

Laborversuch am Institut für Angewandte Thermo- und Fluiddynamik

Druckverlustmessungen

Versuchsdatum 03.12.2002

Inhalt

- 1 Zusammenstellung der Mess- und Rechenwerte
- 2 Darstellung der Rohrreibungszahl in Abhängigkeit der Reynoldszahl
- 3 Bestimmung der relativen Rauigkeit und der äquivalenten Sandrauigkeit
- 4 Darstellung des Formwiderstandsbeiwertes in Abhängigkeit der Reynoldszahl
- 5 Explizite Auswertung der Versuche 1 und 2 (nur Messung Nr. 3 abgebildet)
- 6 Diskussion und Literaturvergleich

Mess- und Auswertblätter zur Ermittlung der Rohrreibungszahl λ

h_A	t_A	p_s
mmHg	°C	Pa
	21	99650
p_A	f_A	T_A
Pa	%	K
	47	274

Konstanten: $T_0 = 273,15 \text{ K}$
 $R_i = 287,2 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
 $a = 0,76$
 $\alpha_D = f(\text{Re-Zahl})$
 $D = 125 \text{ mm}$
 $L_{I,II} = 3750 \text{ mm}$
 $\eta_0 = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

Handwritten note: Δp_{II} für Auswertung verdoppeln

Nr.	Δp_D	Δp_D	p_D	$\rho_{D,II}$	$\rho_{D,I}$	α_D	\dot{V}_D	\dot{m}_D
	mmWS	Pa	Pa	kg/m ³	kg/m ³		m ³ /s	kg/s
1	-22,5	-220,725	99429	1,177	1,172	0,98	0,2334	0,2735
2	-39,8	-390,438	99260	1,175	1,170	0,981	0,3110	0,3638
3	-61,6	-604,296	99046	1,172	1,167	0,981	0,3874	0,4522
4	-89,1	-874,071	98776	1,169	1,164	0,982	0,4670	0,5436
5	-121,5	-1191,915	98458	1,165	1,160	0,982	0,5462	0,6338
6	-155,3	-1523,493	98127	1,162	1,156	0,982	0,6186	0,7153
7	-194,0	-1903,14	97747	1,157	1,152	0,983	0,6935	0,7987
8	-221,5	-2172,915	97477	1,154	1,149	0,983	0,7420	0,8523
9	-255,5	-2506,455	97144	1,150	1,145	0,9835	0,7987	0,9143
10	-295,4	-2897,874	96752	1,145	1,140	0,983	0,8601	0,9806
Nr.	Δp_I	Δp_I	p_I	$\Delta p_{I,II}$	$\Delta p_{I,II}$	Δp_{II}	p_{II}	
	mbar	Pa	Pa	mbar	Pa	Pa	Pa	
1	-1,55	-310	99340	-1,01	101	-411	99239	
2	-2,66	-532	99118	-1,79	179	-711	98939	
3	-4,07	-814	98836	-2,58	258	-1072	98578	
4	-5,82	-1164	98486	-3,61	361	-1525	98125	
5	-7,8	-1560	98090	-4,83	483	-2043	97607	
6	-10,10	-2020	97630	-6,27	627	-2647	97003	
7	-12,40	-2480	97170	-7,54	754	-3234	96416	
8	-14,45	-2890	96760	-8,67	867	-3757	95893	
9	-16,62	-3324	96326	-9,98	998	-4322	95328	
10	-18,60	-3720	95930	-11,20	1120	-4840	94810	

Nr.	ρ_{Itr}	ρ_{IItr}	$\rho_{I\tau}$	$\rho_{II\tau}$	$\rho_{II\tau}$
	kg/m ³				
1	1,1759	1,1747	1,1707	1,1695	1,1701
2	1,1733	1,1712	1,1681	1,1659	1,1670
3	1,1699	1,1669	1,1647	1,1617	1,1632
4	1,1658	1,1615	1,1606	1,1563	1,1584
5	1,1611	1,1554	1,1559	1,1502	1,1530
6	1,1557	1,1482	1,1504	1,1430	1,1467
7	1,1502	1,1413	1,1450	1,1361	1,1405
8	1,1454	1,1351	1,1401	1,1299	1,1350
9	1,1402	1,1284	1,1350	1,1232	1,1291
10	1,1355	1,1223	1,1303	1,1171	1,1237

Nr.	$c_{m,II}$	η	ν	Re	λ
	m/s	Pa·s	m ² /s		
1	19,05	$1,8196 \cdot 10^{-5}$	$1,555 \cdot 10^{-5}$	153445	$15,86 \cdot 10^{-3}$
2	25,41	"	1,559 "	203675	15,84 "
3	31,68	"	1,564 "	253114	14,74 "
4	38,24	"	1,571 "	304308	14,21 "
5	44,79	"	1,578 "	354780	13,92 "
6	50,83	"	1,587 "	400425	14,11 "
7	57,07	"	1,595 "	447129	13,53 "
8	61,19	"	1,603 "	477107	13,60 "
9	65,98	"	1,612 "	511797	13,53 "
10	71,11	"	1,619	548916	13,14 "

