Wärmedurchgangskoeffizienten für stehende Wärmeübertrager Dampf/Wasser

Dr. sc. techn. B. GLÜCK
VEB Kombinat Technische Gebäudeausrüstung – Institut –

Problemstellung

Die Herstellerfirmen von Rohrbündel-Wärmeübertragern legen in der Regel die Apparate nur für den Vollastfall aus. Bei der Bemessung werden entsprechende Sicherheitszuschläge gewährt. Die thermodynamischen Verhältnisse des Teillastbetriebes finden meistens keine Beachtung. Als Folge davon traten in der Praxis eine Reihe von Störungen bei Schwachlast auf.

Wenn es auch nicht Aufgabe der heizungstechnischen Projektierung sein kann, Wärmeübertrager nachzurechnen, so sollten die nachfolgenden Angaben Hinweise für eine überschlägliche Beurteilung geben.

Für das Lastverhältnis gilt bei stehenden Wärmeübertragern, bezogen auf den Kondensationsteil (Dampfraum),

$$\frac{\dot{Q}}{\dot{Q}^+} = \frac{k}{k^+} \frac{H_D}{H_D{}^+} \frac{t_D - \bar{t}_W}{t_D{}^+ - \bar{t}_W{}^+} \tag{1}$$

mit $\dot{Q}$ – Wärmeleistung
k – Wärmedurchgangskoeffizient
H_D – Dampfraumhöhe
t_D – Sattdampftemperatur
$\bar{t}_W$ – mittlere Wassertemperatur.

Weiterhin deutet + auf den Auslegungszustand hin.
Wird in erster Näherung $k = k^+$ gesetzt, so ist Gl. (1) sofort auswertbar. In zweiter Näherung ist der Wärmedurchgangskoeffizient zu berücksichtigen.

Wärmedurchgangskoeffizienten

Für den Wärmedurchgangskoeffizienten gelten die Berechnungsgleichungen, bezogen auf die
Rohraußenfläche

$$k_a = \frac{1}{\frac{d_{ra}}{d_i\alpha_i} + \frac{d_{ra}}{2\lambda}\ln\frac{d_{ra}}{d_{ri}} + \frac{d_{ra}}{2\lambda_a}\ln\frac{d_a}{d_{ra}} + \frac{d_{ra}}{2\lambda_i}\ln\frac{d_{ri}}{d_i} + \frac{d_{ra}}{d_a\alpha_a}} \tag{2}$$

Rohrinnenfläche

$$k_i = \frac{1}{\frac{d_{ri}}{d_i\alpha_i} + \frac{d_{ri}}{2\lambda}\ln\frac{d_{ra}}{d_{ri}} + \frac{d_{ri}}{2\lambda_a}\ln\frac{d_a}{d_{ra}} + \frac{d_{ri}}{2\lambda_i}\ln\frac{d_{ri}}{d_i} + \frac{d_{ri}}{d_a\alpha_a}} \tag{3}$$

Im einzelnen bedeuten:

d_{ra}, d_{ri} – Rohraußen- bzw. Rohrinnendurchmesser
d_a, d_i – äußerer bzw. innerer Durchmesser (Kesselstein)
α_a, α_i – äußerer bzw. innerer Wärmeübergangskoeffizient
λ – Wärmeleitkoeffizient des Rohrmaterials
λ_a, λ_i – Wärmeleitkoeffizient der äußeren bzw. inneren Kesselsteinschicht

Inwieweit eine Verschmutzung an den Rohrwandungen auftritt, hängt von zahlreichen Faktoren ab. Ausgehend von den Erfahrungen der Wärmeübertragerhersteller, wird als Summe $R_V = 0{,}00013\ m^2K/W$ angesetzt. Der Wärmeleitwiderstand der Rohrwand ist eine Funktion des eingesetzten Rohrmaterials und seiner Dicke. Auszugsweise gelten für

$$R_{R,a} = \frac{d_{ra}}{2\lambda}\ln\frac{d_{ra}}{d_{ri}}; \quad R_{R,i} = \frac{d_{ri}}{2\lambda}\ln\frac{d_{ra}}{d_{ri}}; \quad R_R + R_V .$$

