A, Tab. A4)

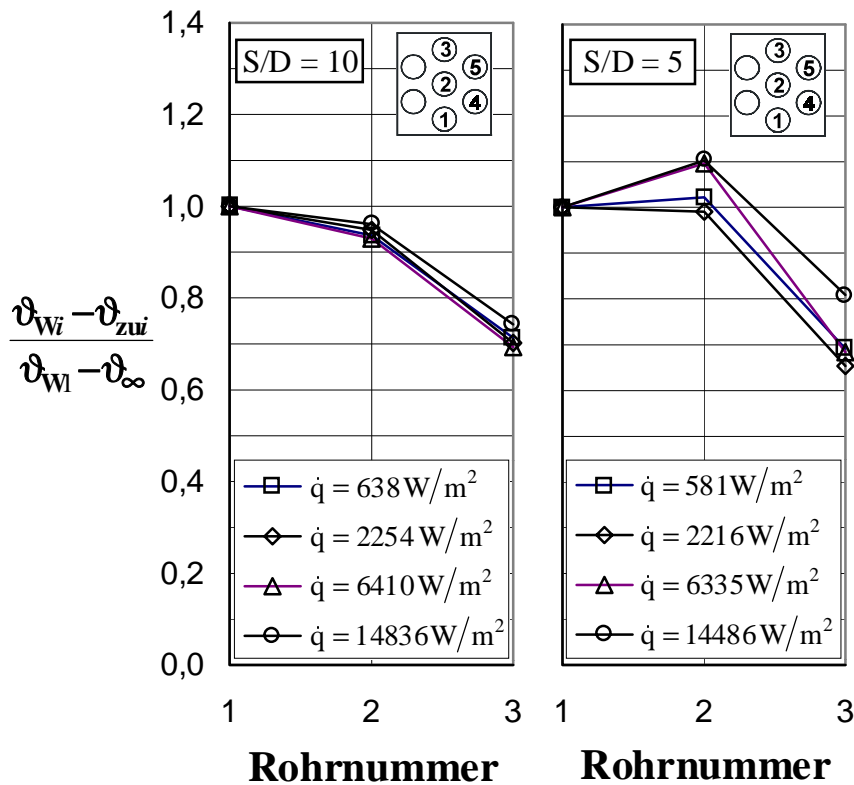


Bild 8.2a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit Kies 16/32 für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

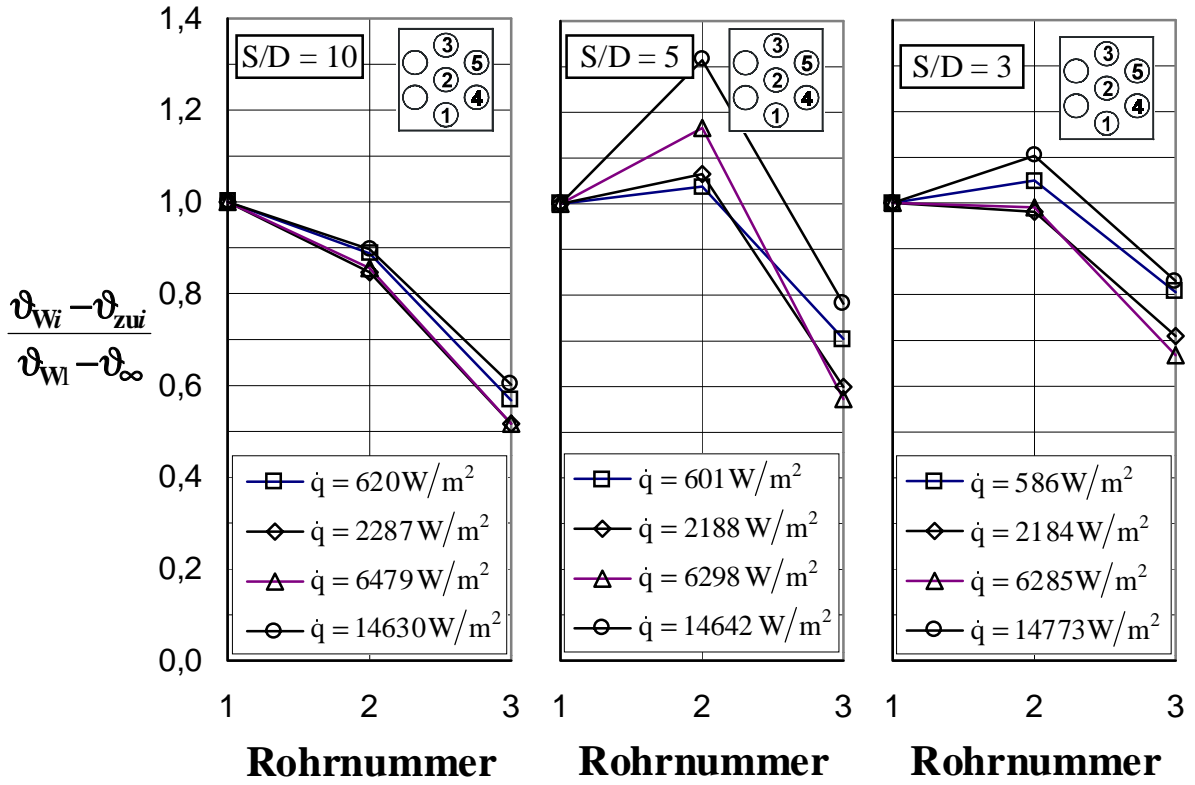


Bild 8.3a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 8/16** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

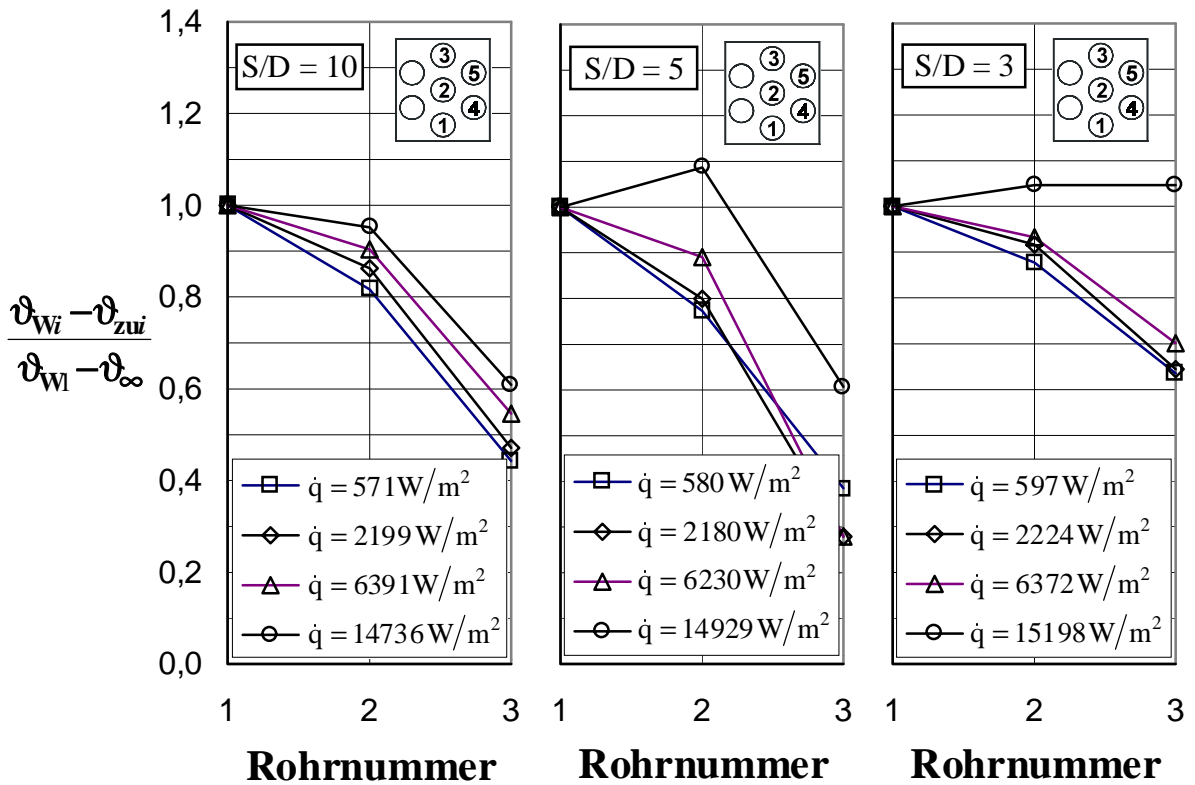


Bild 8.4a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 1 bis 3 in der Schüttung mit **Kies 4/8** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

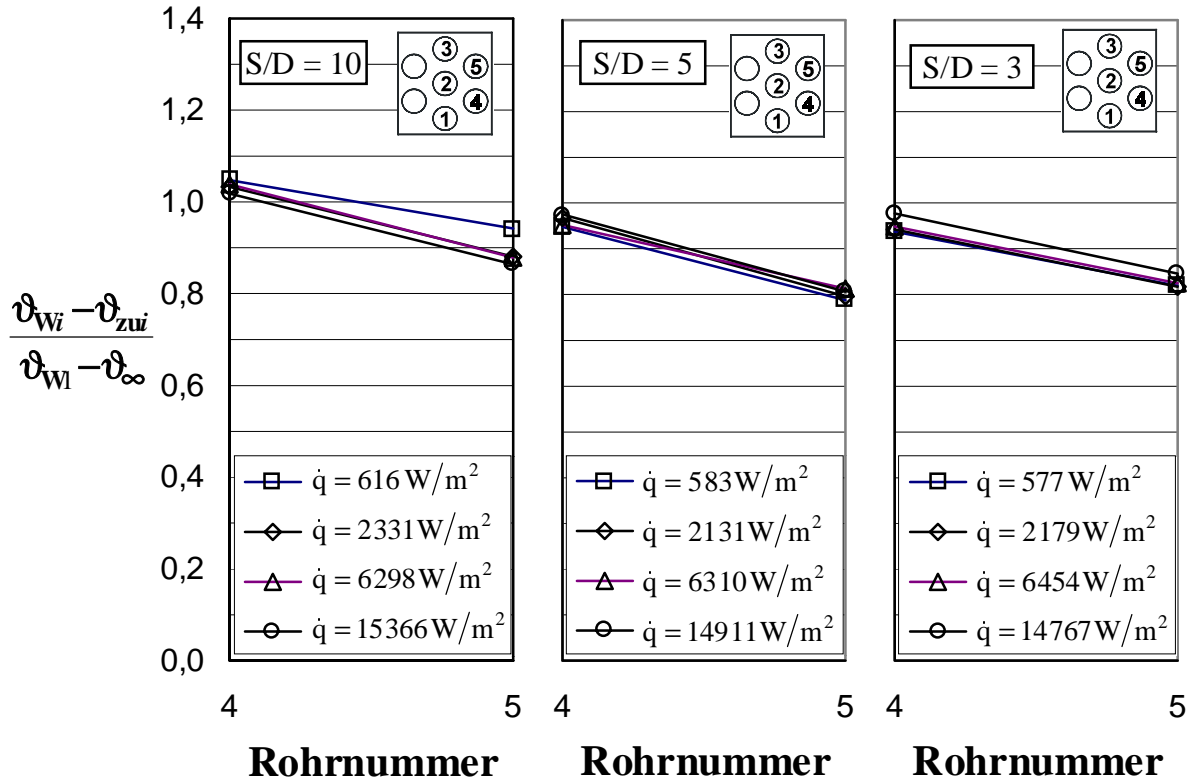


Bild 8.5a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 4 und 5 in Wasser für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

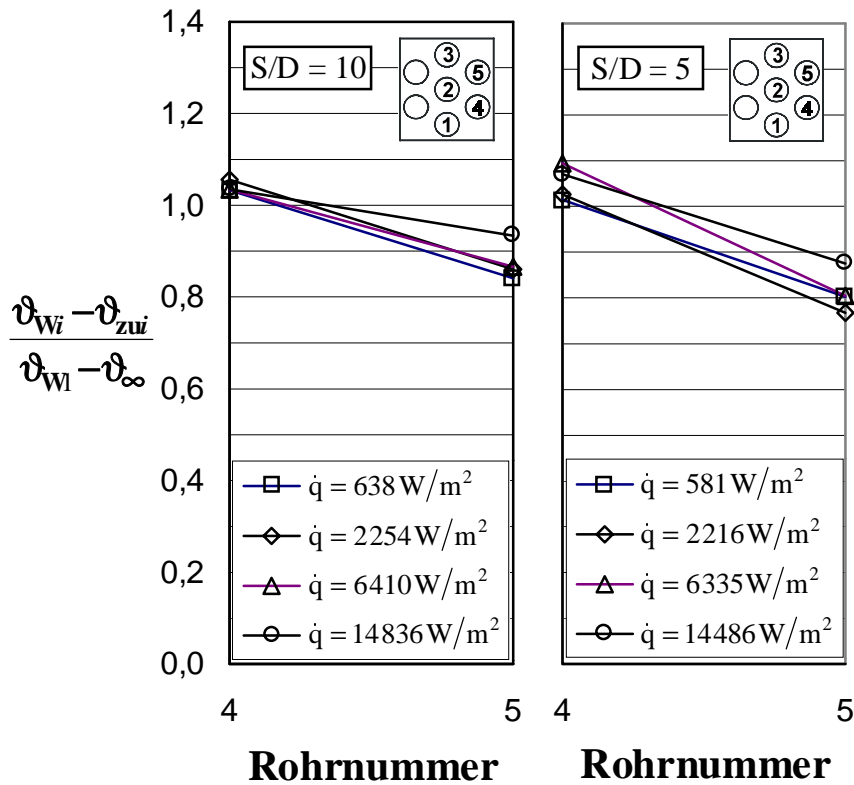


Bild 8.6a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 4 und 5 in der Schüttung mit **Kies 16/32** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

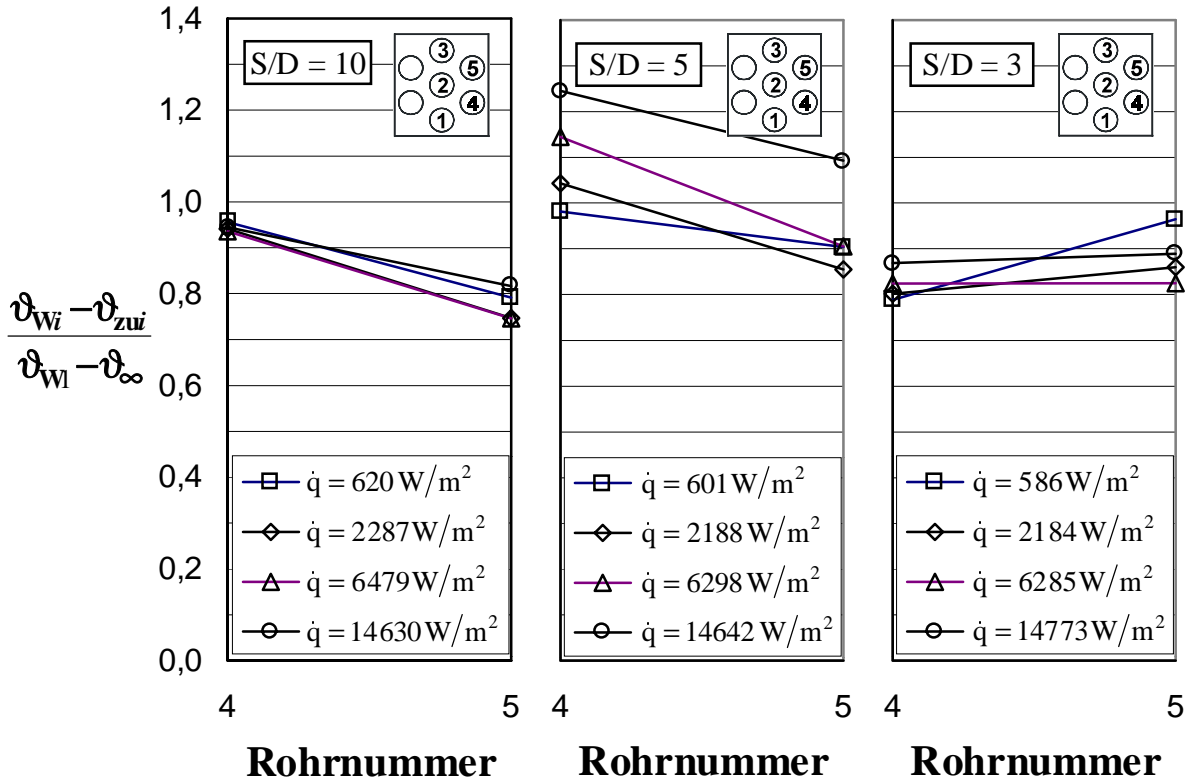


Bild 8.7a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 4 und 5 in der Schüttung mit **Kies 8/16** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

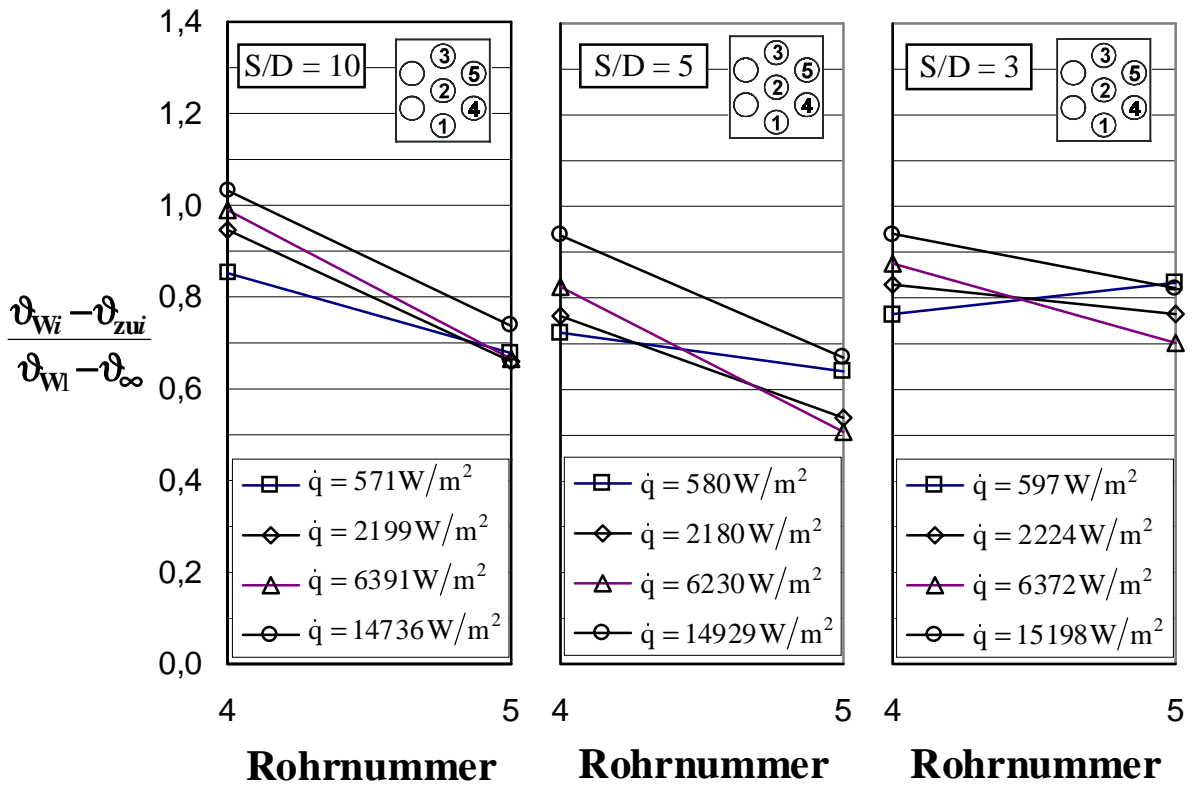


Bild 8.8a: Dimensionslose Temperaturen der Rohre 4 und 5 in der Schüttung mit **Kies 4/8** für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

8.3 Nusselt-Zahlen der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{∞})

In Bild 8.9 bis Bild 8.12 sind die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu bei jeweils derselben Wärmestromdichte für Wasser und verschiedene Kiesgrößen und Teilungsverhältnisse in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte dargestellt.

In Bild 8.9 (Wasser) zeigen die Kurven einen mit zunehmender Wärmestromdichte steigenden Verlauf für alle drei Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 . Die Kurven liegen in einem engen Bereich. Während bei niedriger Wärmestromdichte, $\dot{q} \approx 600 \text{ W/m}^2$, die Werte der normierten Nusselt-Zahl Nu/Nu_0 einen Unterschied von $\Delta(Nu/Nu_0) \approx 0,1$ zwischen den Rohren 1 bis 5 aufweisen, ergibt sich bei hoher Wärmestromdichte, $\dot{q} \approx 15000 \text{ W/m}^2$, ein Unterschied von $\Delta(Nu/Nu_0) \approx 0,2$. Für alle drei Teilungsverhältnisse weist das oberste Rohr 3 die größten Nusselt-Zahlen im Vergleich zu den anderen Rohren auf. Zumeist ergibt sich für alle Rohre eine kleinere Nusselt-Zahl als für das Einzelrohr ($Nu/Nu_0 < 1$). Erst bei höheren Wärmestromdichten $\dot{q} > 8000 \text{ W/m}^2$ für $S/D = 5$ liegen die Werte des Rohres 3 etwas über denen des Einzelrohres.