Mess- und Auswertblätter zur Ermittlung des Formwiderstandbeiwertes ζ_F

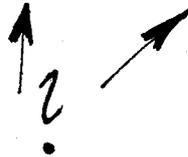
Konstanten :

h_A	t_A	p_A
mmHg	°C	Pa
	21	99650
p_A	f_A	T_A
Pa	%	K
	47	274

$T_0 = 273,15 \text{ K}$
 $R_i = 287,2 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$
 $a = 0,76$
 $\alpha_D = f(\text{Re-Zahl})$
 $D = 125 \text{ mm}$
 $L_I = 250 \text{ mm}$
 $L_{II} = 3500 \text{ mm}$
 $\eta_0 = 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$
 $S R/D = 1,0$

Nr.	Δp_D	Δp_D	p_D	ρ_{Dtr}	ρ_{Df}	α_D	\dot{V}_D	\dot{m}_D
	mmWS	Pa	Pa	kg/m ³	kg/m ³		m ³ /s	kg/s
1	-22,6	-221,706	99428	1,177	1,172	0,98	0,2340	0,2741
2	-37,9	-389,457	99261	1,175	1,170	0,981	0,3107	0,3634
3	-62,8	-616,068	99034	1,172	1,167	0,981	0,3912	0,4565
4	-89,8	-880,438	98769	1,169	1,164	0,982	0,4689	0,5457
5	-121,3	-1189,953	98460	1,165	1,160	0,982	0,5458	0,6333
6	-158,9	-1558,809	98091	1,161	1,156	0,982	0,6259	0,7234
7	-194,7	-1940,007	97740	1,157	1,152	0,983	0,6947	0,8002
8	-224,2	-2199,402	97451	1,154	1,148	0,983	0,7466	0,8574
9	-256,8	-2549,209	97131	1,150	1,145	0,9835	0,8008	0,9165
10	-294,2	-2886,102	96764	1,145	1,140	0,983	0,8583	0,9786
Nr.	Δp_I	Δp_I	p_I	Δp_{II}	Δp_{II}	Δp_{II}	p_{II}	
	mbar	Pa	Pa	mbar	Pa	Pa	Pa	
1	-1,54	-308	99342	1,86	186	-494	99156	
2	-2,70	-540	99110	3,18	318	-858	98792	
3	-4,20	-840	98810	5,05	505	-1345	98305	
4	-5,90	-1180	98470	7,16	716	-1896	97754	
5	-7,90	-1580	98070	9,75	975	-2555	97095	
6	-10,46	-2080	97570	12,8	1280	-3360	96290	
7	-12,65	-2530	97120	16,08	1608	-4138	95512	
8	-14,55	-2910	96740	18,85	1885	-4795	94855	
9	-16,65	-3330	96320	21,75	2175	-5505	94145	
10	-18,95	-3790	95860	25,5	2550	-6340	93310	

Nr.	ρ_{Itr} kg/m ³	ρ_{IItr} kg/m ³	ρ_{Irr} kg/m ³	ρ_{IIr} kg/m ³	ρ_{LIIr} kg/m ³	$c_{m,II}$ m/s	η Pa·s
1	1,1759	1,1737	1,1707	1,1685	1,1696	19,10	$1,8496 \cdot 10^{-5}$
2	1,1732	1,1694	1,1680	1,1642	1,1661	25,39	"
3	1,1696	1,1636	1,1644	1,1584	1,1614	32,03	"
4	1,1656	1,1571	1,1604	1,1519	1,1562	38,46	"
5	1,1609	1,1493	1,1557	1,1441	1,1499	44,88	"
6	1,1549	1,1398	1,1497	1,1346	1,1422	51,61	"
7	1,1496	1,1306	1,1444	1,1254	1,1349	57,45	"
8	1,1451	1,1228	1,1399	1,1176	1,1288	61,89	"
9	1,1402	1,1144	1,1349	1,1092	1,1221	66,56	"
10	1,1347	1,1045	1,1295	1,0993	1,1144	71,56	"
Nr.	v m ² /s	Re	λ	$\Delta p_{R,II}$ Pa	Δp_F Pa	K_V m ³ /h	ζ_F
1	$1,556 \cdot 10^{-5}$	153454	$29,07 \cdot 10^{-3}$	101	85	990	0,3985
2	1,560 "	203420	28,19 "	179	179	1027,5	0,3697
3	1,567 "	255553	28,26 "	258	247	970,3	0,4146
4	1,574 "	305490	27,91 "	361	355	969,7	0,4151
5	1,582 "	354491	28,07 "	483	492	958,5	0,4249
6	1,593 "	404966	28,05 "	627	653	953,7	0,4292
7	1,603 "	447919	28,62 "	754	854	925,3	0,4559
8	1,612 "	479940	29,06 "	867	1018	910,6	0,4708
9	1,622 "	513063	29,17 "	998	1177	908	0,4735
10	1,633 "	547833	29,79 "	1120	1430	882,5	0,5012