Material	mm	$R_{R,a}$	$R_{R,i}$	$R_{R,a}+R_V$	$R_{R,i}+R_V$
Stahlrohre	25×2,5	0,000056	0,000045	0,000186	0,000175
Stahlrohre	16×2	0,000046	0,000035	0,000176	0,000165
V2A-Rohre	25×2	0,000104	0,000087	0,000234	0,000217
Kupferrohre	16×1	0,000003	0,000002	0,000133	0,000132

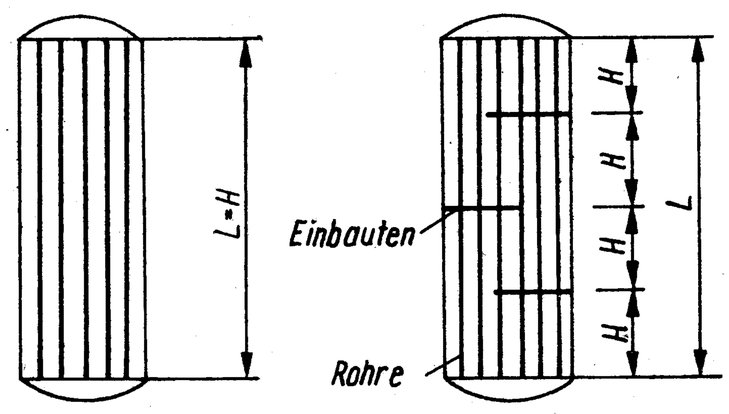
Die Wärmeleitwiderstände sind in m^2K/W angegeben.
In Anbetracht der Tatsache, daß der Widerstand infolge Verschmutzung ohnehin nur einen Schätzwert darstellt und die Inkrustationsneigung bei V2A-Rohren wesentlich geringer als bei unlegierten Stahlrohren ist, wird unabhängig von der Bezugsbasis für die weiteren Berechnungen für

Stahlrohre $R = R_R + R_V = 0{,}00020\ m^2K/W$
Kupferrohre $R = R_R + R_V = 0{,}00013\ m^2K/W$

gesetzt. Unter der Voraussetzung, daß sich der Dampf jeweils auf der Rohrwandseite befindet, auf die der Wärmedurchgangskoeffizient bezogen wurde, ergeben sich für die Gln. (2) und (3)

$$k_a = \frac{1}{\frac{d_{ra}}{d_i\alpha_i} + R + \frac{d_{ra}}{d_a\alpha_a}} \approx \frac{1}{\frac{d_{ra}}{d_{ri}\alpha_W} + R + \frac{1}{\alpha_D}} \tag{4}$$

$$k_i = \frac{1}{\frac{d_{ri}}{d_i\alpha_i} + R + \frac{d_{ri}}{d_a\alpha_a}} \approx \frac{1}{\frac{1}{\alpha_D} + R + \frac{d_{ri}}{d_{ra}\alpha_W}} . \tag{5}$$