In reinem Wasser liegen die normierten Nusselt-Zahlen Nu/Nu_0 zwischen $0,69$ und $1,09$ (siehe Bild 8.9), während sich in der Kies/Wasser-Schüttung Werte zwischen $0,56$ und $1,41$ (siehe Bild 8.10 bis 8.12) für alle drei Kieszusammensetzungen und die drei Teilungsverhältnisse ergeben.

In Bild 8.10 für Kies 16/32 zeigen alle Kurven wie in Bild 8.9 (in Wasser) einen mit steigender Wärmestromdichte schwach ansteigenden Verlauf. Im Gegensatz zu den Kurven in Wasser weist statt des obersten Rohres 3 das unterste Rohr 1 die größten Nusselt-Zahlen, die meistens größer als der Wert eins sind, auf.

Der Kurvenverlauf der normierten Nusselt-Zahl für Kies 8/16 (siehe Bild 8.11) unterscheidet sich von dem für Kies 16/32. Das unterste Rohr 1 weist zwar die größten Werte auf (wie für Kies 16/32), jedoch liegen die Werte des Rohres 1 bei $S/D = 5$ zwischen $Nu/Nu_0 = 1,2$ und $1,4$. Im Vergleich zu den Werten für ein großes Teilungsverhältnis ($S/D = 10$) bzw. für ein kleines ($S/D = 3$) sind die Nusselt-Zahlen des untersten Rohres 1 für $S/D = 5$ deutlich höher. Dies läßt sich durch den Einsatz des Kiesel und das entsprechende Teilungsverhältnis begründen: Nach dem Einsatz des Kiesel verringert sich der Raum für das Wasser; dadurch wird die am Rohr 1 durch freie Konvektion verursachte Strömung, die gleichzeitig durch das Rohr 2 induziert wird, beschleunigt. Deshalb erhöht sich bei einem passenden Teilungsverhältnis $S/D = 5$ für Kies 8/16 die Strömungsgeschwindigkeit und führt zu einer deutlichen Verbesserung des Wärmeübergangs am Rohr 1. Bei zu großem Teilungsverhältnis $S/D = 10$ wird die Strömungsgeschwindigkeit durch die höherliegenden Kiespartikel gebremst, bei zu kleinem Teilungsverhältnis $S/D = 3$ wird die Abfuhr der Wärme durch das höherliegende

warme Rohr verhindert. Die beiden Fälle haben eine Verschlechterung des Wärmeübergangs zur Folge.

Im Vergleich zu den Kurven in den Bildern 8.9 und 8.10 zeigen die Kurven in Bild 8.11 für Kies 8/16 einen Unterschied. Die normierte Nusselt-Zahl nimmt nicht für alle fünf Rohre mit steigender Wärmestromdichte zu. Für $S/D = 3$ nimmt die normierte Nusselt-Zahl der Rohre 1 und 4 sogar mit steigender Wärmestromdichte leicht ab, da die Schüttung mit Kies 8/16 eine kleinere Permeabilität bzw. Durchlässigkeit besitzt und bei höheren Wärmestromdichten wird die Wärme nicht genügend schnell abgeführt. Außerdem liegt oberhalb der Rohre 1 und 4 ein heißes Rohr vor.

In Bild 8.12 sind für Kies 4/8 die Kurvenverläufe dargestellt. Sie sind mehr oder weniger ähnlich wie für Kies 8/16 (Bild 8.11). Wiederum kommt für $S/D = 3$ sowie für $S/D = 5$ ein Abfall der normierten Nusselt-Zahl an den Rohren 1 und 4 bei höheren Wärmestromdichten vor. Wie für andere Kieszusammensetzungen weist das unterste Rohr die größten Nusselt-Zahlen auf. Außerdem kann man erkennen, daß die Werte des Rohres 1 für $S/D = 3$ größer als die für $S/D = 5$ und 10 sind. Dies läßt sich analog, wie oben für Kies 8/16 erwähnt, erklären. Mit Hilfe des Verhältnisses S'/d kann man dies noch quantitativ beschreiben. $S' = S - D$ ist der lichte Abstand der Rohre (siehe Bild 2.3) und d der Kiesdurchmesser. Dieses Verhältnis S'/d kennzeichnet, wie viele Kiespartikel sich zwischen zwei Rohren befinden können.

Aus der Definition der Permeabilität K (Gl. 4.56) gilt:

$$K \sim d^2 \quad (8.4)$$

$$K^{0,5} \sim d \quad (8.5)$$

Dann ergibt sich:

$$\frac{S'}{d} \sim \frac{S'}{K^{0,5}} \quad (8.6)$$

D.h. das Verhältnis S'/d berücksichtigt auch den Einfluß der Permeabilität.

Für Kies 4/8 ergibt sich bei $S/D = 3$:

$$\frac{S'}{d} = \frac{S-D}{d} = \frac{(S/D-1) \cdot D}{d} = \frac{(3-1) \cdot 8,5\text{mm}}{5,77\text{mm}} = 2,95 \quad (8.7)$$

Für Kies 8/16 ergibt sich bei $S/D = 5$ (dabei hat das unterste Rohr auch eine größere Nusselt-Zahl als bei $S/D = 3$ und 10):

$$\frac{S'}{d} = \frac{(5-1) \cdot 8,5\text{mm}}{11,54\text{mm}} = 2,95 \quad (8.8)$$

D.h. für die beiden Kieszusammensetzungen Kies 8/16 und Kies 4/8 zeigt sich bei $S'/d = 2,95$ eine günstigere Anordnung für den Wärmetransport. Das Verhältnis S'/d liefert zwar eine erste Information, es fehlen jedoch noch weitere Messungen, eine klare (eindeutige) Folgerung zu ziehen. Die Versuche in dieser Arbeit wurden nur bei einer beschränkten Kombination von Kieszusammensetzung und Teilungsverhältnis durchgeführt.

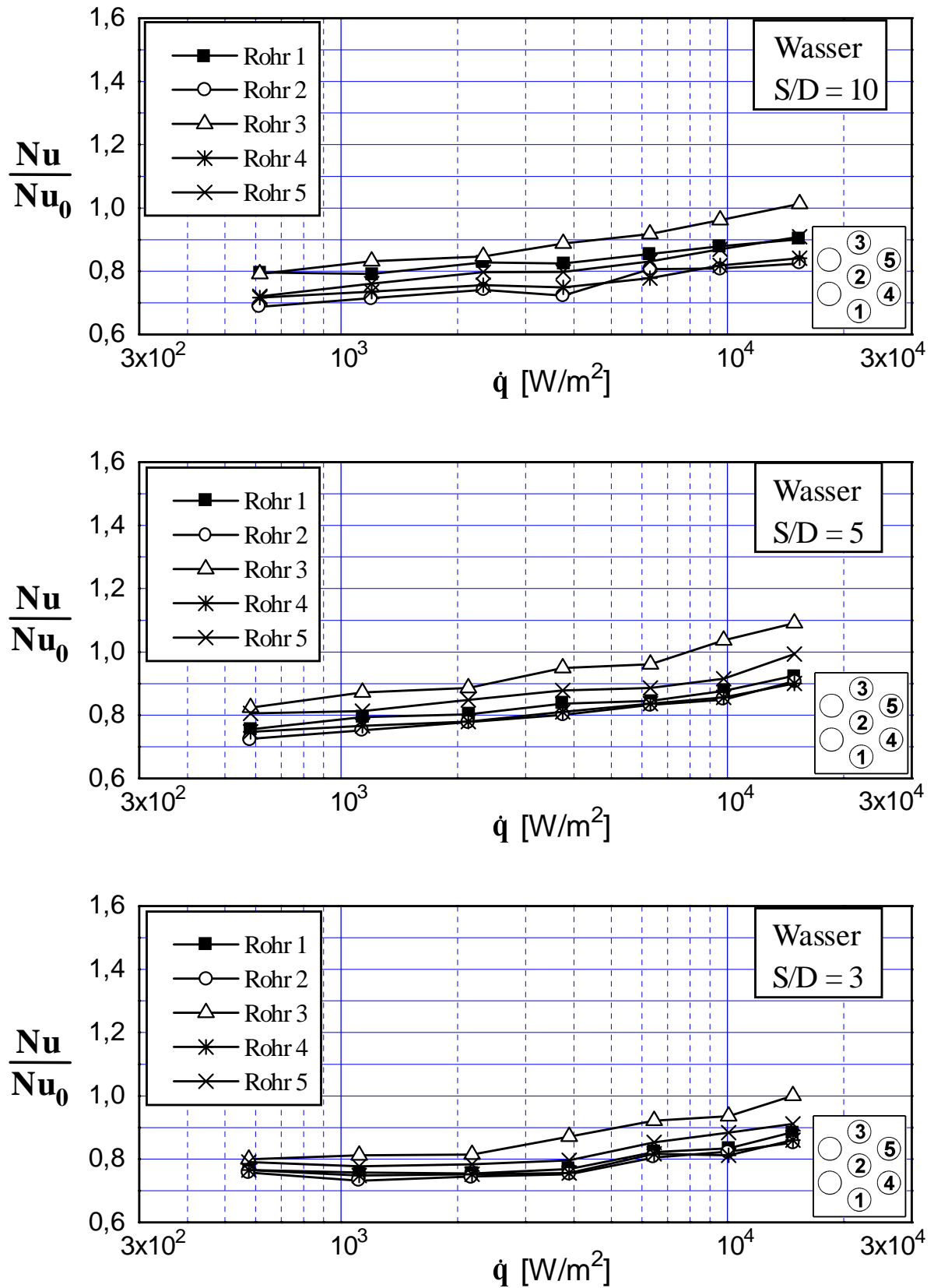


Bild 8.9: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 5 in Wasser bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

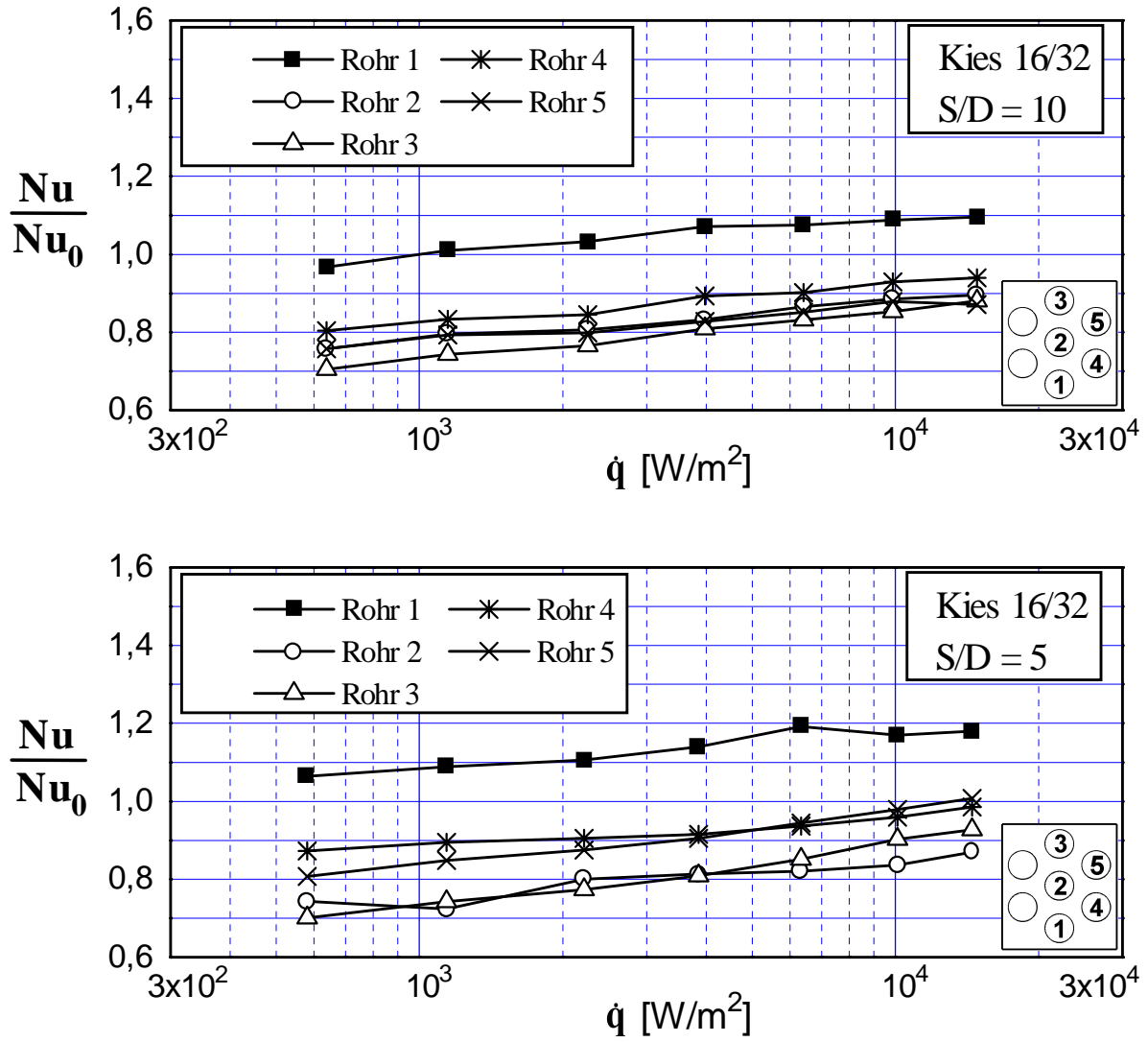


Bild 8.10: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 5 in der Schüttung mit **Kies 16/32** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

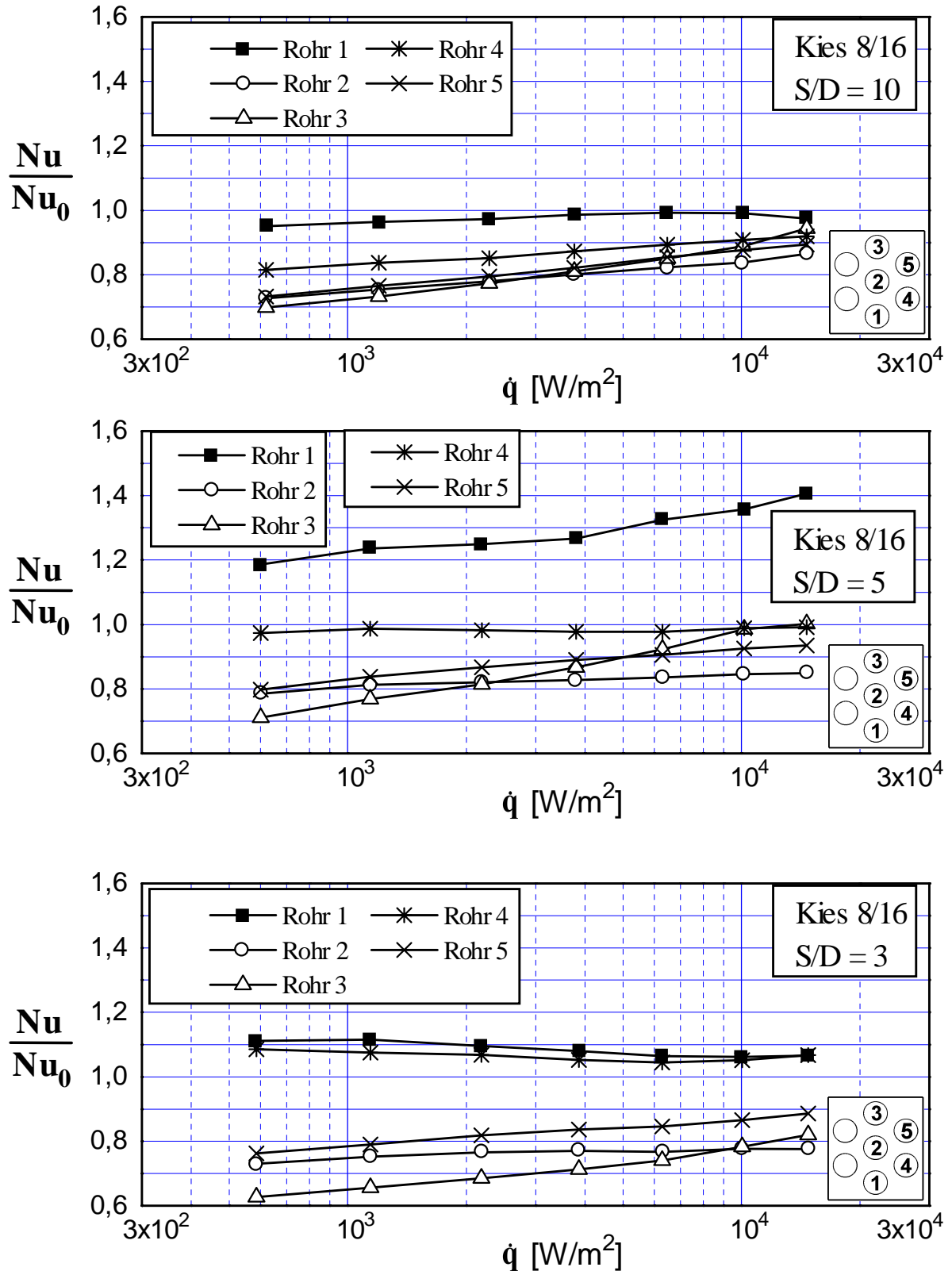


Bild 8.11: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 5 in der Schüttung mit **Kies 8/16** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

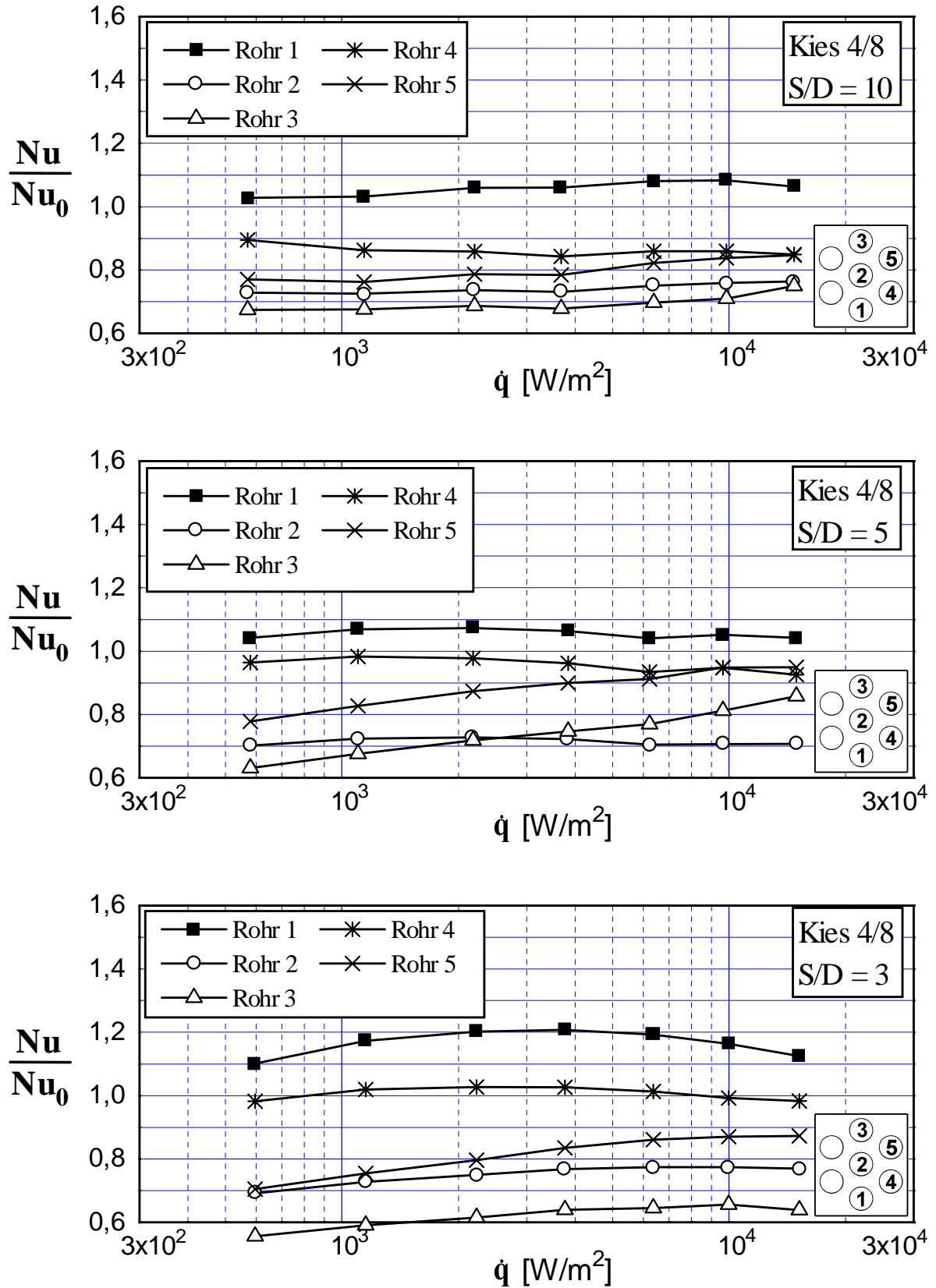


Bild 8.12: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 5 in der Schüttung mit **Kies 4/8** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

8.3.1 Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des 7Rohr-Bündels (Bezug auf \varnothing_∞)

Im folgenden werden die Nusselt-Zahlen der Rohre 1 bis 7 arithmetisch gemittelt, um den Einfluß der untersuchten Parameter Teilungsverhältnis und Kieszusammensetzung (Kies Korngröße) auf das Gesamtbündel zu zeigen. Die mittlere Nusselt-Zahl des Rohrbündels wird wie folgt berechnet:

$$\text{Nu}_m = \frac{1}{7} \sum_{i=1}^7 \text{Nu}_i \quad (8.9)$$

mit Nu_i als die Nusselt-Zahl der einzelnen Rohre in dem aus 7 Rohren bestehenden Bündel.