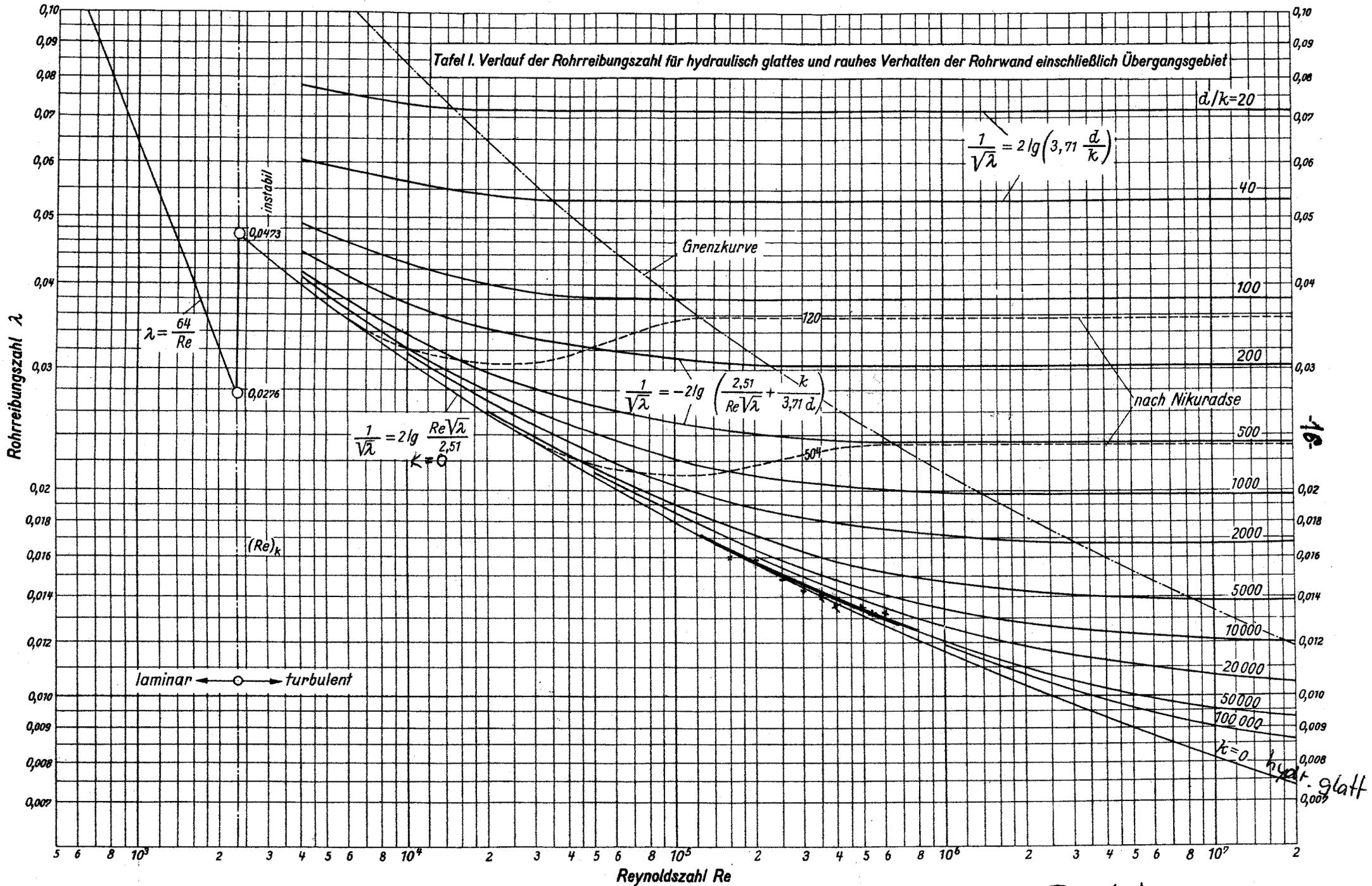


Bild 4

b) Darstellung der Reibungszahl λ in
Abhängigkeit der Re-Zahl

Ermittlung des Diagrammmaßstabs

λ : 1 Einheit (von 0,01 bis 0,1) $\hat{=}$ 142 mm

Re: 1 Einheit (von 10^3 bis 10^4) $\hat{=}$ 50 mm

Wertebatterie zur graphischen Darstellung der Versuchsergebnisse

Maße ab $\lambda = 0,01$ gemessen

λ	λ im Diagrammmaßstab	Re
0,015859	$\lg 1,5859 \cdot 142 \text{ mm} = 28,4 \text{ mm}$	$1,5 \cdot 10^5$
0,015842	$\lg 1,5842 \cdot 142 \text{ mm} = 28,3 \text{ mm}$	$2 \cdot 10^5$
0,014737	$\lg 1,4737 \cdot 142 \text{ mm} = 23,9 \text{ mm}$	$2,5 \cdot 10^5$
0,014208	$\lg 1,4208 \cdot 142 \text{ mm} = 21,6 \text{ mm}$	$3 \cdot 10^5$
0,013920	$\lg 1,3920 \cdot 142 \text{ mm} = 20,4 \text{ mm}$	$3,5 \cdot 10^5$
0,014108	$\lg 1,4108 \cdot 142 \text{ mm} = 21,2 \text{ mm}$	$4 \cdot 10^5$