1 H - Ablaufhöhe des Kondensatfilms
L - Länge des geraden Rohrbündels

Tabelle 1: Wärmedurchgangskoeffizienten k in W/m²K für Stahlrohre

	p_D/t_S																							
	0,15 MPa 111,4 °C			0,2 MPa 120,2 °C			0,3 MPa 133,5 °C			0,4 MPa 143,6 °C			0,5 MPa 151,8 °C			0,6 MPa 158,8 °C			0,8 MPa 170,4 °C			1,0 MPa 180 °C		
	t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C		
H in m	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110
$\alpha'_W = 500$ W/m²K																								
0,1	444	446	450	443	446	448	443	445	447	443	445	446	443	444	446	443	444	446	442	444	445	442	443	444
0,5	436	440	447	436	440	444	435	439	442	435	438	441	435	437	440	435	437	439	434	436	438	434	436	438
1	432	437	445	431	436	442	431	435	439	430	434	438	430	433	437	430	433	436	429	432	435	429	431	434
1,5	429	434	444	428	433	440	428	432	437	427	431	435	427	430	434	426	430	433	426	429	432	425	428	431
2	426	433	443	426	431	439	425	430	435	425	429	433	424	428	432	424	427	431	423	426	430	427	426	429
$\alpha'_W = 1000$ W/m²K																								
0,1	790	800	816	789	798	809	788	795	803	787	794	801	787	793	799	786	792	797	785	790	795	784	789	793
0,5	762	778	805	761	775	794	760	771	785	758	769	780	758	767	777	757	765	774	755	763	771	754	761	768
1	746	765	798	745	761	784	743	757	773	742	754	768	741	752	764	740	750	761	738	747	757	741	745	753
1,5	735	756	802	734	752	778	732	747	766	731	744	759	729	741	755	737	740	752	746	737	747	752	744	743
2	727	750	799	726	745	773	724	740	760	732	736	753	739	734	748	745	734	745	753	745	740	759	752	743
$\alpha'_W = 2000$ W/m²K																								
0,1	1286	1317	1371	1283	1310	1348	1280	1303	1330	1278	1298	1321	1276	1295	1314	1274	1291	1310	1271	1287	1303	1268	1283	1297
0,5	1204	1250	1354	1201	1241	1299	1196	1229	1271	1193	1222	1256	1190	1218	1247	1188	1214	1240	1183	1206	1229	1180	1201	1222
1	1158	1212	1336	1155	1202	1270	1150	1189	1237	1146	1181	1220	1148	1175	1209	1164	1170	1200	1188	1164	1189	1204	1184	1180
1,5	1129	1188	1325	1125	1175	1255	1134	1162	1214	1162	1154	1196	1181	1151	1183	1195	1142	1175	1217	1195	1169	1231	1213	1191
2	1107	1169	1315	1117	1156	1240	1159	1142	1197	1185	1152	1177	1202	1174	1164	1216	1191	1158	1235	1215	1190	1249	1231	1211
$\alpha'_W = 4000$ W/m²K																								
0,1	1858	1932	2100	1852	1917	2011	1845	1898	1965	1840	1887	1942	1835	1880	1927	1831	1873	1914	1825	1862	1898	1819	1853	1886
0,5	1674	1776	2025	1668	1756	1897	1658	1733	1825	1652	1717	1790	1646	1706	1770	1641	1697	1756	1633	1682	1733	1656	1671	1716
1	1580	1694	1982	1573	1671	1831	1563	1645	1749	1610	1628	1711	1651	1616	1689	1683	1633	1671	1730	1688	1646	1763	1726	1682
1,5	1521	1642	1954	1539	1619	1788	1625	1590	1698	1679	1617	1660	1716	1664	1636	1746	1697	1633	1788	1748	1697	1817	1783	1742
2	1528	1604	1932	1594	1579	1756	1674	1602	1662	1724	1665	1622	1759	1708	1636	1786	1741	1680	1824	1787	1740	1852	1820	1779
$\alpha'_W = 8000$ W/m²K																								
0,1	2372	2507	2828	2364	2479	2662	2351	2448	2569	2342	2428	2526	2335	2413	2497	2328	2402	2477	2317	2383	2449	2308	2367	2426
0,5	2064	2237	2684	2053	2203	2445	2039	2162	2316	2029	2137	2262	2021	2119	2228	2014	2104	2201	2065	2082	2164	2129	2069	2137
1	1915	2101	2604	1904	2065	2330	1963	2021	2189	2055	1994	2130	2122	2039	2093	2173	2098	2064	2248	2185	2102	2303	2246	2179
1,5	1838	2019	2551	1945	1979	2252	2081	1972	2110	2166	2075	2048	2227	2147	2032	2274	2202	2104	2343	2282	2204	2392	2339	2274
2	1928	1958	2512	2031	1917	2199	2159	2053	2052	2240	2150	2013	2297	2219	2107	2340	2271	2176	2404	2346	2772	2450	2399	2337
$\alpha'_W = 12\,000$ W/m²K																								
0,1	2609	2777	3194	2597	2744	2978	2583	2705	2858	2572	2679	2801	2563	2661	2768	2555	2647	2743	2542	2623	2706	2530	2604	2678
0,5	2233	2443	3007	2221	2403	2702	2204	2352	2543	2192	2322	2476	2182	2301	2433	2174	2283	2401	2276	2256	2356	2353	2285	2324
1	2057	2281	2904	2044	2235	2553	2154	2183	2387	2265	2158	2315	2346	2251	2268	2408	2321	2235	2499	2424	2329	2566	2499	2418
1,5	2005	2182	2837	2133	2134	2465	2297	2170	2292	2400	2295	2217	2474	2380	2244	2531	2446	2330	2615	2543	2450	2676	2612	2535
2	2113	2110	2787	2236	2074	2400	2391	2268	2222	2489	2384	2222	2559	2468	2334	2612	2530	2417	2691	2621	2533	2747	2686	2612