In Bild 8.13 bis Bild 8.16 sind die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen mittleren Nusselt-Zahlen Nu_m bei jeweils derselben Wärmestromdichte für verschiedene Medien und für verschiedene Teilungsverhältnisse in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte dargestellt. Zusätzlich sind die entsprechenden Verhältnisse S'/d im Bild angegeben.

Sowohl in Wasser als auch in der Kies/Wasser-Schüttung nimmt die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 mit steigender Wärmestromdichte zu. Zumeist sind die normierten mittleren Nusselt-Zahlen kleiner als der Wert eins. Erst bei hohen Wärmestromdichten zeigen die Werte für Kies 8/16 bei $S/D = 5$ (Bild 8.15) eine Verbesserung des Wärmeübergangs gegenüber dem Einzelrohr ($\text{Nu}_m/\text{Nu}_0 > 1$). Dies wird auf die erhebliche Erhöhung der Nusselt-Zahl am untersten Rohr 1 zurückgeführt (siehe Bild 8.11).

In Bild 8.13 (Wasser) zeigt das Teilungsverhältnis $S/D = 5$ die größten mittleren Nusselt-Zahlen. Dies läßt sich durch den stärkeren Einfluß der Anströmgeschwindigkeit erklären. Beim größeren Teilungsverhältnis $S/D = 10$ verringert sich dieser Einfluß; beim kleineren Teilungsverhältnis $S/D = 3$ nimmt der Einfluß der Anströmtemperatur vom unteren Rohr zu. Dies führt zu einer Verschlechterung des Wärmeübergangs.

In Bild 8.14 für Kies 16/32 zeigt der Verlauf der normierten mittleren Nusselt-Zahl ein sehr ähnliches Verhalten wie in Bild 8.13 (Wasser). Die Werte für Kies 16/32 sind jedoch ein wenig größer. Dies kann durch die Erhöhung der Geschwindigkeit des Wassers nach dem Einsatz des Kiesel erklärt werden und führt zu einer Verbesserung des Wärmeübergangs. Der größte Wert tritt auch bei $S/D = 5$, wie in Wasser (Bild 8.13), auf. Dieses Teilungsverhältnis $S/D = 5$ entspricht $S'/d = 1,47$.

In Bild 8.15 für Kies 8/16 weist das Teilungsverhältnis $S/D = 5$ die größten mittleren Nusselt-Zahlen auf. Dies wird auf das günstigere Verhältnis $S'/d = 2,95$ für die Abfuhr der Wärme zurückgeführt (siehe auch Abschnitt 8.3). Bei niedrigeren Wärmestromdichten sind die

mittleren Nusselt-Zahlen für $S/D = 3$ aufgrund der wenig behinderten Strömung größer, als die für $S/D = 10$. Bei größeren Wärmestromdichten nähern sich die Werte für $S/D = 3$ denen für $S/D = 10$ an, da bei kleinerem Teilungsverhältnis ($S/D = 3$) die erhöhte Anströmtemperatur zu einer Verringerung des Wärmeübergangs gegenüber denen bei $S/D = 10$ führt.

In Bild 8.16 für Kies 4/8 fallen die beiden Kurven für $S/D = 5$ und $S/D = 3$ im untersuchten Bereich der Wärmestromdichte fast zusammen. Für $S/D = 3$ ergibt sich das Verhältnis $S'/d = 2,95$. Dieser Wert ist gleich dem für Kies 8/16 mit $S/D = 5$, wobei sich die größten mittleren Nusselt-Zahlen ergeben (siehe Gl. 8.7, 8.8). Die Werte für $S/D = 10$ sind wegen der Verschlechterung des Wärmetransports durch mehrere höherliegende kleine Kiespartikel etwas kleiner.

Sowohl in Wasser als auch in der Schüttung (Bild 8.13 bis 8.16) weist das Teilungsverhältnis $S/D = 5$ die größten mittleren Nusselt-Zahlen bei gleicher Wärmestromdichte auf. Der Einfluß des Teilungsverhältnisses auf den Wärmeübergang in der Schüttung ist nicht eindeutig. Die Kurvenverläufe für die drei Kieszusammensetzungen unterscheiden sich. Dies deutet darauf hin, daß die mittlere Nusselt-Zahl noch von der Kies Korngröße abhängt, also von der Permeabilität. Wenn man das Verhältnis S'/d betrachtet, tritt für alle drei Kieszusammensetzungen die größte Nusselt-Zahl zwischen $S'/d = 1,47$ und $S'/d = 2,95$ auf.

Eine Folgerung ergibt sich daraus, daß in Wasser die größte mittlere Nusselt-Zahl bei dem Teilungsverhältnis $S/D = 5$ auftritt, während in der Kies/Wasser-Schüttung ein stärkerer Wärmeübergang zwischen $S'/d = 1,47$ und $S'/d = 2,95$ vorkommt.

Das Bündel aus 7 Rohren kann auch als ein großes Rohr mit dem Durchmesser $D_m = 2S$ (siehe Bild 2.3c) aufgefaßt werden. Dafür kann anstelle einer mittleren Nusselt-Zahl eine mittlere α -Zahl bestimmt werden:

$$\alpha_m = \frac{\dot{q}}{\left(\sum \vartheta_{wi}/7\right) - \vartheta_\infty} \quad (8.10)$$

Damit folgt ein mittleres Nusselt-Zahl-Verhältnis von:

$$\frac{Nu_m^*}{Nu_0} = \frac{\alpha_m D_m}{\alpha D} \quad (8.11)$$

Je nach Teilungsverhältnis $S/D = 3$ oder 5 oder 10 wird $D_m = 6S$ oder $10S$ oder $20S$. Entsprechend größer werden die Nusselt-Zahl-Verhältnisse gegenüber den hier angegebenen. Die α_m und die Wandtemperaturen lassen sich aus den Tabellen A.4, im Anhang A ermitteln.

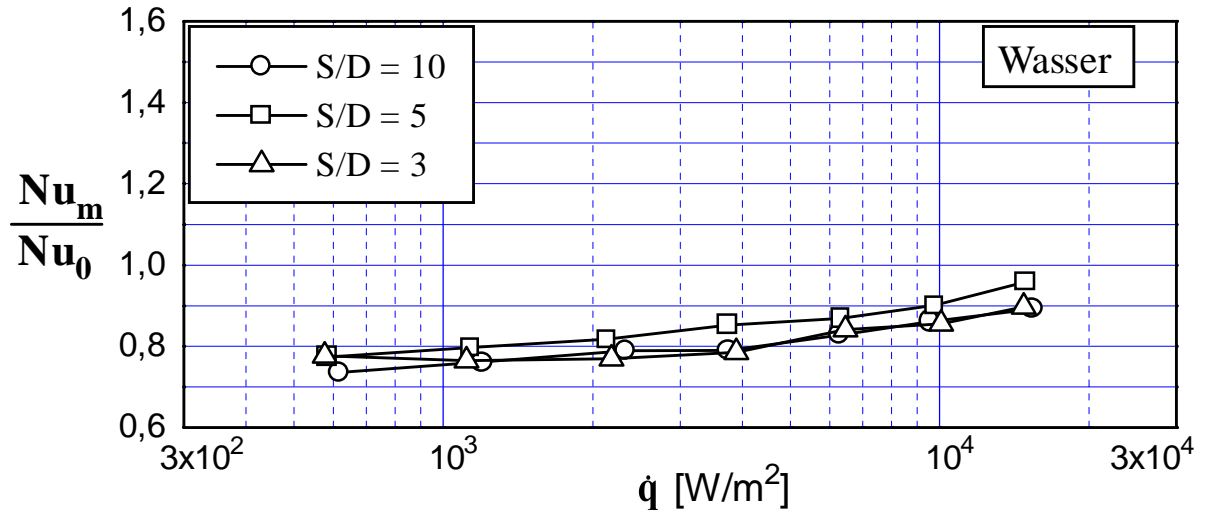


Bild 8.13: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für **Wasser**

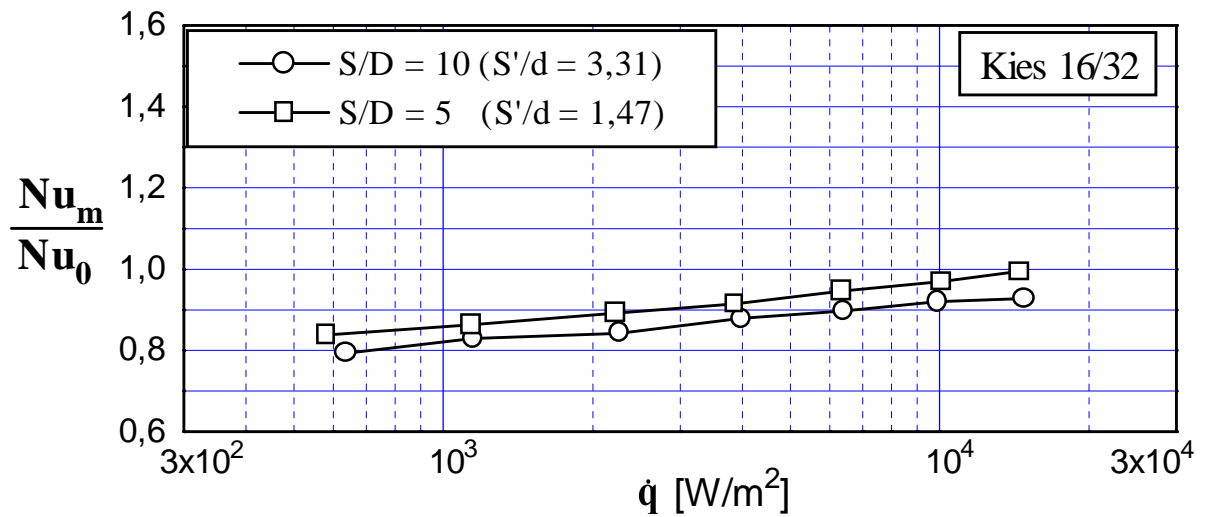


Bild 8.14: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit **Kies 16/32**

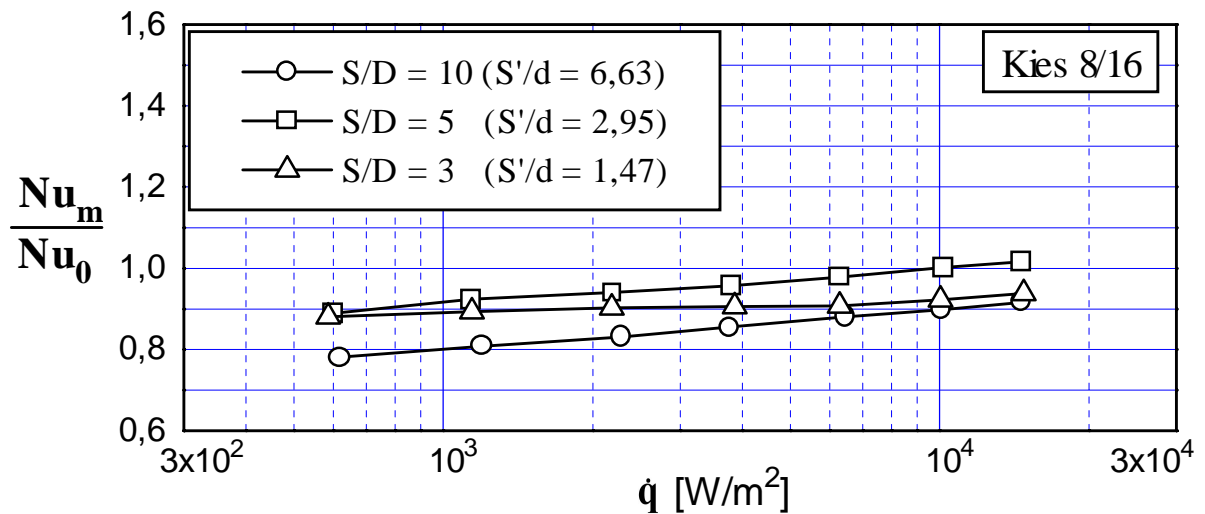


Bild 8.15: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit **Kies 8/16**

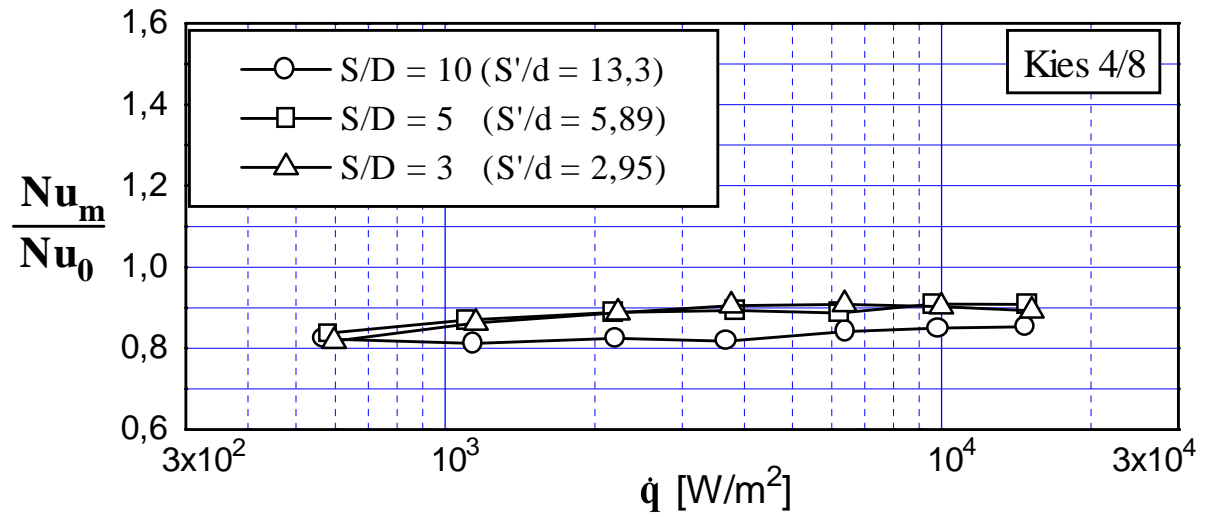


Bild 8.16: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit **Kies 4/8**

8.3.2 Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des 7Rohr-Bündels (Bezug auf \varnothing_∞)

In Bild 8.17 bis Bild 8.19 sind die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen mittleren Nusselt-Zahlen Nu_m bei jeweils derselben Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 mit der Kieszusammensetzung (Korngröße) als Parameter über der Wärmestromdichte dargestellt. Zum Vergleich sind die Meßwerte in Wasser auch aufgeführt.

Für alle drei Teilungsverhältnisse (Bild 8.17 bis 8.19) weisen die normierten mittleren Nusselt-Zahlen Nu_m/Nu_0 in der Schüttung bei niedrigen Wärmestromdichten aufgrund der Geschwindigkeitserhöhung durch Einsatz des Kieses höhere Werte auf, als die in Wasser. Erst bei hohen Wärmestromdichten überschreiten die Meßwerte in Wasser die Werte für Kies 4/8 aufgrund des schlechteren Wärmetransports bei kleinerer Permeabilität von Kies 4/8.

Beim Teilungsverhältnis $S/D = 10$ (Bild 8.17) nimmt die mittlere Nusselt-Zahl mit kleiner werdender Kieskorngröße ab, da die Wärme bei kleinerer Permeabilität schlecht abgeführt wird. Dies wird deutlicher bei höheren Wärmestromdichten. Für Kies 16/32, der die größten mittleren Nusselt-Zahlen zeigt, liegt das Verhältnis $S'/d = 3,31$ vor.

Beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$ (Bild 8.18), das einem Verhältnis von $S'/d = 2,95$ entspricht, ergibt sich für Kies 8/16 die größte mittlere Nusselt-Zahl. Dies wird auf die erheblich erhöhte Nusselt-Zahl am untersten Rohr 1 im Vergleich zu der für Kies 16/32 zurückgeführt (siehe auch Abschnitt 8.3). Mit kleinem Kies 4/8 liegen die Werte aufgrund der erhöhten Anströmtemperatur und der Beeinträchtigung des Wärmeübergangs niedriger.

Beim Teilungsverhältnis $S/D = 3$ (Bild 8.19) zeigen die Verläufe der normierten mittleren Nusselt-Zahlen für Kies 8/16 und Kies 4/8 wenigen Unterschied, zwar sind bei kleinen und großen Wärmestromdichten die mittleren Nusselt-Zahlen für Kies 8/16 etwas größer. Die beiden Kieszusammensetzungen haben das Verhältnis $S'/d = 1,47$ und $S'/d = 2,95$.

Wenn man sich die Werte des Verhältnisses S'/d ansieht, kommt die größte mittlere Nusselt-Zahl für die drei untersuchten Teilungsverhältnisse zwischen $S'/d = 1,47$ und $S'/d = 3,31$ vor.

Anhand der Untersuchung über den Einfluß des Teilungsverhältnisses (siehe Abschnitt 8.3.1) auf den Wärmeübergang liegt der obere Grenzwert zur Erzielung der größten mittleren Nusselt-Zahl bei $S'/d = 2,95$. Die Tatsache, daß das Verhältnis $S'/d = 3,31$ (für $S/D = 10$, Kies 16/32 in Bild 8.17) die kleinsten Werte für die Versuche mit $S/D = 10$ liefert, bestätigt die gemachten Aussagen in Abschnitt 8.3.1. Günstig ist ein Verhältnis von $1,47 \leq S'/d \leq 2,95$.