0,013533	$\lg 1,3533 \cdot 142 \text{ mm} = 18,7 \text{ mm}$	$1,5 \cdot 10^5$
0,013600	$\lg 1,3600 \cdot 142 \text{ mm} = 19,4 \text{ mm}$	$5 \cdot 10^5$
0,013534	$\lg 1,3534 \cdot 142 \text{ mm} = 18,7 \text{ mm}$	$5,5 \cdot 10^5$
0,013141	$\lg 1,3141 \cdot 142 \text{ mm} = 16,8 \text{ mm}$	$6 \cdot 10^5$

Durch das Einzeichnen der Kurvenpunkte
P (Re, λ) ergibt sich die in Bild 4
dargestellte Kurve.

→ relative Genauigkeit $d_{rel} = \underline{\underline{50\,000 - 100\,000}}$

Weiter →

Ermittlung der äquivalenten Rauigkeit k

$$d = 125 \text{ mm}$$

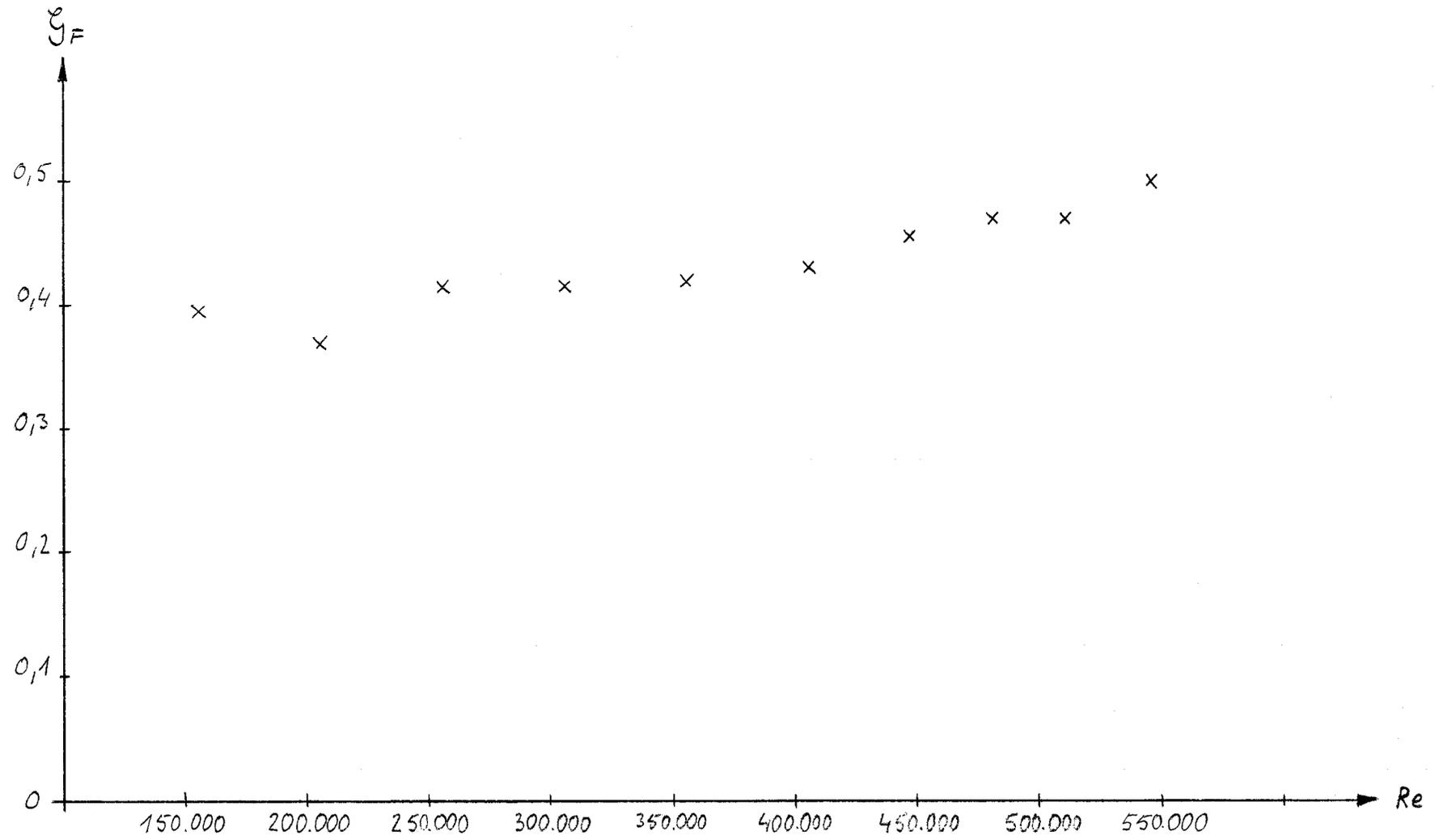
$$dlk = 50\,000 - 100\,000$$

$$k = \frac{125 \text{ mm}}{50\,000} = \underline{\underline{2,5 \mu\text{m}}}$$

$$k = \frac{125 \text{ mm}}{100\,000} = \underline{\underline{1,3 \mu\text{m}}}$$

Die äquivalente Rauigkeit k liegt in
einem Bereich von $1,3 - 2,5 \mu\text{m}$.