Dabei bedeuten:

α_D — dampfseitiger Wärmeübergangskoeffizient
α_W — wasserseitiger Wärmeübergangskoeffizient.

Vereinfachend wurden für die Umrechnung der benetzten Flächen die Rohrdurchmesser verwendet.

Wird für den Term $d_{ra}/(d_{ri}\alpha_W)$ bzw. $d_{ri}/(d_{ra}\alpha_W)$ jeweils der fiktive wasserseitige Wärmeübergangskoeffizient α_W' definiert, dann gehen formal die Gln. (4) und (5) in die Berechnungsgleichung für die ebene Wand

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_W'} + R + \frac{1}{\alpha_D}} \tag{6}$$

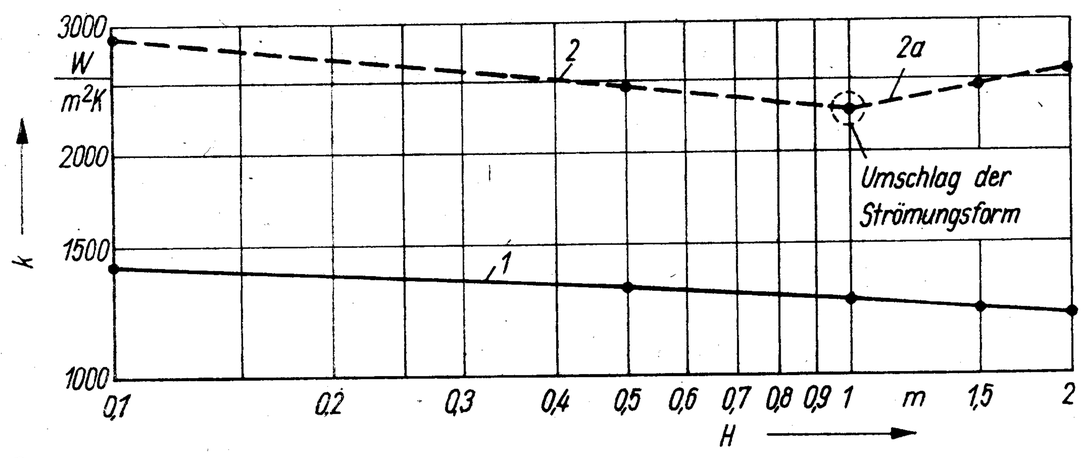
über.

Die Ermittlung des dampfseitigen Wärmeübergangskoeffizienten muß iterativ erfolgen. Einfluß nehmen dabei die Sattdampftemperatur t_S, die mittlere Wassertemperatur t_W, der fiktive wasserseitige Wärmeübergangskoeffizient α_W', der Wärmeleitwiderstand R und die Höhe des ablaufenden Kondensatfilmes H. Letztere ist gemäß Bild 1 definiert.