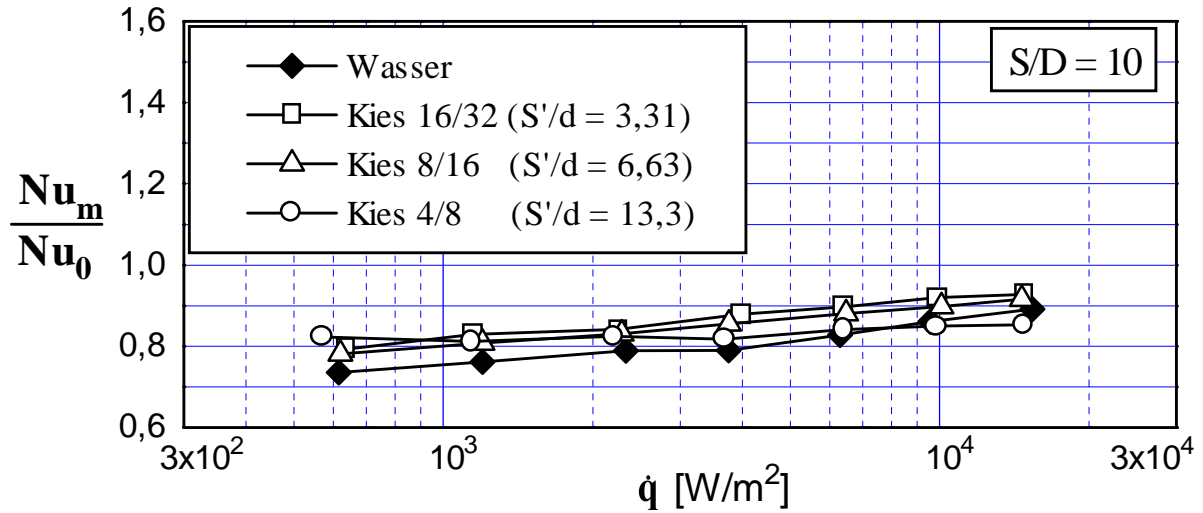


Bild 8.17: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 10$

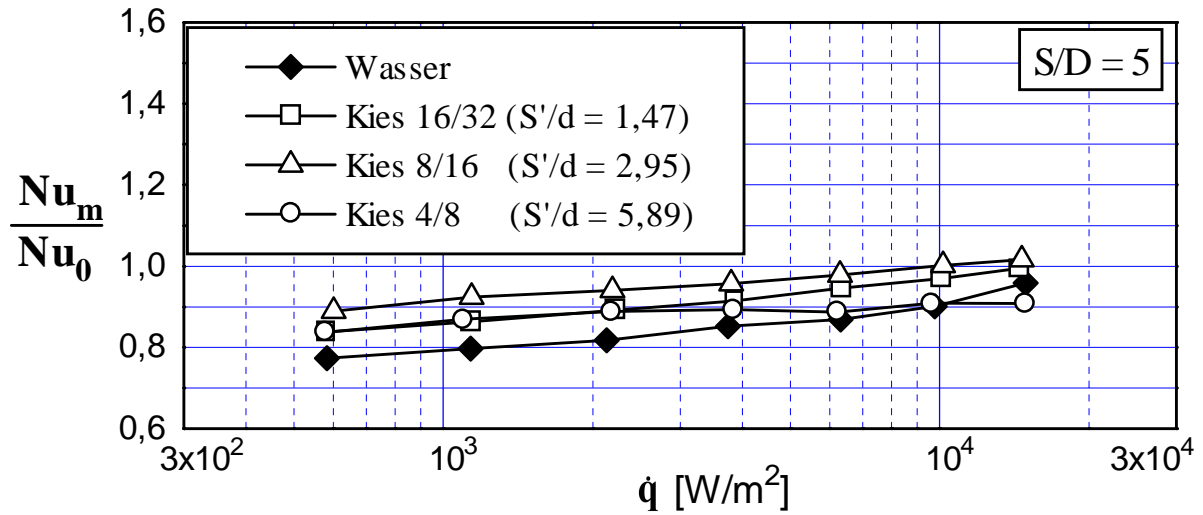


Bild 8.18: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$

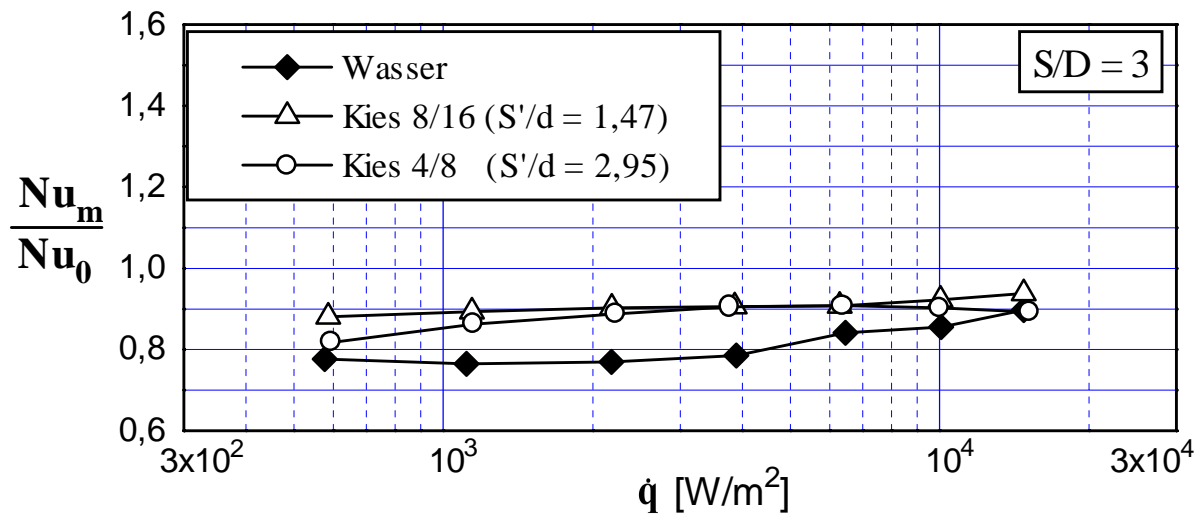


Bild 8.19: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 3$

8.4 Nusselt-Zahlen der Rohre im 7Rohr-Bündel (Bezug auf ϑ_{zui})

Im folgenden sind wieder die Nusselt-Zahlen der Rohre unter Zugrundlegung der jeweiligen Anströmtemperatur ϑ_{zui} gezeigt.

In den Bildern 8.9a bis 8.19a zeigen sich wie in Kapitel 7 zum Teil erhebliche Unterschiede zu den Bildern 8.9 bis 8.19 sowohl in der Lage der einzelnen Kurven als auch in deren Verlauf. Eine Tabelle der berechneten Werte ist im Anhang E gegeben.

In Wasser (Bild 8.9a) zeigt sich eine ständige Erhöhung der wirklichen Nusselt-Zahl vom Rohr 1 bis 3 und vom Rohr 4 bis 5. Ein glockenförmiger Verlauf der Kurven des obersten Rohres kommt wieder für Kies 8/16 (Bild 8.11a) und Kies 4/8 (Bild 8.12) vor. Für Kies 4/8, $S/D = 5$ ergibt sich eine erhebliche Erhöhung der Nusselt-Zahl für das oberste Rohr 3 gegenüber dem Einzelrohr.

Der Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl Nu_m wird im Abschnitt 8.4.1 gezeigt. Sowohl in Wasser als auch in der Schüttung weist das Teilungsverhältnis $S/D = 5$ die größten mittleren Nusselt-Zahlen bei gleicher Wärmestromdichte auf.

Der Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl Nu_m wird im Abschnitt 8.4.2 gezeigt. Die größte normierte mittlere Nusselt-Zahl ergibt sich für Kies 4/8 bei allen drei Teilungsverhältnissen $S/D = 10, 5$ und 3 . Die normierte mittlere Nusselt-Zahl nimmt mit größer werdender Korngröße ab.

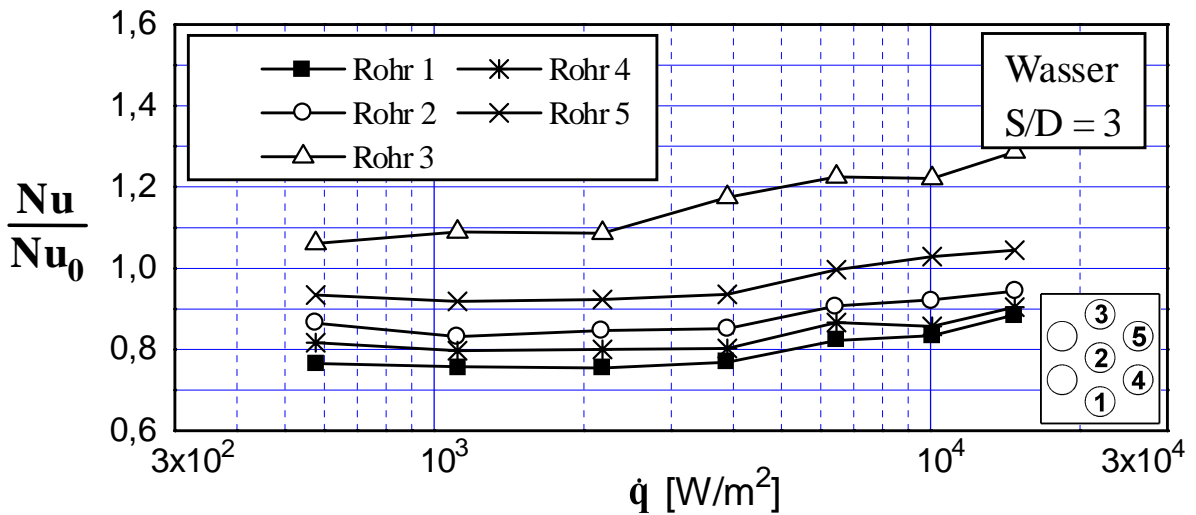
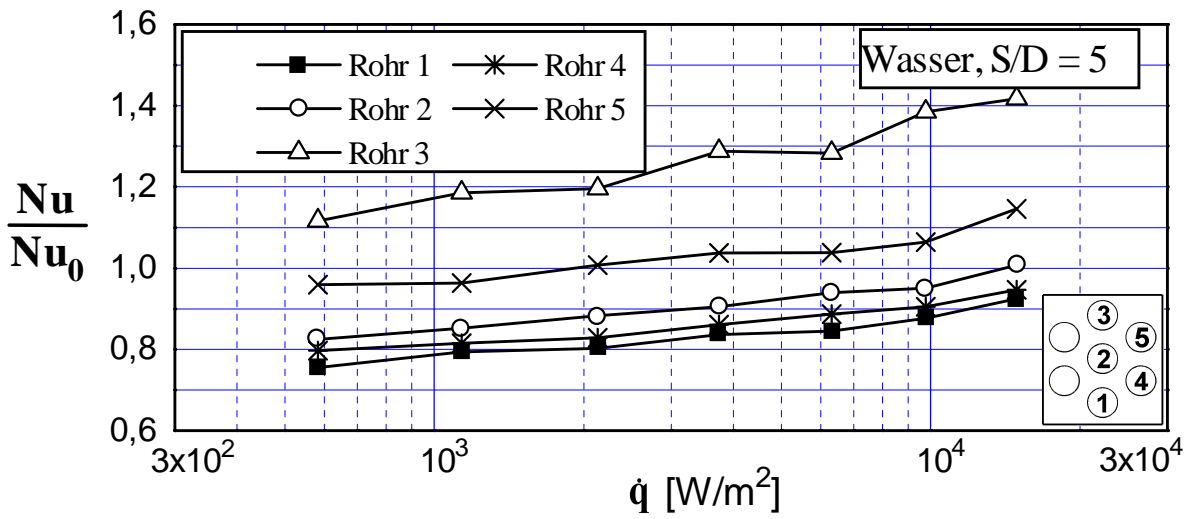
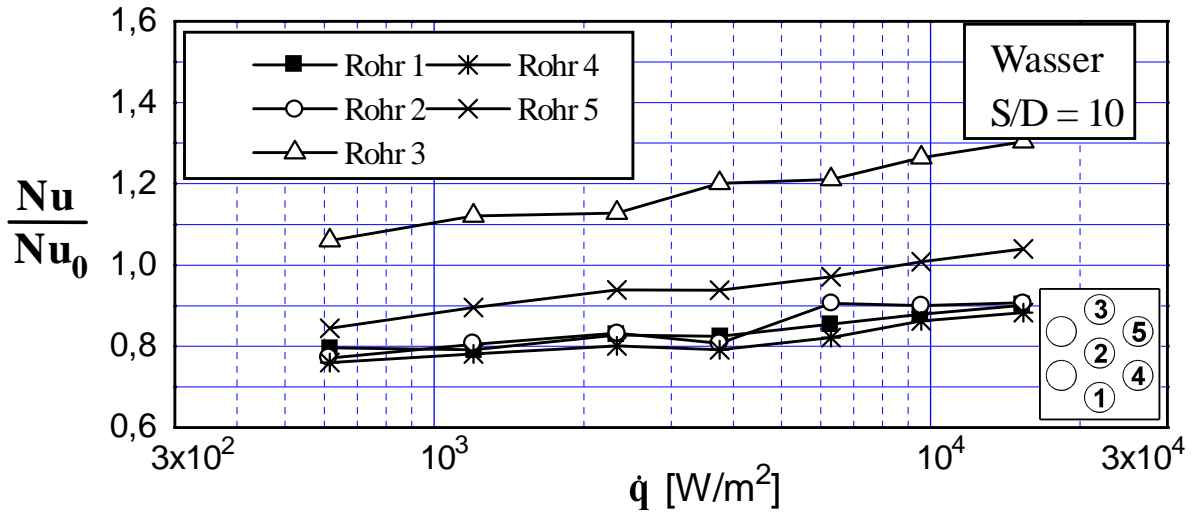


Bild 8.9a: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 5 in **Wasser** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

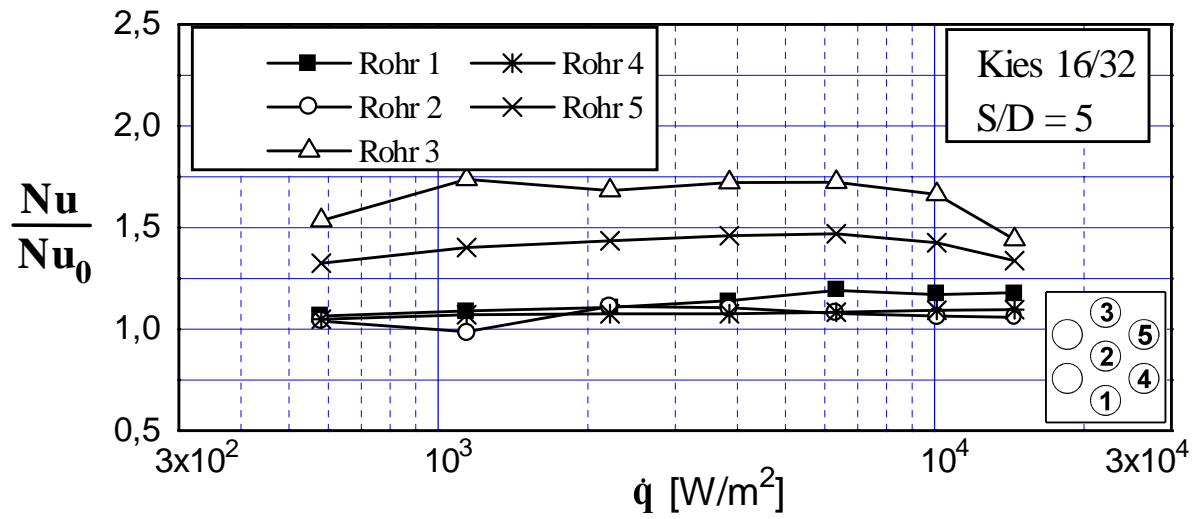
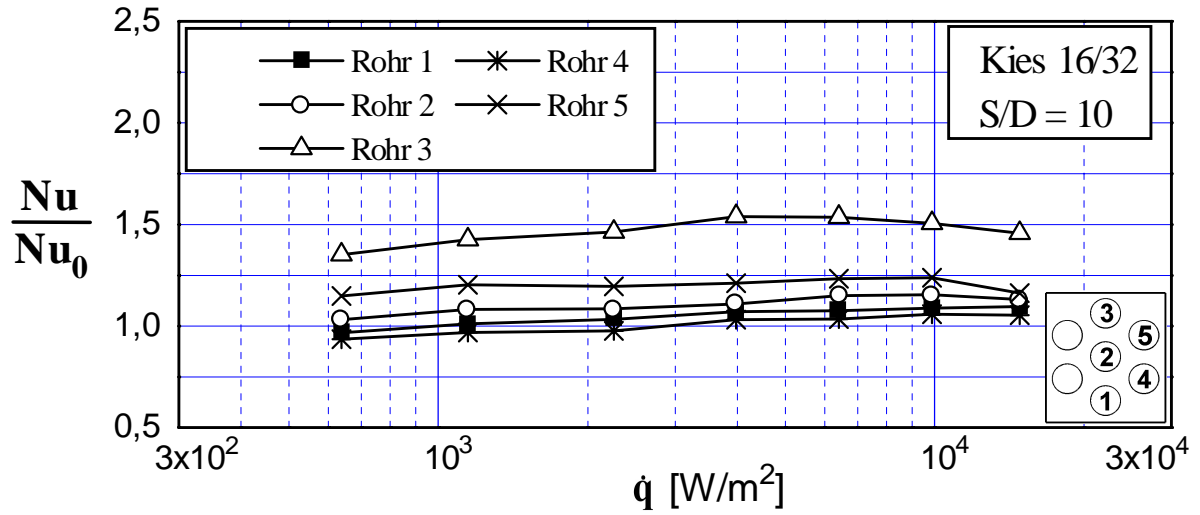


Bild 8.10a: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 5 in der Schüttung mit **Kies 16/32** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10$ und 5

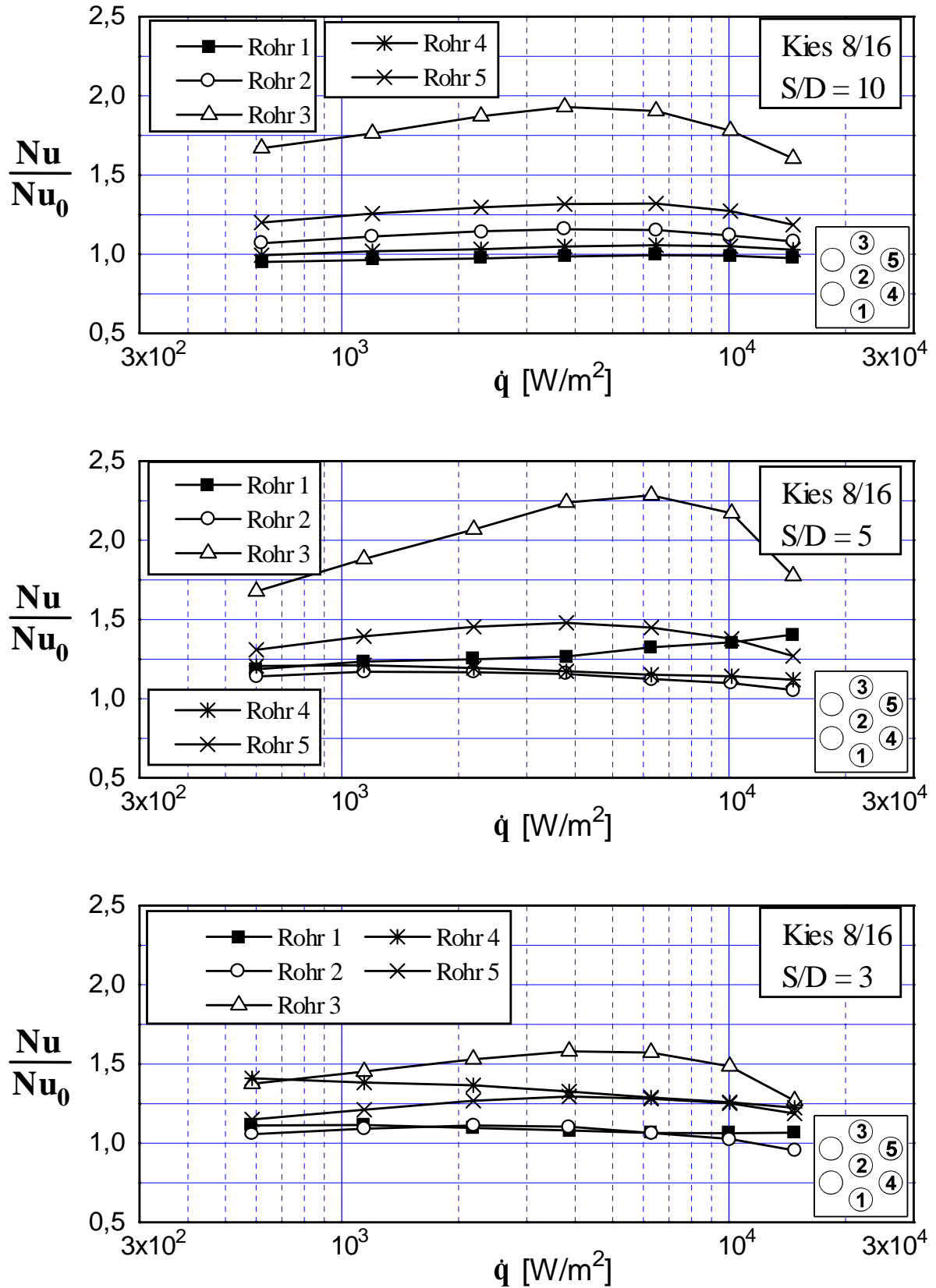


Bild 8.11a: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Rohre 1 bis 5 in der Schüttung mit Kies 8/16 bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