ξ_F in Abhängigkeit der Re



Explizite Auswertung der Versuche 1 und 2

Lehrübungszahl 2 für Messung Nr. 3

$$1) \Delta P_{Dpa} = \rho_w \cdot g \cdot \Delta P_{DWS}$$

$$= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (-0,0616 \text{ m})$$

$$= \underline{\underline{-604,296 \text{ Pa}}}$$

$$2) P_D = P_A + \Delta P_{Dpa} = 99650 \text{ Pa} - 604,296 \text{ Pa}$$

$$= \underline{\underline{99045,704 \text{ Pa}}}$$

$$3) T_A = T_0 + t_A = 273,15 \text{ K} + 21 \text{ K} = \underline{\underline{294,15 \text{ K}}}$$

4) Dichte der trockenen Luft:

$$\rho_{DH} = \frac{P_D}{RT} = \frac{99045,704 \text{ N} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}}{\text{m}^2 \cdot 287,2 \text{ Nm} \cdot 294,15 \text{ K}}$$

$$= \underline{\underline{1,172 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

5) Dichte der feuchten Luft:

$$P_S = 0,02485 \text{ bar} = 2485 \text{ Pa}$$

(Tafel 5, W. Bohl: Techn. Strömungslehre)

$$\rho_{df} = \rho_{DH} \cdot \left(1 - 0,377 \cdot \varphi_A \cdot \frac{P_S}{P_D} \right)$$

$$= 1,172 \cdot \left(1 - 0,377 \cdot \frac{47\%}{100\%} \cdot \frac{2485 \text{ Pa}}{99045,704 \text{ Pa}} \right) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= \underline{\underline{1,167 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

6) Massen- und Volumenstrom:

$$\underline{d_D = 0,981 \text{ (aus Diagramm)}}$$

$$\dot{V}_D = d_D \cdot \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2 \frac{|\Delta p_D|}{\rho_D}}$$

$$= 0,981 \cdot \frac{\pi \cdot 0,125^2 \text{ m}^2}{4} \sqrt{2 \cdot \frac{604,296 \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{1,167 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^2}}$$

$$= \underline{\underline{0,387 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}}$$

$$\dot{m}_D = \dot{V} \cdot \rho_f = 0,387 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,167 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$= \underline{\underline{0,452 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}}$$

7) Berechnung von p_I :

$$\Delta p_{I,Pa} = -8,14 \text{ mbar} = \underline{\underline{-814 \text{ Pa}}}$$

$$p_I = p_A + \Delta p_{I,Pa} = 99650 \text{ Pa} - 814 \text{ Pa} \\ = \underline{\underline{98836 \text{ Pa}}}$$

8) Berechnung von p_{II} :

$$\Delta p_{I,II,Pa} = 2,58 \text{ mbar} = \underline{\underline{258 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta p_{II,Pa} = \Delta p_{I,Pa} - \Delta p_{I,II,Pa} = -814 \text{ Pa} - 258 \text{ Pa} \\ = \underline{\underline{-1072 \text{ Pa}}}$$

$$p_{II} = p_A + \Delta p_{I,II,Pa} = 99650 \text{ Pa} - 1072 \text{ Pa} \\ = \underline{\underline{98578 \text{ Pa}}}$$

9) Dichte der feuchten Luft (Messquerschnitt I):

$$\rho_{I, H} = \frac{P_I}{RT} = \frac{98836 \text{ kg}}{287,2 \cdot 294,15 \text{ m}^3} = \underline{\underline{1,170 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$\begin{aligned}\rho_{I, f} &= \rho_{I, H} \cdot \left(1 - 0,377 \cdot \varphi_A \cdot \frac{p_s}{p_D}\right) \\ &= 1,170 \cdot \left(1 - 0,377 \cdot \frac{47}{100} \cdot \frac{2485}{99045,704}\right) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= \underline{\underline{1,165 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}\end{aligned}$$

10) Dichte der feuchten Luft (Messquerschnitt II):

$$\rho_{II, H} = \frac{P_{II}}{RT} = \frac{98578 \text{ kg}}{287,2 \cdot 294,15 \text{ m}^3} = \underline{\underline{1,167 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$\begin{aligned}\rho_{II, f} &= \rho_{II, H} \cdot \left(1 - 0,377 \cdot \varphi_A \cdot \frac{p_s}{p_D}\right) \\ &= 1,167 \cdot \left(1 - 0,377 \cdot \frac{47}{100} \cdot \frac{2485}{99045,704}\right) \\ &= \underline{\underline{1,162 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}\end{aligned}$$