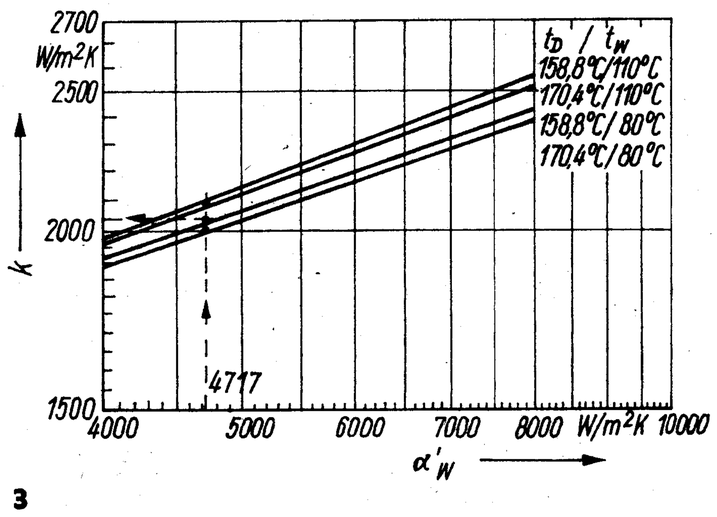
Die Berechnung der Wärmeübergangskoeffizienten, die die Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten einschließt, wurde nach [1] maschinell durchgeführt. Die Iterationen wurden beendet, wenn sich die Differenz aus Dampf- und Wandtemperatur bei zwei aufeinanderfolgenden Iterationsschritten weniger als 0,1 K änderte.

In der Nähe des Umschlagpunktes vom laminaren in das turbulente Strömungsgebiet ($R \approx 350$) kommt es infolge der vorhandenen Approximationen vor, daß die Form des Kondensatablaufes nicht eindeutig bestimmbar ist. Es wurde im Übergangsbereich deshalb stets der jeweils größere Wärmeübergangskoeffizient für die weiteren Berechnungen verwendet.

Der damit verbundene Fehler (maximal sieben Prozent) ist gegenüber den getroffenen Annahmen (Verschmutzung, ruhender Dampf u. a. m.) vertretbar. Die ermittelten Wärmedurchgangskoeffizienten sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengestellt. Diese Ergebnisse gelten streng genommen nur für ebene Wände. Näherungsweise sind sie jedoch auch auf die Kondensation an Rohroberflächen übertragbar. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Strömungsformen werden im Bild 2 verdeutlicht. Im laminaren Bereich nimmt der Wärmeübergangskoeffizient mit der Ablaufhöhe ab, da die Dicke des Kondensatfilms wächst (Kurven 1 und 2). Bei einer bestimmten Film-