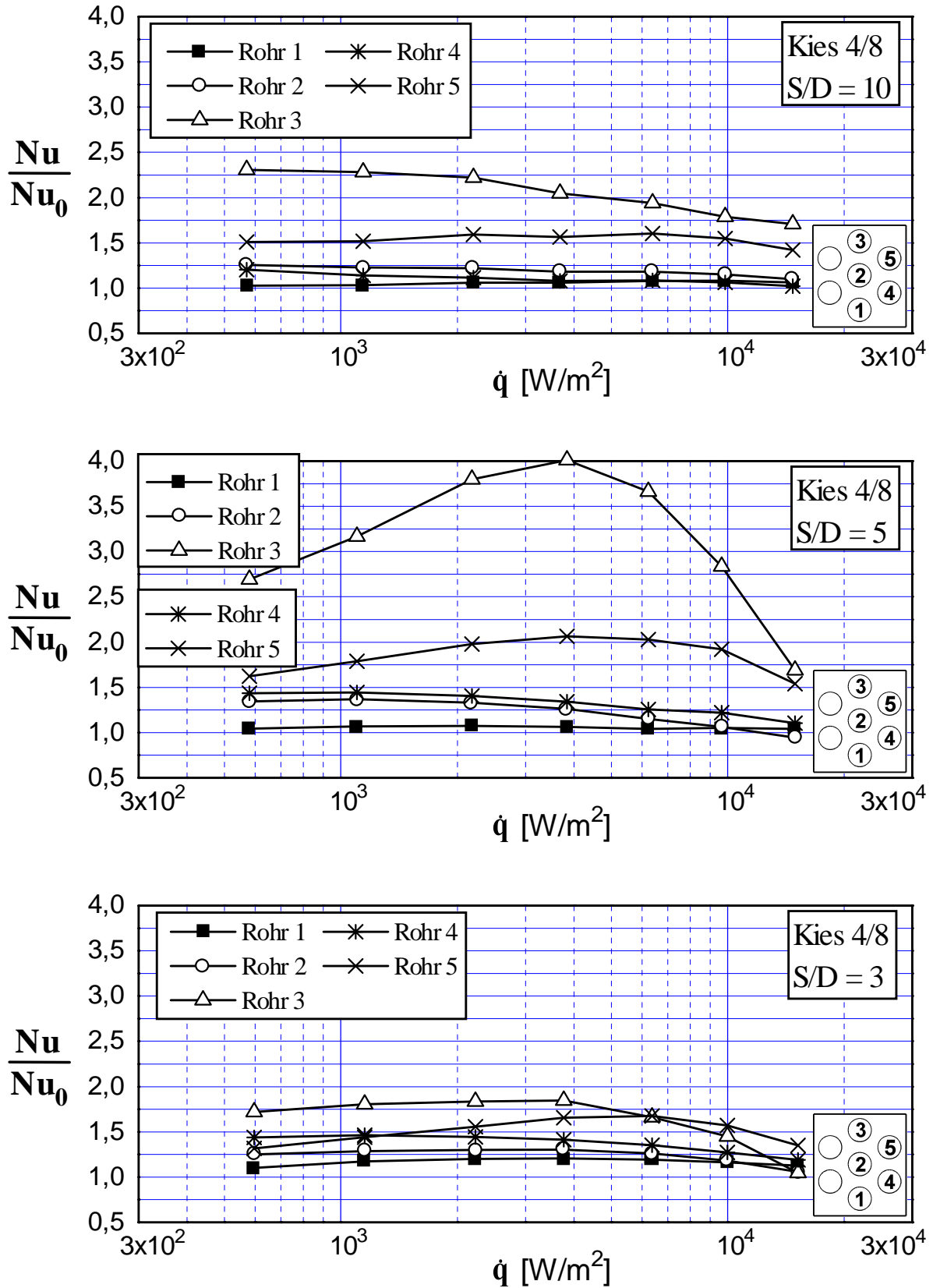


Bild 8.12a: Die auf die Nusselt-Zahl Nu_0 des Einzelrohres bezogenen Nusselt-Zahlen Nu der Röhre 1 bis 5 in der Schüttung mit **Kies 4/8** bei jeweils derselben Wärmestromdichte in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte für die Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3

8.4.1 Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl des 7Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})

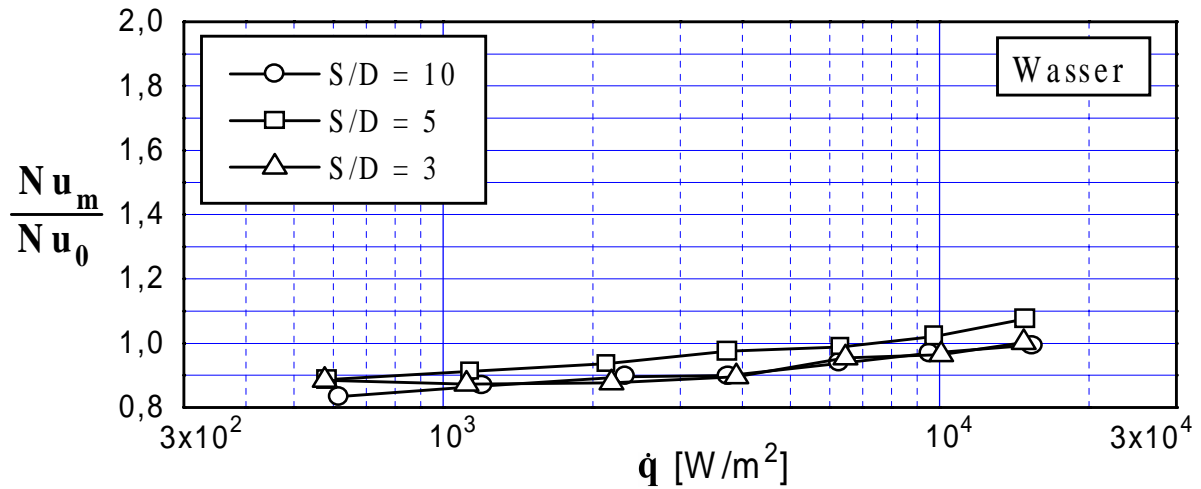


Bild 8.13a: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für Wasser

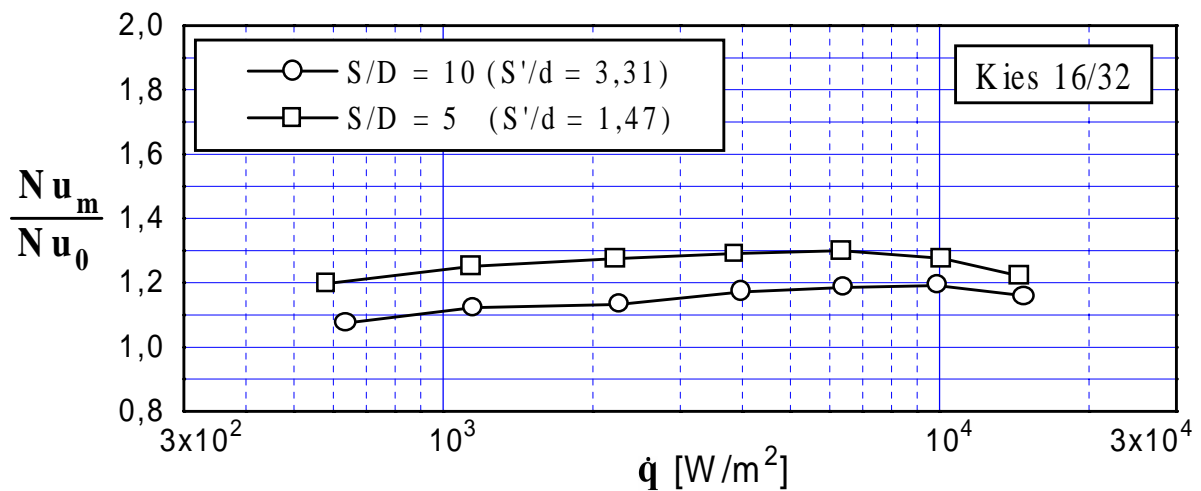


Bild 8.14a: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit Kies 16/32

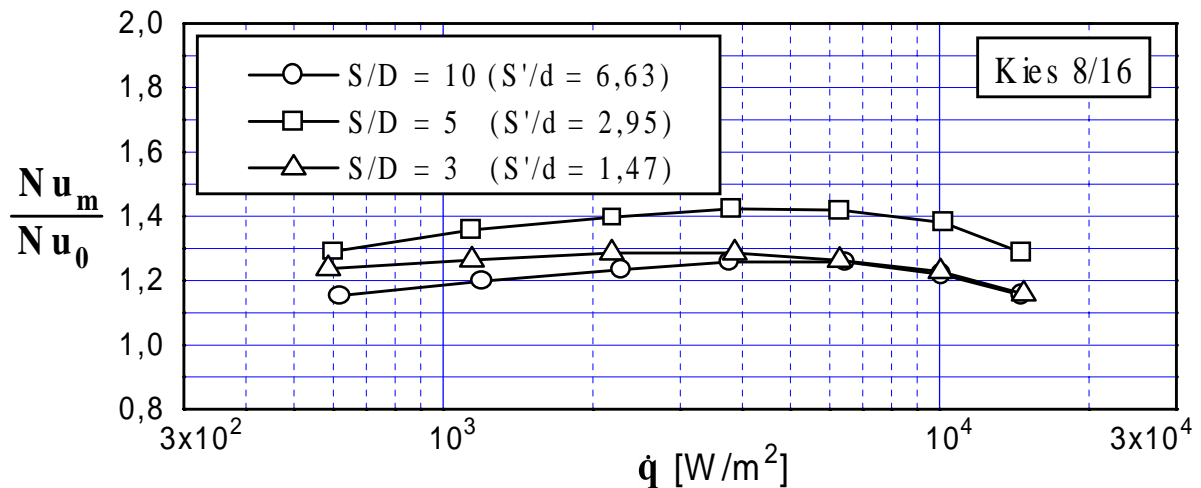


Bild 8.15a: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit Kies 8/16

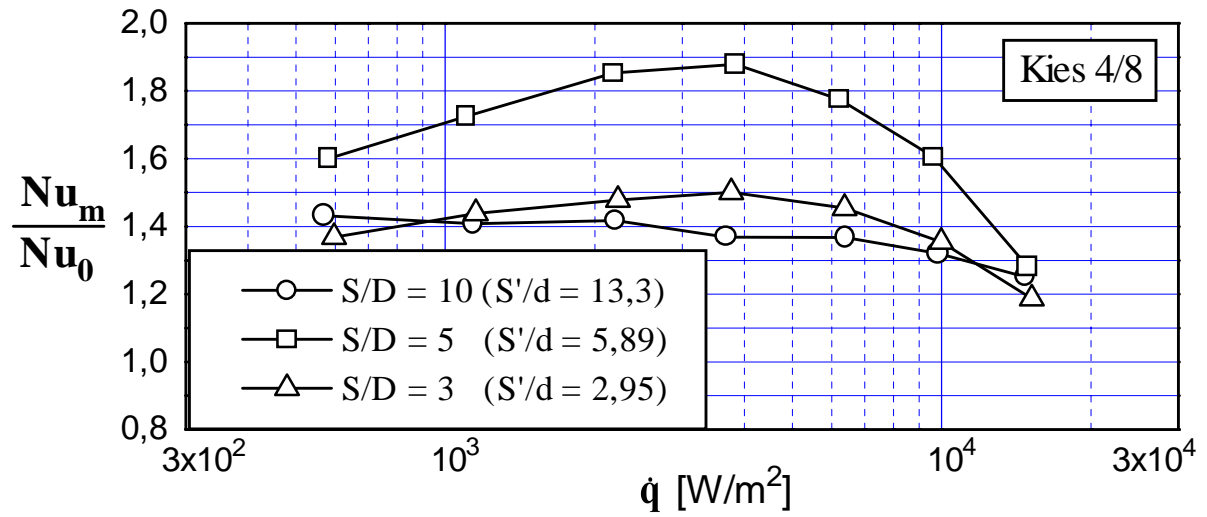


Bild 8.16a: Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 für die Schüttung mit **Kies 4/8**

8.4.2 Einfluß der Korngröße der Schüttung auf die mittlere Nusselt-Zahl des 7Rohr-Bündels (Bezug auf ϑ_{zui})

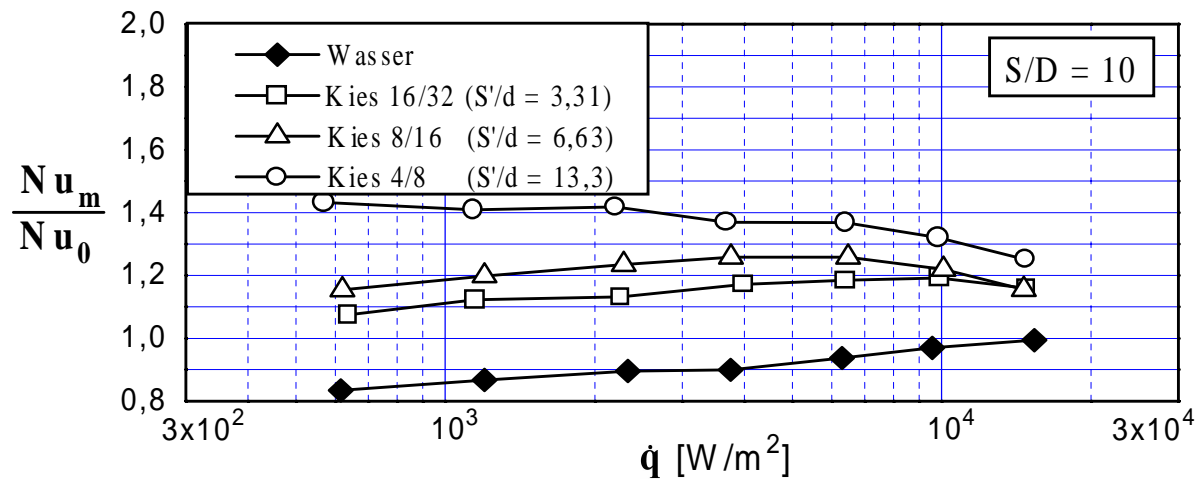


Bild 8.17a: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 10$

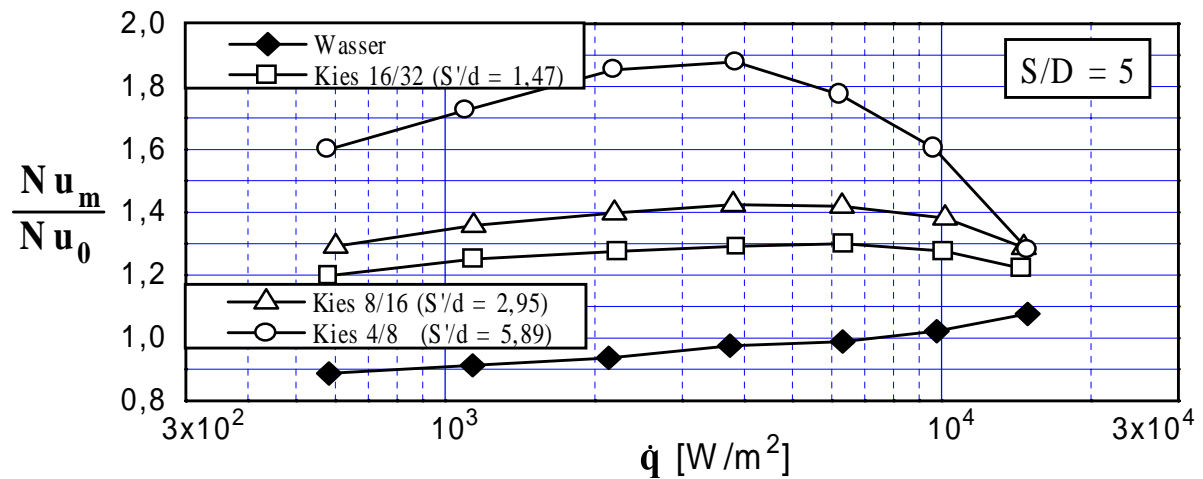


Bild 8.18a: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$

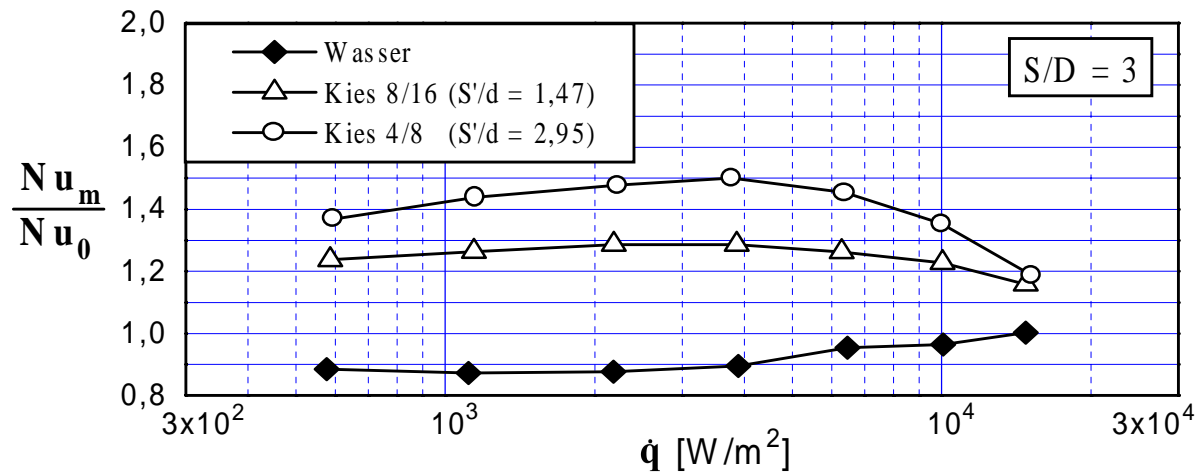


Bild 8.19a: Einfluß der Kieszusammensetzung auf die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 beim Teilungsverhältnis $S/D = 3$

9 Zusammenfassung

Künstliche Kies/Wasser-Wärmespeicher können zur saisonalen Speicherung von solar erzeugter Wärmeenergie dienen. Sie können über horizontal verlegte Wärmeübertragerrohre be- und entladen werden. Um einen solchen Speicher dimensionieren zu können, ist unter anderem die Kenntnis des äußeren Wärmeübergangskoeffizienten an den Rohren nötig. Außerdem ist die gegenseitige Beeinflussung der Rohre von Interesse.

In Rahmen dieser Arbeit wurde der Wärmeübergang an horizontalen Einzelrohren, 3 übereinander liegenden Rohren und 7 versetzt angeordneten Rohren sowohl in Wasser als auch in der Kies/Wasser-Schüttung in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte experimentell untersucht. Die Anordnung mit 3 Heizrohren besteht aus drei übereinanderliegenden Rohren. Bei der Anordnung mit 7 Heizrohren sind sieben Rohre eingebaut, die in drei senkrechten Reihen mit einer Dreiecksteilung (Versetzungswinkel 60°) angeordnet sind. Die Rohre wurden elektrisch beheizt. Als Schüttgut wurden drei verschiedene Korngrößen eingesetzt, nämlich Kies mit 4 bis 8 mm, 8 bis 16 mm und 16 bis 32 mm (Kies 4/8, Kies 8/16 und Kies 16/32).

Für die Versuche an Einzelrohren in Wasser wurde der Einfluß der Höhe H der Kühlplatte über dem Heizrohr untersucht. Die Höhe wurde zwischen $H = 5D$ und $H = 30D$ variiert.

Für die Untersuchungen mit 3 und 7 Heizrohren wurden außer bei den Messungen an der Schüttung mit Kies 16/32, die nur bei zwei Teilungsverhältnissen $S/D = 10$ und 5 vorgenommen wurden, Versuche bei den drei Teilungsverhältnissen $S/D = 10$, 5 und 3 durchgeführt. Alle Rohre wurden mit gleicher Wärmestromdichte betrieben.

Die Ergebnisse der Versuche an Einzelrohren in Wasser zeigen, daß bei kleinen Rayleigh-Zahlen Ra_{Fl} die Höhe H der Kühlplatte über dem Heizrohr wenig Einfluß auf den Wärmeübergangskoeffizienten hat, während bei großen Rayleigh-Zahlen die Nusselt-Zahl Nu_{Fl} mit größer werdender Höhe H abnimmt. Für Höhen ab $H > 15D$ hat die Höhe fast keinen Einfluß auf den Wärmeübergang. Ein Vergleich der Meßwerte (bei $H = 30D$) mit berechneten Werten nach den Korrelationsgleichungen aus der Literatur zeigt eine gute Übereinstimmung. Die maximale Abweichung beträgt 4 %.

Die Messungen an Einzelrohren in der Kies/Wasser-Schüttung ergaben drei unterschiedliche Strömungsgebiete:

Darcy-Strömung:	$Gr_{max} \leq 7$
Forchheimer-Strömung:	$7 < Gr_{max} \leq 85$
Turbulente Strömung:	$85 < Gr_{max}$

Dabei ist bei der Berechnung der Grashof-Zahl Gr_{\max} die nicht wandkorrigierte Porosität ε einzusetzen.

Die Nusselt-Zahl Nu_{Fl} bzw. der Wärmeübergang an horizontalen Einzelrohren in der Kies/Wasser-Schüttung nimmt mit zunehmender Rayleigh-Zahl Ra_{Fl} bzw. Wärmestromdichte und größer werdender Kieskorngröße zu. Anhand der Messungen konnten drei neue Korrelationsgleichungen für den Wärmeübergangskoeffizienten im untersuchten Temperaturbereich von 20 °C bis 55 °C in der Form:

$$Nu_S = C_1 Ra_S^{C_2} Pr_S^{-C_3 \ln\{1 + [\arctan(d/D)]^{2,5}\}}$$

vorgeschlagen werden. Sie geben die Meßwerte mit einer mittleren Abweichung von $\pm 10\%$ wieder.

Zur Erweiterung des Anwendungsbereichs der neuen Korrelationsgleichungen, wurden für die Bereiche der Darcy- und Forchheimer-Strömung die Daten, die nach den Korrelationsgleichungen für Glaskugel-Wasser/Schüttungen aus der Literatur entnommen wurden, mit berücksichtigt. Es konnten zwei neue Korrelationsgleichungen in der Form:

$$Nu_S = C_1 Ra_S^{C_2} \left(Gr_S^{C_3} Pr_{Fl}^{C_4} \right)^{-\ln\{1 + [\arctan(d/D)]^{1,3}\}}$$

angegeben. Die Gleichungen geben die gemessenen Werte bis auf eine mittlere Abweichung von $\pm 15\%$ wieder.

Bei den Versuchen mit 7 Heizrohren erhält man außer bei den Messungen an der Schüttung mit Kies 8/16 beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$ immer eine Verringerung der mittleren Nusselt-Zahl Nu_m gegenüber dem Einzelrohr. Mit steigender Wärmestromdichte nimmt die normierte mittlere Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 zu.