11) mittlere Dichte der feuchten Luft:

$$\begin{aligned}\rho_{I, II, f} &= \frac{\rho_{I, f} + \rho_{II, f}}{2} = \frac{(1,165 + 1,162) \text{ kg}}{2 \text{ m}^3} \\ &= \underline{\underline{1,164 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}\end{aligned}$$

12) mittlere Geschwindigkeit:

$$\begin{aligned}c_{m, I, II} &= \frac{\dot{m}_D}{\rho_{I, II, f} \cdot \frac{\pi D^2}{4}} = \frac{0,452 \text{ kg}}{1,164 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{0,125^2 \cdot \pi \text{ m}^2}{4}} \text{ s} \\ &= \underline{\underline{31,64 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}\end{aligned}$$

13) dynamische Viskosität:

$$\begin{aligned}\eta &= \eta_0 \left(\frac{T_0 + t_A}{T_0} \right)^a \\ &= 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ Pas} \left(\frac{294,15}{273,15} \right)^{0,76} = \underline{\underline{1,820 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}}} \\ \nu &= \frac{\eta}{\rho_{\text{II}}} = \frac{1,820 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}}{1,164 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = \underline{\underline{1,564 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}}\end{aligned}$$

14) Reynoldszahl:

$$\begin{aligned}Re &= \frac{c_{\text{M,II}} \cdot D}{\nu} = \frac{31,64 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0,125 \text{ m} \cdot \text{s}}{1,564 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} \\ &= \underline{\underline{252877}}\end{aligned}$$

15) Rohrreibungszahl:

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{p_I - p_{II}}{\frac{L_{\text{II}}}{D} \cdot \frac{\rho_{\text{II}}}{2} \cdot c_{\text{M,II}}^2} = \frac{(98836 - 98578) \text{ Pa}}{0,125 \cdot \frac{1,164 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{2} \cdot 31,64^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}} \\ &= \underline{\underline{0,0148}}\end{aligned}$$

✓

Formwiderstandskoeffizient ϵ_F für Messung Nr. 3

- 1)
$$\begin{aligned}\Delta P_{Dpa} &= \rho_w \cdot g \cdot \Delta P_{Dws} \\ &= 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot (-0,0628 \text{ m}) \\ &= \underline{\underline{-616,068 \text{ Pa}}}\end{aligned}$$
- 2)
$$\begin{aligned}P_D &= P_A + \Delta P_{Dpa} = 99650 \text{ Pa} - 616,068 \text{ Pa} \\ &= \underline{\underline{99033,932 \text{ Pa}}}\end{aligned}$$
- 3)
$$T_A = T_0 + t_A = 273,15 \text{ K} + 21 \text{ K} = \underline{\underline{294,15 \text{ K}}}$$
- 4) Dichte der trockenen Luft:
$$\begin{aligned}\rho_{Dtr} &= \frac{P_D}{RT} = \frac{99033,932 \text{ N} \cdot \text{kg} \cdot \text{K}}{\text{m}^2 \cdot 287,2 \text{ Nm} \cdot 294,15 \text{ K}} \\ &= \underline{\underline{1,172 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}\end{aligned}$$
- 5) Dichte der feuchten Luft:
$$P_s = 0,02485 \text{ bar} = 2485 \text{ Pa}$$

(Tafel 5, W. Bohl: Techn. Strömungslehre)

$$\begin{aligned}\rho_{Df} &= \rho_{Dtr} \left(1 - 0,377 \cdot P_A \cdot \frac{P_s}{P_D} \right) \\ &= 1,172 \left(1 - 0,377 \cdot \frac{47}{100} \cdot \frac{2485}{99033,932} \right) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= \underline{\underline{1,167 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}\end{aligned}$$

6) Massen- und Volumenstrom:

$$\underline{d_D = 0,981} \quad (\text{aus Diagramm})$$

$$\dot{V}_D = d_D \cdot \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{2 \frac{|\Delta P_{Dl}|}{\rho_f}}$$

$$= 0,981 \cdot \frac{\pi \cdot 0,125^2 \text{ m}^2}{4} \sqrt{2 \cdot \frac{616,068 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1,167 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$\underline{\underline{= 0,391 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}}$$

$$\dot{m}_D = \dot{V} \cdot \rho_f = 0,391 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 1,167 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \underline{\underline{0,456 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}}$$

7) Berechnung von P_I :

$$\Delta P_{I,Pa} = -8,40 \text{ mbar} = \underline{\underline{-840 \text{ Pa}}}$$

$$P_I = P_A + \Delta P_{I,Pa} = 99650 \text{ Pa} - 840 \text{ Pa} \\ = \underline{\underline{98810 \text{ Pa}}}$$

8) Berechnung von P_{II} :

$$\Delta P_{I,II,Pa} = 5,05 \text{ mbar} = \underline{\underline{505 \text{ Pa}}}$$

$$\Delta P_{II,Pa} = \Delta P_{I,Pa} - \Delta P_{I,II,Pa} = -840 \text{ Pa} - 505 \text{ Pa} \\ = \underline{\underline{-1345 \text{ Pa}}}$$

$$P_{II} = P_A + \Delta P_{II,Pa} = 99650 \text{ Pa} - 1345 \text{ Pa} \\ = \underline{\underline{98305 \text{ Pa}}}$$