2



3

Tabelle 2: Wärmedurchgangskoeffizienten k in W/m²K für Kupferrohre

	p_D/t_S																							
	0,15 MPa 111,4 °C			0,2 MPa 120,2 °C			0,3 MPa 133,5 °C			0,4 MPa 143,6 °C			0,5 MPa 151,8 °C			0,6 MPa 158,8 °C			0,8 MPa 170,4 °C			1,0 MPa 180 °C		
	t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C			t_W in °C		
H in m	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110	40	80	110
$\alpha'_W = 500$ W/m²K																								
0,1	458	460	465	457	460	463	457	459	461	457	459	460	457	458	460	457	458	460	456	458	459	456	457	459
0,5	450	454	461	449	453	459	449	452	456	449	452	455	448	451	454	448	451	453	447	450	452	447	449	451
1	445	450	459	445	449	456	444	448	452	444	447	451	443	447	450	443	446	449	442	445	448	442	444	447
1,5	442	448	458	441	447	454	441	445	451	440	444	449	440	443	447	439	443	446	439	442	445	438	441	444
2	439	446	457	439	445	453	438	443	449	437	442	447	437	441	445	436	440	444	438	439	443	441	438	442
$\alpha'_W = 1000$ W/m²K																								
0,1	835	846	865	834	844	857	833	841	851	832	840	848	832	838	846	831	837	844	830	836	841	829	834	839
0,5	804	822	852	803	818	840	801	814	829	800	811	824	799	809	820	798	807	818	796	805	814	794	802	811
1	786	807	853	784	803	829	782	798	817	781	795	810	779	792	806	778	790	802	776	787	798	783	784	794
1,5	774	797	849	772	793	822	770	787	808	768	783	800	772	781	796	778	778	792	788	778	787	795	786	783
2	764	790	846	763	785	816	760	779	801	773	775	793	781	772	788	788	776	784	797	787	778	803	795	785
$\alpha'_W = 2000$ W/m²K																								
0,1	1407	1446	1530	1405	1439	1486	1402	1429	1463	1399	1423	1451	1396	1419	1444	1394	1415	1438	1390	1410	1429	1387	1405	1422
0,5	1308	1364	1493	1304	1353	1425	1299	1339	1390	1295	1331	1372	1291	1325	1360	1288	1320	1351	1283	1311	1339	1279	1305	1330
1	1253	1319	1471	1249	1305	1393	1243	1290	1348	1239	1281	1327	1255	1273	1314	1274	1267	1304	1301	1274	1290	1321	1298	1279
1,5	1218	1289	1456	1214	1274	1370	1239	1258	1321	1271	1247	1298	1293	1259	1284	1311	1281	1273	1336	1311	1279	1353	1332	1306
2	1192	1265	1445	1219	1251	1352	1268	1234	1300	1298	1260	1276	1319	1286	1261	1335	1306	1267	1357	1334	1305	1373	1353	1329
$\alpha'_W = 4000$ W/m²K																								
0,1	2116	2218	2454	2109	2196	2329	2100	2173	2264	2092	2158	2232	2087	2147	2210	2082	2137	2195	2073	2123	2174	2065	2111	2157
0,5	1874	2009	2349	1865	1981	2170	1854	1950	2073	1845	1931	2028	1838	1916	2002	1833	1905	1982	1840	1886	1952	1891	1872	1930
1	1753	1902	2289	1744	1873	2082	1757	1837	1971	1832	1816	1924	1885	1817	1894	1926	1864	1872	1985	1933	1865	2029	1982	1927
1,5	1679	1834	2250	1743	1805	2025	1852	1767	1908	1920	1844	1858	1969	1903	1827	2006	1946	1866	2060	2011	1947	2100	2056	2004
2	1728	1787	2220	1812	1754	1983	1914	1826	1861	1979	1905	1811	2024	1961	1871	2059	2002	1924	2108	2061	2000	2145	2103	2054
$\alpha'_W = 8000$ W/m²K																								
0,1	2796	2997	3502	2783	2955	3237	2766	2910	3092	2753	2880	3025	2743	2859	2985	2734	2842	2956	2719	2814	2912	2706	2793	2880
0,5	2363	2609	3273	2349	2557	2900	2330	2500	2722	2316	2466	2643	2306	2441	2593	2326	2421	2557	2446	2391	2506	2536	2460	2469
1	2164	2420	3150	2150	2367	2735	2307	2308	2542	2434	2316	2459	2527	2422	2405	2600	2502	2368	2705	2621	2514	2783	2707	2616
1,5	2138	2307	3070	2284	2253	2632	2471	2331	2432	2590	2473	2347	2676	2571	2416	2742	2647	2517	2841	2759	2653	2912	2839	2751
2	2261	2226	3010	2402	2222	2557	2580	2443	2351	2693	2576	2392	2775	2672	2520	2837	2744	2615	2929	2850	2749	2995	2925	2840
$\alpha'_W = 12000$ W/m²K																								
0,1	3120	3386	4077	3104	3334	3707	3083	3271	3509	3067	3233	3425	3054	3205	3372	3044	3182	3332	3025	3148	3275	3010	3121	3234
0,5	2580	2886	3760	2562	2822	3263	2539	2752	3032	2524	2709	2932	2511	2678	2868	2598	2655	2824	2749	2653	2761	2862	2773	2715
1	2340	2654	3593	2332	2588	3049	2575	2516	2804	2735	2598	2703	2853	2728	2637	2944	2829	2664	3080	2979	2845	3179	3088	2975
1,5	2367	2517	3486	2547	2450	2920	2782	2618	2674	2933	2793	2564	3043	2916	2728	3128	3012	2851	3254	3154	3024	3346	3257	3147
2	2520	2417	3407	2695	2484	2826	2920	2756	2576	3065	2923	2697	3169	3043	2858	3250	3136	2976	3369	3271	3145	3455	3368	3262