Die Untersuchung über den Einfluß des Teilungsverhältnisses zeigt, daß sowohl in Wasser als auch in der Kies/Wasser-Schüttung die größte mittlere Nusselt-Zahl beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$ auftritt. Um den Einfluß der Kieskorngröße bzw. der Permeabilität der Schüttung besser zu berücksichtigen, wurde das Verhältnis S'/d zwischen dem lichten Abstand der Rohre S' und dem Kieskorndurchmesser d eingeführt. Damit ergibt sich für die Schüttung die größte mittlere Nusselt-Zahl zwischen den Verhältnissen $1,47 \leq S'/d \leq 2,95$.

Für die drei untersuchten Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 weist die Kieskorngröße keinen eindeutigen Einfluß auf den Wärmeübergangskoeffizienten auf. Dagegen erweist sich das Verhältnis S'/d als entscheidend. Für alle drei Teilungsverhältnisse zeigt sich zwischen $S'/d = 1,47$ und $S'/d = 3,31$ die größte mittlere Nusselt-Zahl.

Die Versuche mit 3 Heizrohren ergaben prinzipiell ähnliche Ergebnisse wie mit 7 Heizrohren. Eine Erhöhung der mittleren Nusselt-Zahl Nu_m gegenüber der Anordnung mit 7 Heizrohren wurde festgestellt. Die mittlere Erhöhung liegt zwischen 13,4 % und 19,8 % für den Wärmeübergang in Wasser und zwischen 2,4 % und 14,2 % in der Kies/Wasser-Schüttung.

Für alle Kieszusammensetzungen und Teilungsverhältnisse zeigt sich bei niedrigen Wärmestromdichten ein von der Wärmestromdichte nahezu unabhängiger Verlauf der normierten mittleren Nusselt-Zahl Nu_m/Nu_0 . Bei hohen Wärmestromdichten nimmt die normierte mittlere Nusselt-Zahl in Wasser bzw. in der Schüttung mit Kies 16/32 und Kies 8/16 mit steigender Wärmestromdichte leicht zu, aber in der Schüttung mit Kies 4/8 ab.

Die Feststellung über den Einfluß des Teilungsverhältnisses für die Anordnung mit 7 Heizrohren trifft auch für die Anordnung mit 3 Heizrohren zu: In Wasser ergibt sich die größte mittlere Nusselt-Zahl beim Teilungsverhältnis $S/D = 5$, in der Kies/Wasser-Schüttung tritt der höchste Wert zwischen $S'/d = 1,47$ und $S'/d = 2,95$ auf.

Bei der Untersuchung zum Einfluß der Kies Korngröße kann man feststellen, daß die größte mittlere Nusselt-Zahl für die drei untersuchten Teilungsverhältnisse $S/D = 10, 5$ und 3 zwischen $S'/d = 1,47$ und $S'/d = 3,31$ liegt.

Zum Vergleich mit den Ergebnissen bezogen auf ϑ_∞ werden Temperatur- und Nusselt-Zahl-Verhältnisse auch mit der Zuströmtemperatur ϑ_{zui} dargestellt. Die Untersuchung zum Einfluß des Teilungsverhältnisses S/D auf die mittlere Nusselt-Zahl Nu_m zeigt, daß sowohl in Wasser als auch in der Schüttung das Teilungsverhältnis $S/D = 5$ die größten mittleren Nusselt-Zahlen aufweist. Für drei untersuchte Teilungsverhältnisse ergibt sich die größte normierte mittlere Nusselt-Zahl für Kies 4/8 (außer bei 3Rohr-Bündel mit höheren Wärmestromdichten).

10 Literaturverzeichnis

- /Al-Alusi (1992)/ Al-Alusi, T. R.; Bushnell, D. J.
An experimental study of free convection heat transfer from an array of horizontal cylinders parallel to a vertical wall
Trans. ASME, J. Heat Transfer, 114 (1992), pp. 394-400
- /Bear (1972)/ Bear, J.
Dynamics of fluids in porous media
American Elsevier, New York, 1972
- /Beavers (1973)/ Beavers, G. S.; Sparrow, E. M.; Rodenz, D. E.
Influence of bed size on the flow characteristics and porosity of randomly packed beds of sphere
Trans. ASME., J. Applied Mechanics (1973), pp. 655-660
- /Benenati (1962)/ Benenati, R.F.; Brosilow, C. B.
Void fraction distribution in beds of spheres
A.I.Ch.E, 8 (1962), pp. 359-361
- /Bill (1975)/ Bill, R. G.; Gebhart, B.
The transition of plane plumes
Int. J. Heat Mass Transfer, 18 (1975), pp. 513-526
- /Brodowicz (1966)/ Brodowicz, K.; Kierkus, W. T.
Experimental Investigation of laminar free convection flow in air above horizontal wire with constant heat flux
Int. J. Heat Mass Transfer, 9 (1966), pp. 81-94
- /Carman (1956)/ Carman, P. C.
Flow of gases through porous media
Butterworths Scientific Publication, London, 1956
- /Churchill (1975)/ Churchill, S.W.; Chu, H. H. S.
Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder
Int. J. Heat Mass Transfer, 18 (1975), pp. 1049-1053
- /Ergun (1952)/ Ergun, S.
Fluid flow through packed columns
Chem. Eng. Prog. 48 (1952), pp. 89-94
- /Fand (1983)/ Fand, R. M.; Brucker, J.
A correlation for heat transfer by natural convection from horizontal cylinders that accounts for viscous dissipation
Int. J. Heat Mass Transfer, 26 (1983), pp. 709-716

- /Fand (1986)/ Fand, R. M.; Steinberger, T. E.; Chang, P.
Natural convection heat transfer from a horizontal cylinder embedded
in a porous medium
Int. J. Heat Mass Transfer, 29 (1986), pp. 119-133
- /Fand (1987)/ Fand, R. M.; Kim, B. Y. K.; Lam, A. C. C.; Phan, R. T.
Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous
media whose matrices are composed of randomly packed spheres
Trans. ASME, J. Heat Transfer, 109 (1987), pp. 268-274
- /Fand (1990)/ Fand, R. M.; Yamamoto, L. H.
Heat transfer by natural convection from a horizontal cylinder
embedded in a porous medium: the wall effect
Proc. 9th int. Heat Transfer Conf., Jerusalem, 5 (1990), pp. 183-188
- /Fand (1994)/ Fand, R. M.; Varahasamy, M.; Yamamoto, L. H.
Heat transfer by natural convection from horizontal cylinders
embedded in porous media whose matrices are composed of
spheres: viscous dissipation
Proc. 10th int. Heat Transfer Conf., Brighton, 5 (1994), pp. 237-242
- /Fernandez (1982)/ Fernandez, R. T.; Schrock, V. E.
Natural convection from cylinders buried in a liquid-saturated porous
medium
Proc. 7th int. Heat Transfer Conf., Munich, 2 (1982), pp. 335-340
- /Forchheimer (1901)/ Forchheimer, Ph.
Wasserbewegung durch Boden
Z. Ver. deutscher Ing. 45 (1901), pp. 1736-1741, 1781-1788
- /Giebe (1989)/ Giebe, R.
Ein Kies/Wasser-Wärmespeicher in Praxis und Theorie
Dissertation, Universität Stuttgart, 1989
- /Hahne (2000)/ Hahne, E.
The ITW-Solar Heating System – an oldtimer full in action
Solar Energy, Special Issue, in press, 2000
- /Himasekhar (1988)/ Himasekhar, K.; Bau, H. H.
Thermal convection around a heat source embedded in a box
containing a saturated porous medium
ASME J. Heat Transfer, 110 (1988), pp. 649-654
- /Kakaç (1985)/ Kakaç, S.; Aung, W.; Viskanta, R.
Natural convection
Springer-Verlag, Berlin, 1985

- /Katto (1967)/ Katto, J.; Masuoka, T.
Criterion for the onset of convective flow in a porous medium
Int. J. Heat Mass Transfer, 10 (1967), pp. 297-309
- /Kling (1959)/ Kling, G.
Versuche über den Wärmeaustausch in Rohren mit kugeligen und
zylindrischen Füllungen
Chemie-Ing.-Techn., 31 (1959), pp. 705-710
- /Kozeny (1927)/ Kozeny, J.
Kapillare Leitung des Wassers in Boden
Sitzungsberichte Akad. Wiss. Wien, Math.-naturw. Klasse, Abt. II-a,
136 (1927), pp. 271-306
- /Krischer (1956)/ Krischer, O.; Esdorn, H.
Die Wärmeübertragung in feuchten, porigen Stoffen verschiedener
Struktur
Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, 22 (1956), pp. 1-8
- /Krupiczka (1967)/ Krupiczka, R.
Analysis of thermal conductivity in granular material
Int. Chem. Eng., 7 (1967), pp. 122-144
- /Landoldt (1967)/ Landoldt-Boernstein:
Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie,
Geophysik und Technik
6. Auflage, Springer-Verlage, Berlin, 1967
- /Liebeman (1969)/ Liebeman, J.; Gebhart, B.
Interactions in natural convection from an array of heated elements,
experimental.
Int. J. Heat Mass Transfer, 12 (1969), pp. 1385-1396
- /Macdonald (1979)/ Macdonald, I. F.; EI-Sayed, M. S.; Mow, K.; Dullien, F. A. L.
Flow through packed columns- the Ergun equation revisited
Ind. Eng. Chem. Fundam., 18 (1979), pp. 199-208
- /Marsters (1972)/ Marsters, G. F.
Arrays of heated horizontal cylinders in natural convection
Int. J. Heat Mass Transfer, 15 (1972), pp. 921-933
- /McGeary (1961)/ McGeary, R. K.
Mechanical packing of spherical particles
J. of the American Ceramic Society, 44 (1961), pp. 513-522
- /Morgan (1975)/ Morgan, V. T.
The overall convective heat transfer from smooth circular cylinders
Advanced in Heat Transfer, 11 (1975), pp. 199-264

- /Müller (1999)/ Müller, U.; Ehrhard, P.
Freie Konvektion und Wärmeübertragung
C. F. Müller Verlag, Heidelberg, 1999
- /Nield (1992)/ Nield, D. A.; Bejan, A.
Convection in porous media
Springer-Verlag, New York, 1992
- /Schrock (1970)/ Schrock, V. E.; Fernandez, R. T.; Kesavan, K.
Heat transfer from cylinders embedded in a liquid filled porous
Medium
Proc. 4th int. Heat Transfer Conf., Paris, 7 (1970), CT 3.6
- /Streit (1996)/ Streit, D.
Freie Konvektion am horizontalen Rohr in einer Kies/Wasser-
Schüttung mit Bildung und Schmelzen von Eis
Dissertation, Universität Stuttgart, 1996
- /Tokura (1983)/ Tokura, I.; Saito, H.; Kishinami, K.; Muramoto, K.
An experimental Study of free convection heat transfer from a
horizontal cylinder in a vertical array set in free space between
parallel walls
ASME J. Heat Transfer, 105 (1983), pp. 102-107
- /VDE (1973)/ VDE/VDI-Richtlinien
Fortpflanzung von Fehlergrenzen bei Messung, Grundlagen.
VDE/VDI 2620, Blatt 1, Jan 1973
- /VDI (1997)/ VDI-Wärmeatlas
VDI-Verlag, Düsseldorf, 8 Auflage, 1997
- /Zehner (1970)/ Zehner, P.; Schlünder, E. U.
Wärmeleitfähigkeit von Schüttung bei mäßigen Temperaturen
Chemie-Ing. Technik, 42 (1970), pp. 933-941

11 Anhang

Anhang A: Zusammenstellung der Ergebnisse der Wärmeübergangsmessungen

Tabelle A.1: Ergebnisse der Messungen an Einzelrohren in Wasser bei verschiedenen Höhen H der Kühlplatte über dem Heizrohr

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{w1} [°C]	Ra _{Fl}	Nu _{Fl}	α [W/(m ² K)]
----------	----------------------------------	------------------------------	--------------------------	------------------	------------------	------------------------------------

H = 5D

EA01	4308,4	20,30	26,70	69647	9,464	673,2
EA02	12950,8	20,54	35,02	199872	12,425	894,4
EA03	36824,1	21,65	51,08	596471	17,008	1251,2
EA04	23623,6	21,08	42,86	367293	14,903	1084,6
EA05	7071,5	20,34	29,60	109834	10,691	763,7
EA06	2110,2	19,96	23,84	38205	7,682	543,9
EA07	753,3	19,93	21,73	16509	5,930	418,5

H = 15D

EB01	4282,2	20,35	26,87	71424	9,230	656,8
EB02	12688,7	20,63	35,22	202889	12,077	869,7
EB03	36824,1	21,75	52,79	651557	16,091	1186,3
EB04	23561,2	21,19	44,27	402488	13,999	1020,8
EB05	757,1	20,10	21,87	16405	6,058	427,7

H = 20D

EC01	23498,8	21,31	43,83	389985	14,315	1043,5
EC02	7271,2	20,43	30,24	118781	10,366	741,2
EC03	2095,9	20,20	24,03	38238	7,724	547,2
EC04	12857,2	20,98	35,69	208848	12,124	874,0
EC05	36387,2	22,39	53,43	667575	15,877	1172,3
EC06	4294,7	21,25	27,94	77664	8,997	642,0
EC07	778,9	21,14	22,90	17465	6,249	442,6

H=30D

ED01	2437,3	20,17	24,50	43842	7,940	562,9
ED02	7052,8	20,48	30,20	117725	10,148	725,6
ED03	11003,6	20,69	34,21	183473	11,316	813,9
ED04	26263,9	21,95	46,48	455744	14,629	1070,7
ED05	37011,6	22,66	53,71	674708	16,134	1192,0
ED06	17681,9	21,19	40,21	302726	12,815	929,6
ED07	4323,4	20,32	27,11	74852	8,946	636,7
ED08	569,7	20,16	21,54	12674	5,849	412,8
ED09	1328,2	20,16	22,88	26126	6,905	488,3

Tabelle A.2: Ergebnisse der Messungen an Einzelrohren in der Schüttung mit verschiedenen Kieszusammensetzungen (Kies16/32, Kies 8/16 und Kies 4/8)

a) Kies 16/32

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{w1} [°C]	Ra _{Fl}	Nu _{Fl}	Ra _S	Nu _S	Gr _{max}
E0301	4334,6	20,24	27,85	85553	7,995	155,40	2,597	206,60
E0302	10672,7	20,79	35,00	197302	10,430	360,54	3,409	525,41
E0303	25714,4	22,00	47,86	494849	13,563	913,47	4,477	1557,10
E0304	36512,0	22,62	55,11	723993	15,187	1343,42	5,040	2483,48
E0305	17382,2	21,22	40,96	319895	12,126	587,33	3,981	920,75
E0306	6834,3	20,45	30,59	124053	9,421	225,86	3,067	311,17
E0307	3061,4	20,09	25,72	59078	7,658	107,11	2,483	138,48
E0308	1329,4	20,08	23,06	28718	6,307	51,95	2,041	64,98
E0309	562,3	20,07	21,58	13844	5,277	25,01	1,705	30,71
E0310	2098,3	20,03	24,15	41068	7,190	74,36	2,328	94,22
E0311	14105,5	20,99	36,99	234680	12,207	429,55	3,996	642,05
E0312	14386,4	21,08	37,51	244608	12,114	447,92	3,967	674,22
E0313	22656,2	21,83	44,19	394701	13,885	726,67	4,572	1188,55
E0314	36730,5	22,69	52,97	649270	16,432	1203,16	5,445	2178,24
E0315	29459,3	22,26	49,05	527899	14,972	975,43	4,947	1688,37
E0316	8644,3	20,82	32,48	151712	10,330	276,70	3,369	391,61
E0317	5592,3	20,41	28,85	98178	9,285	178,50	3,019	240,70
E0318	755,8	20,00	21,97	18259	5,434	33,00	1,756	40,68
E0319	2268,1	20,15	24,19	40477	7,923	73,30	2,566	93,06
E0320	7021,5	20,49	29,76	110924	10,599	201,83	3,449	275,43
E0321	36137,5	22,73	52,10	619927	16,684	1148,16	5,526	2061,16
E0322	19005,0	21,53	40,50	306359	13,799	562,42	4,530	880,21
E0323	548,0	19,98	21,48	13664	5,178	24,68	1,673	30,23
E0324	1323,2	20,06	22,91	27312	6,566	49,40	2,124	61,66
E0325	8925,2	20,64	32,20	148568	10,765	270,87	3,510	381,27
E0326	36418,4	22,63	53,13	655221	16,173	1214,26	5,360	2200,58
E0327	23217,9	21,77	44,46	402346	14,019	740,85	4,616	1214,53
E0328	3108,2	20,06	25,58	57619	7,932	104,45	2,571	134,76
E0329	571,7	20,00	21,58	14452	5,128	26,11	1,657	32,03

b) Kies 8/16

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{w1} [°C]	Ra _{Fl}	Nu _{Fl}	Ra _S	Nu _S	Gr _{max}
E0201	3135,7	20,14	26,27	65523	7,197	29,71	2,335	19,35
E0202	15135,3	20,78	39,04	280024	11,449	128,31	3,753	97,93
E0203	36699,3	21,92	54,70	715628	15,149	331,74	5,023	303,23
E0204	25776,9	21,32	47,36	486323	13,521	224,25	4,460	188,74
E0205	7084,0	20,33	31,33	136903	8,994	62,34	2,930	43,27
E0206	1373,1	19,99	23,57	34977	5,419	15,82	1,754	9,95
E0207	557,4	20,03	21,97	17999	4,069	8,13	1,315	5,01
E0208	363,9	20,01	21,50	13596	3,461	6,14	1,118	3,76
E0209	2090,2	20,00	24,40	44169	6,704	20,00	2,171	12,70
E0210	1054,2	20,02	22,79	26405	5,383	11,94	1,741	7,44
E0211	375,7	20,03	21,48	13231	3,672	5,98	1,187	3,66
E0212	5642,2	20,23	28,74	98166	9,295	44,61	3,021	29,97
E0213	18100,0	21,01	39,75	293846	13,325	134,74	4,371	103,94
E0214	36324,8	21,75	54,72	717768	14,911	332,70	4,944	303,65
E0215	29708,9	21,47	51,33	606017	13,523	280,22	4,473	246,32
E0216	17475,8	20,95	42,20	352054	11,311	161,71	3,716	128,13
E0217	10860,0	20,43	33,90	180100	11,219	82,19	3,662	58,87
E0218	7084,0	20,32	30,27	120206	9,958	54,69	3,241	37,47
E0219	14199,1	20,90	36,59	227367	12,539	104,00	4,103	77,29
E0220	4269,1	20,23	27,06	74977	8,784	34,03	2,851	22,40
E0221	10797,6	20,70	33,60	172343	11,647	78,64	3,802	56,31
E0222	17725,5	21,02	39,27	283011	13,408	129,72	4,396	99,54
E0223	36168,7	21,97	51,18	596896	16,822	276,07	5,566	243,55
E0224	25683,2	21,42	44,91	417430	14,978	192,17	4,932	157,69
E0225	7177,6	20,41	30,16	117724	10,297	53,56	3,351	36,69
E0226	2123,3	20,22	24,31	41228	7,325	18,67	2,372	11,88
E0227	1057,3	20,16	22,75	24771	5,773	11,20	1,867	6,99
E0228	386,0	20,12	21,46	12256	4,082	5,54	1,319	3,40

c) Kies 4/8

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{W1} [°C]	Ra _{Fl}	Nu _{Fl}	Ra _S	Nu _S	Gr _{max}
E0101	4166,1	20,18	28,53	95595	6,997	10,86	2,274	3,64
E0102	15447,4	20,58	40,92	324488	10,467	37,22	3,435	14,48
E0103	36356,0	21,70	55,23	736229	14,666	85,34	4,864	39,12
E0104	26338,6	21,20	48,51	520995	13,157	60,10	4,343	25,57
E0105	8769,1	20,32	34,29	188156	8,731	21,47	2,851	7,71
E0106	2663,8	20,22	27,19	76790	5,370	8,71	1,743	2,87
E0107	1364,4	20,06	24,98	50401	3,910	5,71	1,267	1,83
E0108	773,9	20,08	23,64	34963	3,071	3,96	0,994	1,25
E0109	217,2	20,05	21,56	13825	2,038	1,56	0,659	0,48
E0110	370,2	20,02	22,21	20476	2,393	2,31	0,774	0,72
E0111	5146,0	20,10	30,88	131663	6,673	14,98	2,173	5,16
E0112	3291,7	20,12	28,51	95829	5,503	10,88	1,788	3,64
E0113	2173,9	20,23	25,52	55407	5,788	6,28	1,876	2,03
E0114	629,1	20,24	22,90	25634	3,344	2,90	1,082	0,91
E0115	264,6	20,19	21,72	14152	2,450	1,60	0,792	0,49
E0116	4188,0	20,18	27,77	84976	7,747	9,65	2,516	3,20
E0117	7240,0	20,31	30,52	124180	9,915	14,13	3,228	4,85
E0118	15135,3	20,75	35,84	213812	13,914	24,43	4,550	8,98
E0119	22718,6	21,18	45,82	444193	12,620	51,15	4,158	21,14
E0120	35950,3	21,52	54,66	717570	14,686	83,14	4,868	37,83
E0121	17663,1	20,97	42,15	350657	11,470	40,27	3,769	15,95
E0122	2053,4	20,14	25,28	53286	5,629	6,04	1,825	1,94
E0123	1110,3	20,21	23,92	36922	4,225	4,18	1,368	1,32
E0124	665,3	20,24	23,01	26791	3,395	3,03	1,099	0,95
E0125	252,2	20,26	21,73	13634	2,430	1,54	0,785	0,47
E0126	3694,9	20,19	27,80	85300	6,816	9,68	2,214	3,21
E0127	10766,4	20,43	35,10	202339	10,195	23,10	3,331	8,39
E0128	16633,3	20,74	39,96	300948	11,940	34,50	3,916	13,30
E0129	23467,6	21,09	45,43	434305	13,204	49,99	4,349	20,55
E0130	36137,5	21,61	54,65	716477	14,806	83,01	4,908	37,80
E0131	5559,8	20,26	30,57	125396	7,540	14,27	2,455	4,90
E0132	8800,3	20,31	33,12	167253	9,571	19,07	3,122	6,76
E0133	14885,7	20,65	38,00	258682	11,869	29,61	3,887	11,15
E0134	25714,4	21,18	45,00	421929	14,791	48,56	4,870	19,89
E0135	36075,1	21,75	51,12	596890	16,693	69,00	5,522	30,35