9) Dichte der feuchten Luft (Mengenquerschnitt I):

$$\rho_{Itr} = \frac{P_I}{RT} = \frac{98810 \text{ kg}}{287,2 \cdot 294,15 \text{ m}^3} = \underline{\underline{1,170 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$\begin{aligned} \rho_{If} &= \rho_{Itr} \cdot \left(1 - 0,377 \cdot p_A \cdot \frac{p_S}{p_D}\right) \\ &= 1,170 \left(1 - 0,377 \cdot \frac{47}{100} \cdot \frac{2485}{99033,932}\right) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= \underline{\underline{1,165 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \end{aligned}$$

10) Dichte der feuchten Luft (Mengenquerschnitt II):

$$\rho_{IItr} = \frac{P_{II}}{RT} = \frac{98305 \text{ kg}}{287,2 \cdot 294,15 \text{ m}^3} = \underline{\underline{1,164 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}}$$

$$\begin{aligned} \rho_{If} &= \rho_{IItr} \left(1 - 0,377 \cdot p_A \cdot \frac{p_S}{p_D}\right) \\ &= 1,164 \left(1 - 0,377 \cdot \frac{47}{100} \cdot \frac{2485}{99033,932}\right) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \\ &= \underline{\underline{1,158 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \end{aligned}$$

11) mittlere Dichte der feuchten Luft:

$$\begin{aligned} \rho_{I,II f} &= \frac{\rho_{If} + \rho_{II f}}{2} = \frac{(1,165 + 1,158) \text{ kg}}{2 \text{ m}^3} \\ &= \underline{\underline{1,161 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}} \end{aligned}$$

12) mittlere Geschwindigkeit:

$$\begin{aligned} c_{mI,II} &= \frac{w_D}{\rho_{I,II f} \cdot \frac{D^2_{II}}{4}} = \frac{0,456 \text{ kg}}{1,161 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{0,125^2 \pi \cdot \text{m}^2}{4}} \\ &= \underline{\underline{32,01 \frac{\text{m}}{\text{s}}}} \end{aligned}$$

13) dynamische Viskosität:

$$\eta = \eta_0 \left(\frac{T_0 + t_A}{T_0} \right)^a$$

$$= 1,72 \cdot 10^{-5} \text{ Pas} \left(\frac{294,15}{273,15} \right)^{0,76} = \underline{\underline{1,820 \cdot 10^{-5} \text{ Pas}}}$$

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_{I,II}} = \frac{1,82 \cdot 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^2}{1,161 \text{ kg} \cdot \text{m}^3} = \underline{\underline{1,568 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}}}$$

14) Reynoldszahl

$$Re = \frac{c_{mI,II} \cdot D}{\nu} = \frac{32,01 \text{ m} \cdot 0,125 \text{ m/s}}{1,568 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = \underline{\underline{255182}}$$

15) Rohrreibungszahl:

$$\lambda = \frac{p_I - p_{II}}{\frac{L_{I,II}}{D} \cdot \frac{\rho_{I,II}}{2} \cdot c_{mI,II}^2} = \frac{(98810 - 98305) \text{ Pa}}{\frac{3,75}{0,125} \cdot \frac{1,161 \text{ kg}}{2 \text{ m}^3} \cdot 32,01^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

$$= \underline{\underline{0,0283}}$$

Was ist das für eine Reibungszahl?

Wie berechnet? - Mit

16) Druckverlust der Klappe: $\lambda = 0,0283$ wird

$$\Delta p_R = \Delta p_{R,I,II} \textcircled{1} = \underline{\underline{258 \text{ Pa}}} \quad \Delta p_{R,I,II} = 505 \text{ Pa} !$$

$$\Delta p_F = \Delta p_{I,II} \textcircled{2} - \Delta p_R = 505 \text{ Pa} - 258 \text{ Pa} = \underline{\underline{247 \text{ Pa}}}$$

17) Formwiderstandsbeiwert ξ_F :

$$\xi_F = \frac{2 \Delta p_F}{\rho_{I,II} \cdot c_{mI,II}^2} = \frac{2 \cdot 247 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^2}{1,161 \text{ kg} \cdot 32,01^2 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^2} = \underline{\underline{0,415}}$$

Berechnung der k_V -Zahl:

$$k_V = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho \cdot \xi_F}} \cdot \frac{\pi D^2}{4} = \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}}{1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2} \cdot 0,415}} \cdot \frac{\pi \cdot 0,125^2 \text{ m}^2}{4}$$
$$= 0,2694 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = \underline{\underline{969,84 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}}}$$

Bestimmung der k_v -Zahl für die Luftklappe

$$\xi_{F, \text{Lit}} = \underline{\underline{0,52}}$$

(S. 144, Tabelle 4.4, W. Bohl: Techn. Strömungslehre)

$$\begin{aligned} k_v &= \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot \xi_{F, \text{Lit}}} \cdot \frac{\pi D^2}{4}} \\ &= \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5 \frac{\text{Pa}}{\text{m}^2}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,52} \cdot \frac{\pi \cdot 0,125^2 \text{m}^2}{4}} \\ &= 0,2407 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = \underline{\underline{866 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}} \end{aligned}$$

6. Diskussion und Literaturvergleich

Die vorliegenden beiden Versuche hatten zum Ziel, Strömungsverluste, gekennzeichnet durch den Druckabfall am durchströmten Element darzustellen und hieraus Kennwerte für das jeweils untersuchte Bauteil abzuleiten. Im ersten Versuch war ein gerades Rohr, im zweiten zusätzlich eine eingebaute Drosselklappe zu untersuchen.