dicke wird der Kondensatablauf turbulent, und die Wärmeübergangskoeffizienten nehmen mit der Ablaufhöhe zu (Kurve 2a).

Die Tabellenparameter sind so gewählt, daß sich gute Interpolationsmöglichkeiten ergeben. Zweckmäßigerweise sollten die den tatsächlichen Wert eingrenzenden Parameter in ein Netz mit doppeltlogarithmischer Teilung eingetragen und dann grafisch interpoliert werden.

Beispiel

Um das Ergebnis der Interpolation mit der exakten Rechnung vergleichen zu können, wird auf das in [1] verwendete Beispiel bezogen.

Ein stehender Wärmeübertrager ist mit Kupferrohren (16 × 1 mm) bestückt. Der Wärmeleitwiderstand der Kupferrohre einschließlich einer Inkrustationsschicht beträgt $R = 0{,}00013$ m²K/W. Für den Wärmeübergangskoeffizienten der Kühlmedienseite gilt $\alpha_W = 5391$ W/m²K. Im Mantelraum des Wärmeübertragers befindet sich Sattdampf mit der Temperatur $t_S = 165$ °C. Die Einbauten haben untereinander einen vertikalen Abstand von $H = 0{,}5$ m. Die mittlere Wassertemperatur beträgt $t_W = 90$ °C.

Es ist der Wärmedurchgangskoeffizient k_a zu bestimmen.

Zunächst erfolgt die Ermittlung des fiktiven, wasserseitigen Wärmeübergangskoeffizienten

$$\alpha_W' = \frac{d_i \alpha_W}{d_a} = \frac{14}{16}\, 5391 \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m^2K}} = 4717 \ \mathrm{W/m^2K}$$

Damit hat die Interpolation zwischen den Werten

$\alpha_W' = 4000$ W/m²K und $\alpha_W' = 8000$ W/m²K
$t_S = 158{,}8$ °C und $t_S = 170{,}4$ °C
$t_W = 80$ °C und $t_W = 110$ °C

zu erfolgen. Die zugehörigen Wärmedurchgangskoeffizienten sind aus Tabelle 2 entnommen und in Bild 3 eingetragen worden. Rein visuell können zunächst für konstante t_W die Werte, die der Dampftemperatur 165 °C entsprechen, bestimmt und anschließend der k-Wert zur Wassertemperatur von 90 °C interpoliert werden. Es folgt ein Wärmedurchgangskoeffizient von $k_a = 2040$ W/m²K. Im Vergleich dazu ergab die exakte Rechnung in [1] $k_a = 2055$ W/m²K.

Literatur

[1] *Glück, B.:* Ein Vorschlag zur rationellen Berechnung von Wärmeübergangskoeffizienten bei der Kondensation reinen Wasserdampfes an senkrechten Wänden.
„Stadt- und Gebäudetechnik“ 34 (1980) H. 4, S. 114

Blechscherenmesser

für alle Größen und Maschinenfabrikate
für Normal- und Dauerschnitt
(gebogene Obermesser werden nicht gefertigt)

Messer für Handhebelscheren

genaue Zeichnungen sind bei Auftragserteilung beizufügen

Rudolf Weber, 8252 Coswig

(Bezirk Dresden)
Lutherstraße 3, Telefon Dresden 7 38 02