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{W1} [°C]	Ra _{Fl}	Nu _{Fl}	Ra _S	Nu _S	Gr _{max}
E0136	4250,4	20,10	28,48	95575	7,114	10,85	2,312	3,63
E0137	2081,5	20,10	25,58	57273	5,350	6,49	1,735	2,09
E0138	759,6	20,04	23,18	30339	3,420	3,43	1,106	1,07
E0139	263,4	20,12	21,63	13891	2,471	1,57	0,799	0,48

Tabelle A.3: Ergebnisse der Messungen mit 3 Heizrohren in Wasser bzw. in der Schüttung mit verschiedenen Kieszusammensetzungen (Kies16/32, Kies 8/16 und Kies 4/8) für verschiedene Teilungsverhältnisse ($S/D = 10, 5$ und 3)

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{w1} [°C]	ϑ_{w2} [°C]	ϑ_{w3} [°C]
----------	----------------------------------	------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

S/D = 10, Wasser

D3001	627,9	20,16	21,90	21,91	21,67
D3002	1114,1	20,15	22,76	22,83	22,49
D3003	2251,9	20,43	24,85	25,08	24,35
D3004	3929,6	20,74	27,32	27,63	26,55
D3005	6815,6	21,45	31,25	31,66	29,95
D3006	10123,5	22,14	35,14	35,41	33,11
D3007	14698,4	23,10	40,21	40,88	37,00

S/D = 10, gefluteter Kies 16/32

D3301	611,1	20,20	21,71	22,00	22,02
D3302	1189,0	20,33	22,84	23,27	23,23
D3303	2239,4	20,55	24,49	25,16	25,02
D3304	3734,2	20,91	26,67	27,65	27,31
D3305	6328,7	21,37	30,13	31,38	30,77
D3306	10004,9	22,07	33,85	35,49	34,74
D3307	14567,4	22,90	38,14	39,42	39,28

S/D = 10, gefluteter Kies 8/16

D3201	600,7	20,20	22,11	22,37	22,34
D3202	1195,8	20,28	23,27	23,68	23,58
D3203	2262,5	20,54	25,18	25,77	25,48
D3204	3770,4	20,75	27,58	28,25	27,65
D3205	6409,9	21,22	31,16	31,95	30,82
D3206	9967,5	21,82	35,42	36,27	34,31
D3207	14804,5	22,75	41,48	41,49	39,30

S/D = 10, gefluteter Kies 4/8

D3101	587,7	20,55	23,00	23,55	23,56
D3102	1167,8	20,59	24,30	25,17	25,13
D3103	2235,7	20,63	26,12	27,51	27,36
D3104	3876,5	20,72	28,40	30,43	30,08
D3105	6378,7	21,01	31,45	34,20	33,47
D3106	9749,0	21,45	35,12	38,69	38,45
D3107	14710,9	21,83	39,81	44,34	44,79

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{W1} [°C]	ϑ_{W2} [°C]	ϑ_{W3} [°C]
----------	----------------------------------	------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

S/D = 5, Wasser

D2001	588,1	20,11	21,75	21,73	21,56
D2002	1134,7	20,24	22,93	22,94	22,59
D2003	2163,3	20,45	24,83	24,93	24,26
D2004	3739,2	20,80	27,25	27,37	26,37
D2005	6322,5	21,32	30,60	30,90	29,62
D2006	9905,1	22,02	34,75	35,29	32,83
D2007	14935,6	23,02	40,01	40,79	37,64

S/D = 5, gefluteter Kies 16/32

D2301	600,9	20,19	21,58	21,99	22,08
D2302	1165,3	20,29	22,56	23,16	23,29
D2303	2166,4	20,46	24,06	24,91	25,10
D2304	3919,0	20,75	26,27	27,45	27,68
D2305	6232,6	21,19	28,78	30,72	30,61
D2306	10004,9	21,90	32,27	35,01	34,82
D2307	15154,0	22,83	35,40	41,07	39,26

S/D = 5, gefluteter Kies 8/16

D2201	593,5	20,22	21,73	22,26	22,39
D2202	1145,3	20,35	22,66	23,52	23,56
D2203	2188,2	20,53	24,07	25,48	25,27
D2204	3784,1	20,75	26,06	28,14	27,46
D2205	6198,9	21,21	28,39	31,45	29,91
D2206	10004,9	21,79	31,41	35,92	33,30
D2207	14823,3	22,57	35,07	40,95	37,07

S/D = 5, gefluteter Kies 4/8

D2101	581,1	20,51	22,76	23,27	23,41
D2102	1140,9	20,54	24,10	24,98	25,02
D2103	2163,3	20,62	25,94	27,23	27,01
D2104	3772,3	20,72	28,26	30,09	29,49
D2105	6164,6	20,86	31,18	33,68	32,63
D2106	10092,3	21,21	35,33	38,70	37,02
D2107	14679,7	21,68	39,40	43,81	41,58

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{W1} [°C]	ϑ_{W2} [°C]	ϑ_{W3} [°C]
----------	----------------------------------	------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

S/D = 3, Wasser

D1001	598,4	20,14	21,75	21,86	21,80
D1002	1159,0	20,27	22,97	23,08	22,93
D1003	2238,2	20,49	24,84	25,06	24,68
D1004	3778,5	20,85	27,36	27,51	27,02
D1005	6121,5	21,39	30,72	31,08	29,96
D1006	9892,6	22,10	35,03	35,63	33,87
D1007	14991,8	23,09	40,76	41,51	38,50

S/D = 3, gefluteter Kies 8/16

D1201	600,9	20,25	21,89	22,45	22,65
D1202	1139,7	20,32	22,91	23,73	23,97
D1203	2198,8	20,50	24,63	25,88	26,12
D1204	3755,4	20,69	26,80	28,56	28,70
D1205	6291,3	21,04	29,93	32,36	32,26
D1206	9955,0	21,51	33,82	37,19	36,49
D1207	14779,6	22,21	38,50	42,90	41,03

S/D = 3, gefluteter Kies 4/8

D1101	603,7	20,41	22,69	23,61	23,95
D1102	1130,9	20,43	23,72	25,08	25,54
D1103	2198,8	20,42	25,36	27,38	27,95
D1104	3834,1	20,63	27,59	30,35	30,96
D1105	6316,3	20,91	30,46	34,12	34,58
D1106	10192,2	21,40	34,38	39,08	38,04
D1107	14748,4	21,94	38,60	44,26	45,30

Tabelle A.4: Ergebnisse der Messungen mit 7 Heizrohren in Wasser bzw. in der Schüttung mit verschiedenen Kieszusammensetzungen (Kies16/32, Kies 8/16 und Kies 4/8) für verschiedene Teilungsverhältnisse ($S/D = 10, 5$ und 3)

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{w1} [°C]	ϑ_{w2} [°C]	ϑ_{w3} [°C]	ϑ_{w4} [°C]	ϑ_{w5} [°C]	ϑ_{w6} [°C]	ϑ_{w7} [°C]
----------	----------------------------------	------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

S/D = 10, Wasser

S3001	616,2	20,23	22,14	22,44	22,15	22,41	22,28	22,30	22,40
S3002	1200,2	20,64	23,81	24,15	23,66	24,18	23,89	23,92	24,00
S3003	2330,5	21,11	26,10	26,68	25,99	26,73	26,15	26,41	26,43
S3004	3751,7	21,91	29,05	30,05	28,55	30,01	29,05	29,53	29,53
S3005	6297,5	23,13	33,25	33,85	32,57	34,66	33,20	33,80	33,87
S3006	9568,0	24,63	38,03	39,17	36,89	39,67	37,96	38,34	38,39
S3007	15366,3	27,30	45,77	47,44	43,76	47,87	45,36	46,21	45,85

S/D = 10, gefluteter Kies 16/32

S3301	638,5	20,29	22,07	22,56	22,73	22,42	22,50	22,43	22,61
S3302	1147,8	20,61	23,22	23,92	24,15	23,80	23,83	23,75	24,03
S3303	2254,4	21,29	25,45	26,61	26,89	26,48	26,48	26,26	26,85
S3304	3977,6	22,27	28,31	30,02	30,25	29,67	29,82	29,32	30,31
S3305	6409,9	23,52	31,99	34,01	34,43	33,86	33,95	33,31	34,42
S3306	9867,6	25,25	36,62	39,18	39,70	39,00	39,03	38,06	39,54
S3307	14835,7	27,44	42,49	45,78	46,09	45,67	46,60	44,24	45,99

S/D = 10, gefluteter Kies 8/16

S3201	619,6	20,33	22,38	23,01	23,12	22,74	23,01	22,69	22,97
S3202	1199,0	20,63	23,81	24,69	24,81	24,35	24,68	24,23	24,59
S3203	2286,8	21,20	26,10	27,30	27,35	26,89	27,26	26,68	27,11
S3204	3762,3	22,00	28,78	30,33	30,23	29,81	30,28	29,49	29,97
S3205	6478,5	23,31	33,03	35,01	34,63	34,36	34,92	33,83	34,25
S3206	10086,1	25,03	38,13	40,47	39,61	39,66	40,34	38,95	39,28
S3207	14629,8	27,11	44,15	46,26	44,70	45,68	46,44	44,62	44,87

S/D = 10, gefluteter Kies 4/8

S3101	570,6	20,78	23,27	24,29	24,57	23,75	24,22	23,52	23,99
S3102	1142,8	20,90	24,68	26,27	26,66	25,59	26,12	25,25	25,89
S3103	2198,8	21,26	26,73	29,11	29,67	28,24	28,72	27,76	28,51
S3104	3681,8	21,71	29,17	32,48	33,31	31,43	31,88	30,71	31,64
S3105	6391,2	22,67	32,85	37,24	38,35	35,90	36,08	34,96	35,92
S3106	9848,9	23,90	37,03	42,50	43,78	40,99	40,88	39,77	40,70
S3107	14735,9	25,44	42,39	48,86	49,29	47,43	46,57	45,71	46,69

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{W1} [°C]	ϑ_{W2} [°C]	ϑ_{W3} [°C]	ϑ_{W4} [°C]	ϑ_{W5} [°C]	ϑ_{W6} [°C]	ϑ_{W7} [°C]
----------	----------------------------------	------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

S/D = 5, Wasser

S2001	583,2	20,30	22,23	22,31	22,07	22,32	22,11	22,17	22,11
S2002	1134,7	20,64	23,67	23,84	23,40	23,83	23,63	23,73	23,57
S2003	2130,8	21,20	26,01	26,16	25,56	26,30	25,99	25,99	25,52
S2004	3742,3	21,95	28,98	29,29	28,15	29,53	29,04	28,87	28,27
S2005	6310,0	23,14	33,39	33,54	32,17	33,95	33,29	33,05	32,55
S2006	9780,2	24,84	38,49	38,92	36,41	39,57	38,06	38,03	37,78
S2007	14910,6	27,89	45,47	45,80	42,84	46,65	44,64	45,22	43,93

S/D = 5, gefluteter Kies 16/32

S2301	580,8	20,32	21,83	22,48	22,61	22,22	22,29	22,09	22,34
S2302	1140,3	20,61	23,02	24,23	24,14	23,63	23,64	23,46	23,76
S2303	2216,3	21,12	24,96	26,42	26,60	25,93	25,89	25,69	26,04
S2304	3857,8	21,87	27,43	29,64	29,68	28,98	28,78	28,57	28,93
S2305	6335,0	23,01	30,61	33,99	33,60	33,00	32,51	32,31	32,63
S2306	10104,8	24,63	35,42	39,64	38,55	38,39	37,41	37,09	37,55
S2307	14486,2	26,55	40,35	45,15	44,03	43,82	42,22	42,21	43,08

S/D = 5, gefluteter Kies 8/16

S2201	600,7	20,39	22,00	22,82	23,07	22,45	22,78	22,25	22,77
S2202	1139,7	20,63	23,03	24,27	24,48	23,78	24,14	23,47	24,18
S2203	2187,6	21,07	24,78	26,70	26,74	26,05	26,32	25,52	26,48
S2204	3800,4	21,74	27,07	29,86	29,50	29,05	29,18	28,21	29,43
S2205	6297,5	22,85	30,03	34,17	33,11	33,25	33,13	31,83	33,47
S2206	10154,7	24,34	34,01	39,74	37,59	38,62	38,24	36,48	38,65
S2207	14642,3	25,97	37,90	45,53	42,61	44,34	43,43	41,19	44,11

S/D = 5, gefluteter Kies 4/8

S2101	579,5	20,61	23,09	24,29	24,70	23,36	23,93	23,23	23,93
S2102	1100,4	20,67	24,24	25,93	26,30	24,66	25,26	24,44	25,30
S2103	2180,1	20,91	26,29	28,82	28,92	27,03	27,49	26,59	27,54
S2104	3840,9	21,26	28,90	32,46	32,09	29,99	30,20	29,42	30,34
S2105	6229,5	21,88	32,31	37,18	35,92	33,92	33,62	33,04	33,88
S2106	9649,2	22,80	36,19	42,57	40,05	38,16	37,33	37,10	37,91
S2107	14929,4	24,56	42,03	50,05	45,68	45,07	43,28	43,29	44,12

Vers.Nr.	\dot{q} [W/m ²]	ϑ_{∞} [°C]	ϑ_{W1} [°C]	ϑ_{W2} [°C]	ϑ_{W3} [°C]	ϑ_{W4} [°C]	ϑ_{W5} [°C]	ϑ_{W6} [°C]	ϑ_{W7} [°C]
----------	----------------------------------	------------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------

S/D = 3, Wasser

S1001	577,1	20,32	22,21	22,23	22,13	22,25	22,15	22,13	22,14
S1002	1112,8	20,61	23,74	23,85	23,53	23,88	23,62	23,59	23,70
S1003	2178,9	21,09	26,29	26,36	25,91	26,48	26,09	25,95	26,12
S1004	3889,6	21,88	29,75	29,92	28,83	30,15	29,43	29,34	29,53
S1005	6453,6	23,07	33,78	34,01	32,64	34,18	33,42	33,20	33,37
S1006	10073,6	24,63	39,28	39,47	37,72	40,18	38,32	38,66	38,61
S1007	14767,1	26,45	44,72	45,42	42,66	46,04	44,05	43,68	44,37

S/D = 3, gefluteter Kies 8/16

S1201	586,3	20,29	21,98	22,86	23,28	22,06	22,75	21,96	22,75
S1202	1141,5	20,49	23,15	24,43	25,00	23,30	24,24	23,16	24,24
S1203	2183,9	20,90	25,12	26,93	27,63	25,30	26,55	25,08	26,53
S1204	3864,0	21,49	27,81	30,32	31,02	28,07	29,71	27,76	29,56
S1205	6285,1	22,44	31,35	34,75	35,18	31,61	33,73	31,34	33,51
S1206	10042,4	23,66	35,90	40,30	40,17	36,02	38,82	36,03	38,42
S1207	14773,3	25,50	41,27	47,01	45,89	41,11	44,89	41,52	43,92

S/D = 3, gefluteter Kies 4/8

S1101	596,6	20,45	22,84	24,25	25,17	23,16	24,08	23,05	24,28
S1102	1152,2	20,55	23,90	25,93	27,17	24,50	25,58	24,20	25,89
S1103	2224,4	20,79	25,66	28,56	30,24	26,68	27,88	26,10	28,34
S1104	3767,3	21,27	27,93	31,69	33,75	29,40	30,54	28,45	31,18
S1105	6372,4	22,10	31,34	36,24	39,01	33,43	34,40	32,00	35,25
S1106	9979,9	23,17	35,54	41,61	44,84	38,22	39,18	36,43	40,03
S1107	15197,7	24,65	41,02	48,37	53,08	43,94	45,04	42,15	46,24

Anhang B: Näherungsweise Berechnung der Zuströmtemperatur

Für das unterste Rohr ist die Zuströmtemperatur gleich der des ungestörten Wassers:

$$\vartheta_{zu1} = \vartheta_{\infty} \quad (\text{B.1})$$

Als Zuströmtemperatur ϑ_{zu2} zum Rohr 2 wird die Temperatur oberhalb des Rohres 1 (in der Mitte von Rohr 1 und 2) eingesetzt. Dies wird anhand der gemessenen Temperaturverteilung oberhalb des Einzelrohres (siehe Bild 6.6) wie folgt berechnet:

$$\frac{\vartheta_{zu2} - \vartheta_{zu1}}{\vartheta_{w1} - \vartheta_{zu1}} = \Theta_{x=S/2} \quad (\text{B.2})$$

$$\vartheta_{zu2} = \vartheta_{zu1} + \Theta_{x=S/2} (\vartheta_{w1} - \vartheta_{zu1}) \quad (\text{B.3})$$

$\Theta_{x=S/2}$ wird aus Bild 6.6 abgelesen. $\vartheta_{zu1} = \vartheta_{\infty}$ und ϑ_{w1} sind gemessene Werte.

Aus gleicher Überlegung wird ϑ_{zu3} wie folgt berechnet:

$$\frac{\vartheta_{zu3} - \vartheta_{zu2}}{\vartheta_{w2} - \vartheta_{zu2}} = \Theta_{x=S/2} \quad (\text{B.4})$$

$$\vartheta_{zu3} = \vartheta_{zu2} + \Theta_{x=S/2} (\vartheta_{w2} - \vartheta_{zu2}) \quad (\text{B.5})$$

Mit der seitlichen Zuströmung (ϑ_{zu2}) wird ϑ_{zu4} wie folgt berechnet:

$$\vartheta_{zu4} = \frac{\vartheta_{zu2} + \vartheta_{\infty}}{2} \quad (\text{B.6})$$

Unter Betrachtung der seitlichen kühleren Zuströmung ϑ_{∞} wird ϑ_{zu5} wie folgt berechnet:

$$\frac{\vartheta_{zu5} - \frac{\vartheta_{\infty} + \vartheta_{zu4}}{2}}{\vartheta_{w4} - \vartheta_{zu4}} = \Theta_{x=S/2} \quad (\text{B.7})$$

$$\vartheta_{zu5} = \frac{\vartheta_{\infty} + \vartheta_{zu4}}{2} + \Theta_{x=S/2} (\vartheta_{w4} - \vartheta_{zu4}) \quad (\text{B.8})$$

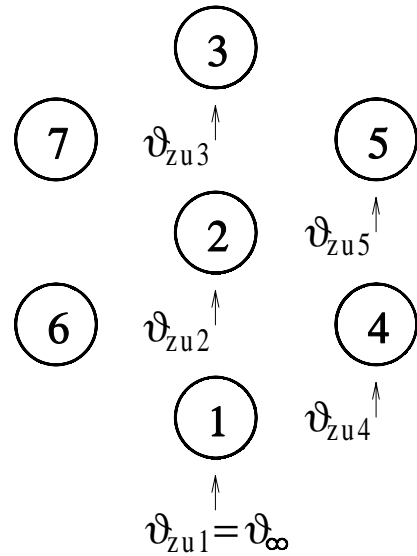


Bild B.1: Skizze zur Darstellung der Bezeichnung der Anströmtemperatur

Anhang C: Gleichungen zur Berechnung der Nusselt-Zahl Nu_{Fl} aus der Wärmestromdichte. Die aus Messungen erhaltenen Nusselt-Zahlen Nu_{Fl} des Einzelrohres (siehe Bild C.1) sowohl in reinem Wasser als auch in der Kies/Wasser-Schüttung können im ganzen Bereich der Wärmestromdichte \dot{q} durch den Potenzansatz der Wärmestromdichte gut beschrieben werden:

$$Nu_{Fl} = C_1 \dot{q}^{C_2} \quad (C.1)$$

Die Wärmestromdichte ist dabei in W/m^2 einzusetzen. Die Konstanten C_1 und C_2 sind in Tabelle C.1 aufgelistet. Die mittlere und maximale Abweichung der Meßwerte von den nach Gl. (C.1) berechneten Werten sind auch in der Tabelle enthalten.