Für beide Messungen wurde der Druckabfall mit speziellen U-Rohrmanometern, sogenannten Betz-Manometern, gemessen, welche sich jedoch gleichzeitig als große Fehlerquelle erwiesen. Stark schwankende Anzeigewerte hatten hier sehr unzuverlässige Messwerte zur Folge und ließen somit stark streuende Versuchsergebnisse erwarten.

Die grafische Darstellung der Ergebnisse aus Versuch 1 offenbarte ein weiteres Problem: Die errechneten Wertepaare $[Re; \lambda]$ lagen alle samt im Konvergenzbereich der Kurve der relativen Rauigkeit d/k an die Grenzkurve für $k=0$. Offenbar lagen demnach die Versuchsbedingungen genau in dem Bereich, in dem die viskose Grenzschicht die Höhe des Rauigkeitsprofils unterschreitet, was die Streuung der Ergebnisse zusätzlich vergrößerte. Hier hätte eine Erhöhung der

Reynoldszahl durch geeignete Maßnahmen Abhilfe geschafft. Da eine Vergrößerung des Volumenstromes auf Grund der Gebläseabmessungen allerdings kaum möglich war, hätte man also den Rohrdurchmesser verringern müssen, damit sich die erhaltene Kurve weiter in den „hydraulisch rauhen“ Bereich verlagert bzw. auch Messwerte nahe dem Übergang in die Asymptote geliefert werden.

So konnte hier lediglich die Aussage gemacht werden, dass sich die äquivalente Sandrauhigkeit k etwa in der Größenordnung weniger μm bewegt. Theoretisch müsste der Wert etwas oberhalb des Literaturwertes gezogener Rohre (ohne Wickelfalz) von $1,3 \dots 1,5 \mu\text{m}$ (Tafel 31, W. Bohl: Techn. Strömungslehre) liegen.

Exemplarisch wurde deshalb eine Kurve für $k = 2 \mu\text{m}$ in das Diagramm eingezeichnet, die recht gut mit den Messwerten vereinbar erscheint. Dieser Annahme entspricht eine relative Rauigkeit d/k von 62500 .

Genau genommen hätte man nun bei der Auswertung des zweiten Versuches (Drosselklappe) korrigierte Werte für den durch die Rohrreibung verursachten Druckabfall ansetzen müssen, um eine Verfälschung der Rechenergebnisse für die Formwiderstandszahl ξ auszuschließen. Inwiefern war ja der Reibungsanteil etwa

genauso groß wie der Widerstandsanteil am Gesamtdruckabfall und somit nicht unerheblich. Da der genaue Rauigkeitswert jedoch wie oben ausgeführt nicht ermittelt werden konnte und zumindest keine systematische Unsicherheit zu befürchten war entschieden wir uns, gemäß Versuchsanleitung die unsicheren Zwischenwerte beizubehalten und mit ihnen weiterzurechnen.

Als sicher darf dennoch die in der grafischen Darstellung erkennbare Abhängigkeit der Widerstandszahl ζ von der Re-Zahl angenommen werden. Sie ist nämlich dadurch erklärbar, dass über die Schieberfläche kleine Durchgangsbohrungen verteilt waren, die bei den niedrigen Reynoldszahlen die Ablösung des Luftstromes hinter dem Schieber teilweise kompensierten. Dieser Effekt verschwand bei Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit, weil dann die kleinen Bohrungen einen zu großen Widerstand darstellten. Dadurch näherte sich der Wert für ζ zusehens dem Literaturwert für den eingestellten Schließwinkel (etwa 10°) von 0,52 (S. 144, Tabelle 4.4, W. Bohl: Techn. Strömungslehre) an. D. h. für den Gebrauch dieser Drosselklappe müsste man die Widerstandszahl tabellarisch oder in Diagrammform für die jeweilige Strömungs-

geschwindigkeit bzw. den jeweiligen Volumenstrom angeben um dieser Abhängigkeit gerecht zu werden.

Abschließend wurde eine k_v -Zahl der Klappe (für $\xi = 0,52$) von $866 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$ errechnet. Hier war eine Angabe der zugehörigen Re-Zahl nicht erforderlich, da diese eine Größenordnung über den im Versuch vorliegenden Zahlen ($> 2,45 \cdot 10^6$) also im linearen Bereich der Widerstandszahl lag.



Literatur: Willi Bohl, Technische Strömungslehre
Vogel Fachbuch
11. Auflage 1998