Medium	C_1	C_2	Mittlere Abweichung	Maximale Abweichung
Wasser	1,2010	0,2434	2,20 %	3,94 %
Kies 16/32	0,9187	0,2698	3,34 %	9,13 %
Kies 8/16	0,6110	0,3104	5,87 %	11,2 %
Kies 4/8	0,2653	0,3897	6,66 %	23,2 %

Tabelle C.1: Konstanten C_1 und C_2 der Gleichung (C.1) und die mittlere und maximale Abweichung

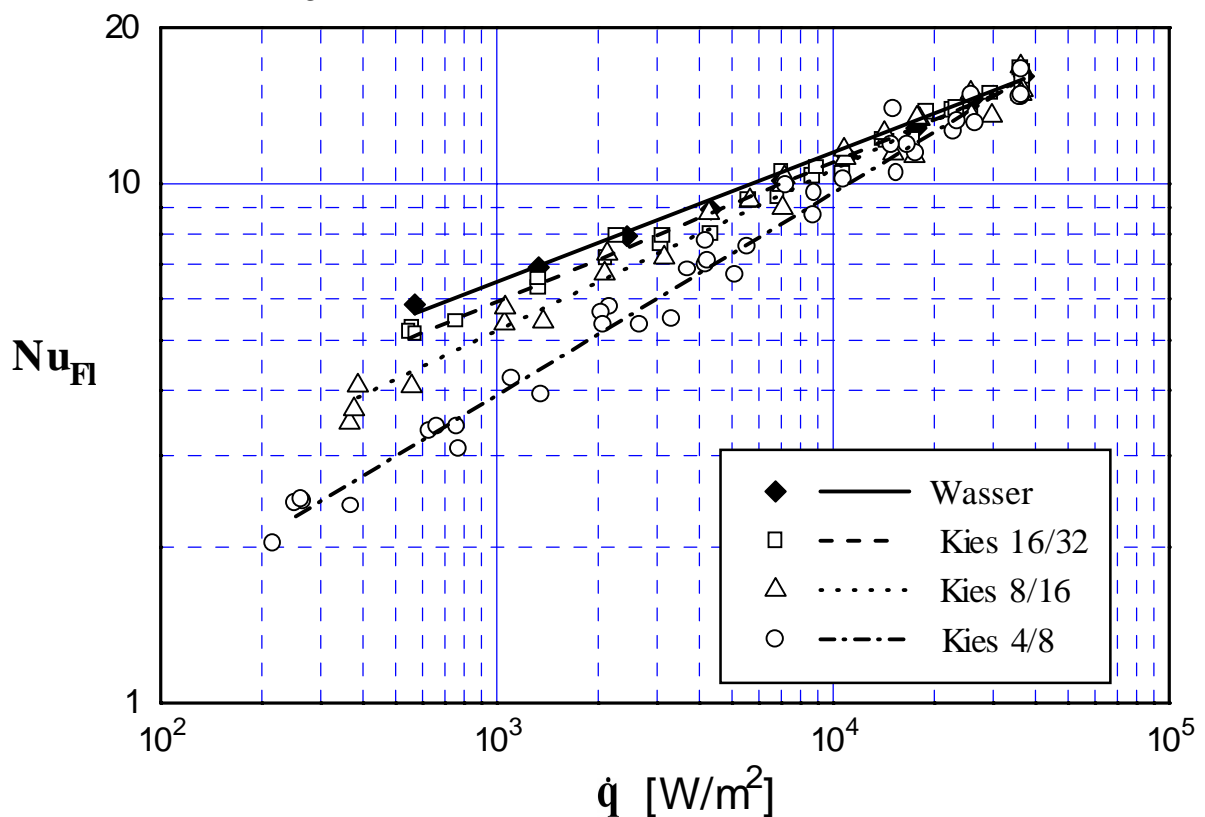


Bild C.1: Nusselt-Zahlen Nu_{Fl} am Einzelrohr in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte

Anhang D: Gleichungen zur Berechnung der Nusselt-Zahl Nu_S aus der Wärmestromdichte
 Die Nusselt-Zahlen Nu_S des Einzelrohres (siehe Bild D.1) in der Kies/Wasser-Schüttung können im ganzen Bereich der Wärmestromdichte \dot{q} durch den Potenzansatz der Wärmestromdichte gut beschrieben werden:

$$Nu_S = C_1 \dot{q}^{C_2} \tag{D.1}$$

Die Wärmestromdichte ist dabei in W/m^2 einzusetzen. Die Konstanten C_1 und C_2 sind in Tabelle D.1 aufgelistet. Die mittlere und maximale Abweichung der Meßwerte von den nach Gl. (D.1) berechneten Werten sind auch in der Tabelle enthalten.

Medium	C_1	C_2	Mittlere Abweichung	Maximale Abweichung
Kies 16/32	0,2843	0,2759	3,44 %	9,37 %
Kies 8/16	0,1920	0,3149	5,69 %	10,7 %
Kies 4/8	0,0832	0,3944	6,55 %	22,8 %

Tabelle D.1: Konstanten C_1 und C_2 der Gleichung (D.1) und die mittlere und maximale Abweichung

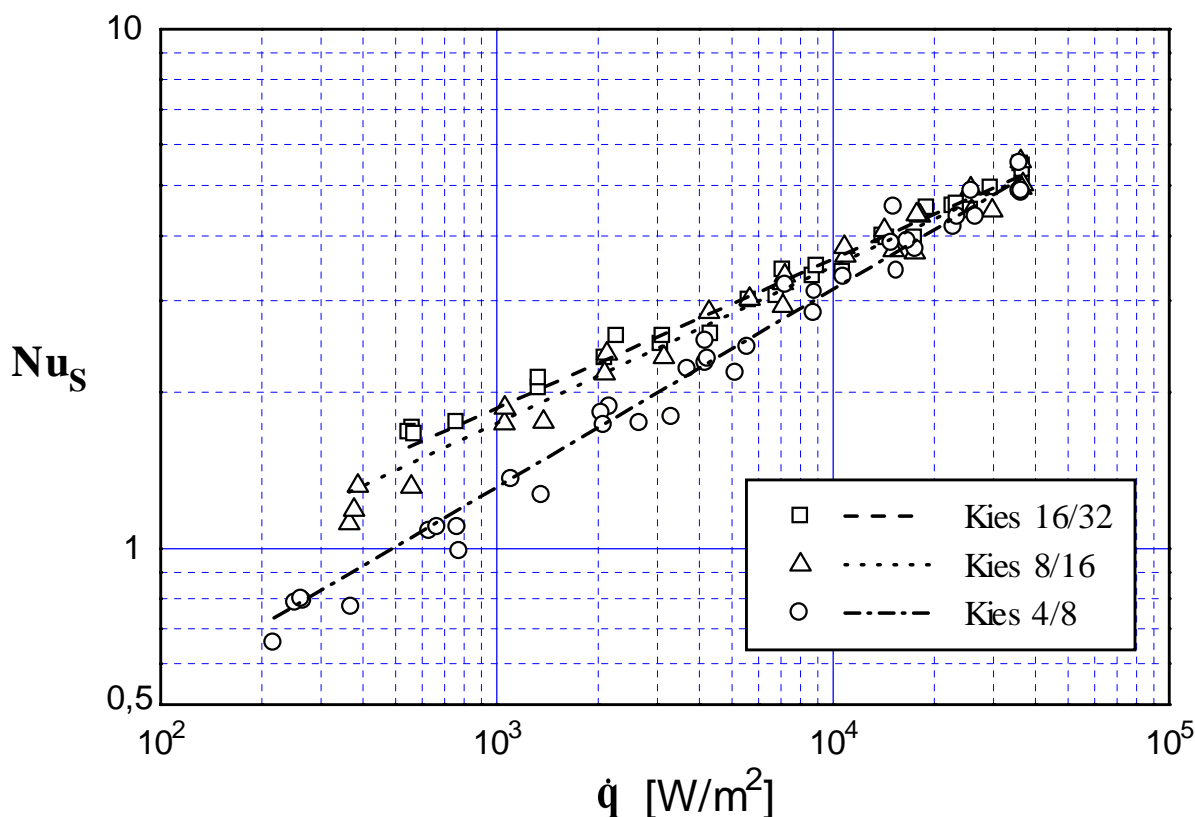


Bild D.1: Nusselt-Zahlen Nu_S am Einzelrohr in der Schüttung in Abhängigkeit von der Wärmestromdichte

Anhang E: Berechnete Ergebnisse der Nusselt-Zahl-Verhältnisse bezogen auf die jeweilige Anströmtemperatur

Tabelle E.1: 3 Heizrohre

Vers.Nr.	Nu_1/Nu_0	Nu_2/Nu_0	Nu_3/Nu_0	Nu_m/Nu_0
----------	-------------	-------------	-------------	-------------

S/D = 10, Wasser

D3001	0,887	1,007	1,277	1,057
D3002	0,911	1,010	1,264	1,062
D3003	0,913	0,983	1,286	1,061
D3004	0,931	1,005	1,313	1,083
D3005	0,942	1,018	1,348	1,103
D3006	0,952	1,048	1,395	1,132
D3007	0,952	1,019	1,448	1,140

S/D = 10, gefluteter Kies 16/32

D3301	1,105	1,296	1,481	1,294
D3302	1,079	1,291	1,527	1,299
D3303	1,088	1,295	1,574	1,319
D3304	1,077	1,270	1,595	1,314
D3305	1,036	1,239	1,569	1,281
D3306	1,069	1,258	1,567	1,298
D3307	1,080	1,321	1,502	1,301

S/D = 10, gefluteter Kies 8/16

D3201	1,000	1,396	1,645	1,347
D3202	1,025	1,414	1,720	1,386
D3203	1,022	1,405	1,795	1,407
D3204	0,984	1,373	1,826	1,394
D3205	0,969	1,330	1,851	1,383
D3206	0,954	1,264	1,845	1,354
D3207	0,902	1,176	1,605	1,228

S/D = 10, gefluteter Kies 4/8

D3101	1,065	1,684	1,915	1,554
D3102	1,067	1,638	1,943	1,549
D3103	1,069	1,563	1,951	1,528
D3104	1,065	1,493	1,952	1,503
D3105	1,057	1,429	1,960	1,482
D3106	1,040	1,343	1,671	1,351
D3107	1,010	1,229	1,408	1,216

Vers.Nr,	Nu ₁ /Nu ₀	Nu ₂ /Nu ₀	Nu ₃ /Nu ₀	Nu _m /Nu ₀
----------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

S/D = 5, Wasser

D2001	0,896	1,039	1,257	1,064
D2002	0,896	1,019	1,278	1,065
D2003	0,894	0,994	1,283	1,057
D2004	0,915	1,019	1,320	1,085
D2005	0,941	1,028	1,296	1,088
D2006	0,957	1,029	1,397	1,128
D2007	0,970	1,032	1,377	1,126

S/D = 5, gefluteter Kies 16/32

D2301	1,186	1,337	1,495	1,339
D2302	1,176	1,363	1,520	1,353
D2303	1,164	1,375	1,526	1,355
D2304	1,166	1,385	1,546	1,366
D2305	1,185	1,307	1,578	1,357
D2306	1,218	1,282	1,526	1,342
D2307	1,353	1,150	1,498	1,334

S/D = 5, gefluteter Kies 8/16

D2201	1,255	1,426	1,595	1,426
D2202	1,289	1,418	1,751	1,486
D2203	1,311	1,385	1,911	1,536
D2204	1,271	1,325	2,004	1,533
D2205	1,316	1,294	2,194	1,601
D2206	1,360	1,241	2,166	1,589
D2207	1,364	1,191	2,003	1,519

S/D = 5, gefluteter Kies 4/8

D2101	1,152	2,243	2,051	1,815
D2102	1,097	1,987	2,110	1,731
D2103	1,081	1,886	2,294	1,754
D2104	1,068	1,749	2,397	1,738
D2105	1,048	1,582	2,336	1,656
D2106	1,029	1,383	2,089	1,500
D2107	1,024	1,204	1,698	1,309

Vers.Nr,	Nu ₁ /Nu ₀	Nu ₂ /Nu ₀	Nu ₃ /Nu ₀	Nu _m /Nu ₀
----------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

S/D = 3, Wasser

D1001	0,925	0,980	1,088	0,998
D1002	0,907	0,990	1,122	1,006
D1003	0,924	0,996	1,173	1,031
D1004	0,913	1,012	1,175	1,034
D1005	0,913	0,991	1,217	1,040
D1006	0,941	1,007	1,260	1,069
D1007	0,935	0,996	1,301	1,077

S/D = 3, gefluteter Kies 8/16

D1201	1,165	1,337	1,423	1,308
D1202	1,145	1,339	1,462	1,316
D1203	1,127	1,316	1,494	1,312
D1204	1,098	1,272	1,502	1,291
D1205	1,072	1,215	1,481	1,256
D1206	1,056	1,132	1,427	1,205
D1207	1,040	1,042	1,327	1,136

S/D = 3, gefluteter Kies 4/8

D1101	1,164	1,683	1,658	1,501
D1102	1,181	1,651	1,682	1,505
D1103	1,178	1,602	1,709	1,496
D1104	1,169	1,546	1,725	1,480
D1105	1,151	1,453	1,717	1,440
D1106	1,127	1,331	1,868	1,442
D1107	1,093	1,188	1,268	1,183

Tabelle E.2: 7 Heizrohre

Vers.Nr.	Nu ₁ /Nu ₀	Nu ₂ /Nu ₀	Nu ₃ /Nu ₀	Nu ₄ /Nu ₀	Nu ₅ /Nu ₀	Nu _m /Nu ₀
----------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

S/D = 10, Wasser

S3001	0,796	0,771	1,061	0,760	0,845	0,834
S3002	0,792	0,805	1,122	0,781	0,896	0,867
S3003	0,828	0,832	1,128	0,801	0,939	0,896
S3004	0,825	0,808	1,201	0,792	0,938	0,899
S3005	0,855	0,906	1,211	0,822	0,971	0,937
S3006	0,879	0,900	1,264	0,863	1,009	0,969
S3007	0,901	0,908	1,303	0,883	1,040	0,994

S/D = 10, gefluteter Kies 16/32

S3301	0,967	1,032	1,351	0,936	1,149	1,074
S3302	1,010	1,082	1,425	0,968	1,203	1,123
S3303	1,033	1,086	1,463	0,976	1,196	1,132
S3304	1,071	1,109	1,539	1,031	1,211	1,172
S3305	1,075	1,150	1,536	1,035	1,233	1,185
S3306	1,088	1,154	1,506	1,059	1,238	1,192
S3307	1,096	1,131	1,457	1,054	1,163	1,160

S/D = 10, gefluteter Kies 8/16

S3201	0,951	1,069	1,669	0,994	1,200	1,154
S3202	0,964	1,112	1,762	1,019	1,256	1,198
S3203	0,973	1,145	1,870	1,031	1,296	1,235
S3204	0,986	1,158	1,929	1,049	1,317	1,258
S3205	0,993	1,153	1,903	1,057	1,321	1,258
S3206	0,991	1,118	1,779	1,051	1,272	1,219
S3207	0,975	1,080	1,604	1,028	1,185	1,155

S/D = 10, gefluteter Kies 4/8

S3101	1,028	1,255	2,309	1,205	1,511	1,432
S3102	1,032	1,229	2,282	1,140	1,518	1,409
S3103	1,060	1,220	2,222	1,116	1,594	1,418
S3104	1,060	1,182	2,048	1,080	1,566	1,369
S3105	1,081	1,181	1,940	1,085	1,604	1,368
S3106	1,083	1,151	1,788	1,063	1,548	1,321
S3107	1,064	1,100	1,708	1,022	1,422	1,251

Vers.Nr.	Nu ₁ /Nu ₀	Nu ₂ /Nu ₀	Nu ₃ /Nu ₀	Nu ₄ /Nu ₀	Nu ₅ /Nu ₀	Nu _m /Nu ₀
----------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

S/D = 5, Wasser

S2001	0,756	0,825	1,117	0,797	0,959	0,887
S2002	0,794	0,852	1,185	0,815	0,963	0,913
S2003	0,803	0,883	1,195	0,829	1,008	0,936
S2004	0,836	0,905	1,288	0,861	1,038	0,975
S2005	0,845	0,940	1,283	0,887	1,038	0,988
S2006	0,876	0,951	1,384	0,905	1,064	1,022
S2007	0,925	1,007	1,417	0,947	1,146	1,076

S/D = 5, gefluteter Kies 16/32

S2301	1,065	1,039	1,535	1,048	1,325	1,198
S2302	1,089	0,987	1,737	1,072	1,402	1,251
S2303	1,107	1,113	1,682	1,076	1,435	1,275
S2304	1,140	1,106	1,721	1,076	1,461	1,292
S2305	1,191	1,078	1,723	1,084	1,471	1,300
S2306	1,170	1,064	1,662	1,094	1,425	1,276
S2307	1,179	1,059	1,441	1,096	1,338	1,221

S/D = 5, gefluteter Kies 8/16

S2201	1,186	1,140	1,677	1,207	1,309	1,291
S2202	1,235	1,171	1,882	1,212	1,395	1,357
S2203	1,249	1,167	2,068	1,194	1,454	1,397
S2204	1,267	1,156	2,239	1,174	1,480	1,424
S2205	1,325	1,125	2,284	1,151	1,449	1,419
S2206	1,357	1,098	2,170	1,142	1,379	1,381
S2207	1,406	1,055	1,775	1,119	1,270	1,288

S/D = 5, gefluteter Kies 4/8

S2101	1,043	1,344	2,692	1,436	1,623	1,600
S2102	1,069	1,370	3,167	1,445	1,788	1,725
S2103	1,073	1,331	3,800	1,405	1,979	1,853
S2104	1,064	1,262	4,012	1,343	2,065	1,879
S2105	1,041	1,152	3,663	1,256	2,029	1,775
S2106	1,052	1,063	2,836	1,221	1,920	1,605
S2107	1,042	0,943	1,688	1,105	1,539	1,280

Vers.Nr.	Nu ₁ /Nu ₀	Nu ₂ /Nu ₀	Nu ₃ /Nu ₀	Nu ₄ /Nu ₀	Nu ₅ /Nu ₀	Nu _m /Nu ₀
----------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

S/D = 3, Wasser

S1001	0,766	0,865	1,062	0,817	0,934	0,885
S1002	0,758	0,832	1,090	0,797	0,918	0,873
S1003	0,755	0,847	1,086	0,801	0,924	0,877
S1004	0,769	0,851	1,174	0,803	0,936	0,896
S1005	0,823	0,907	1,224	0,867	0,996	0,954
S1006	0,834	0,923	1,221	0,857	1,029	0,964
S1007	0,886	0,944	1,286	0,905	1,045	1,002

S/D = 3, gefluteter Kies 8/16

S1201	1,112	1,056	1,375	1,409	1,150	1,237
S1202	1,116	1,092	1,453	1,383	1,211	1,264
S1203	1,096	1,112	1,531	1,365	1,269	1,287
S1204	1,080	1,103	1,580	1,326	1,295	1,286
S1205	1,065	1,065	1,572	1,289	1,280	1,263
S1206	1,062	1,027	1,486	1,259	1,252	1,228
S1207	1,066	0,955	1,267	1,225	1,188	1,159

S/D = 3, gefluteter Kies 4/8

S1101	1,102	1,251	1,719	1,438	1,317	1,369
S1102	1,173	1,287	1,805	1,464	1,440	1,439
S1103	1,202	1,300	1,836	1,445	1,557	1,477
S1104	1,207	1,304	1,846	1,414	1,657	1,500
S1105	1,192	1,262	1,662	1,354	1,676	1,454
S1106	1,163	1,182	1,451	1,274	1,571	1,355
S1107	1,126	1,058	1,048	1,189	1,351	1,187

LEBENS LAUF

Chang, Wen-Shih

geboren am 13. März 1967 in Tainan, Taiwan

Familienstand: verheiratet seit 1998 mit Ya-Ling Cheng, zwei Söhne

Schulbildung:	9,1973 ~ 6,1979	Grundschule in Tainan
	9,1979 ~ 6,1982	Mittelschule in Tainan
	9,1982 ~ 6,1985	Gymnasium in Tainan
Studium:	9,1985 ~ 6,1989	Universität Cheng-Kung in Tainan Fachrichtung: Maschinenbau
	9,1989 ~ 6,1991	Institut für Maschinenbau an der Universität Cheng-Kung in Tainan
Militärdienst:	7,1991 ~ 5,1993	Ingenieur im Arsenal
Sprachkurs:	4,1995 ~ 9,1995	Goethe-Institut in Mannheim
Berufspraxis:	6,1993 ~ 2,1995	Assistenzingenieur bei der Firma Nan-Ya für Plastik von Formosa-Konzern
	4,1996 ~ 4,2001	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart