$\boxed{Ü\ 41}$

Drehzahl: Über $Y_{H,M}$ aus Gl. (5-9):

$$Y_{H,M} \leq \frac{p_{UW}}{\varrho} + \frac{c_{UW}^2}{2} - Y_{V,SL} - \frac{p_{Da}}{\varrho} - g \cdot H_{S,max}$$

mit $p_{UW} = p_b = 10^5\,Pa$, $c_{UW} \approx 0$, $Y_{V,SL} = 5{,}4\ m^2/s^2$

$p_{Da} = 0{,}024 \cdot 10^5\,Pa$ lt. Tafel 15-9 bei 20°C

$H_{S,max} = H_S = 3{,}2\,m$ gesetzt

$$Y_{H,M} \leq \frac{1 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^3} - 5{,}4 - \frac{0{,}024 \cdot 10^5}{1 \cdot 10^3} - 9{,}81 \cdot 3{,}2$$

$$\left[\frac{N/m^2}{kg/m^3} \quad \frac{m^2}{s^2} \quad \frac{N/m^2}{kg/m^3} \quad \frac{m}{s^2} \cdot m\right]$$

$$Y_{H,M} \leq 60{,}81\ m^2/s^2$$

Hiermit aus Gl. (5-20) bei geschätzt $S_y = 0{,}4$ (Gl. 5-22) und $\lambda_L = 0{,}94$ gemäß Gl. (8-119):

$$n \leq S_y \cdot Y_{H,M}^{3/4} \cdot \dot{V}_{La}^{-1/2}$$

$$\dot{V}_{La} = \dot{V}/\lambda_L = (90/3600)/0{,}94\ [m^3/s] = 0{,}025/0{,}94\ m^3/s$$

$$\dot{V}_{La} = 0{,}0266\ m^3/s$$

$$n \leq 0{,}4 \cdot 60{,}81^{3/4} \cdot 0{,}0266^{-1/2}\ \left[(m^2/s^2)^{3/4} \cdot (m^3/s)^{-1/2}\right]$$

$$n \leq 53{,}4\ s^{-1}$$

ausgeführt $\underline{n = 48\ s^{-1}}$ → 2-poliger E-Motor

Stufenzahl: $i = Y/\Delta Y$ Mit

$Y = g \cdot H_{ges} = 9{,}81 \cdot 220\ [m/s^2 \cdot m] = 2158{,}20\ m^2/s^2$

Nach Unterabschnitt 10.4.3.2 $H_{ges,St} = 30 \ldots 100$ m

also $\Delta Y = g \cdot H_{ges,St} = 300 \ldots 1000\ m^2/s^2$

Das bedeutet: $i = 7 \ldots 3$ Stufen notwendig.

Oder aus Schnelläufigkeit (Gl. 4-90):

$$n_{y,M} = n \cdot \dot{V}^{1/2} \cdot Y^{-3/4} = 48 \cdot 0{,}025^{1/2} \cdot 2158^{-3/4} = 0{,}024$$

Nach Tab. 10-1 für Radform I $n_y = 0{,}03 \ldots 0{,}12$

Um guten Wirkungsgrad zu erreichen sollte nach Bild 10-1 möglichst $n_y \geq 0{,}06$ sein. Damit aus Gl. (4-75):

$$\Delta Y = (n \cdot \dot{V}^{1/2}/n_y)^{4/3}$$

$$\Delta Y \leq (48 \cdot 0{,}025^{1/2}/0{,}06)^{4/3}\ \left[(s^{-1} \cdot (m^3/s)^{1/2})^{4/3}\right]$$

$\Delta Y \leq 635\ m^2/s^2$ Damit

$i = Y/\Delta Y \geq 2158/635 = 3{,}4$

Ausgeführt: $\underline{i = 4 \text{ Stufen, Radform I}}$

Dazu $\Delta Y = Y/i = 2158/4\ [m^2/s^2] = 539{,}5\ m^2/s^2$

$$\underline{n_y} = 48 \cdot 0{,}025^{1/2} \cdot 539{,}5^{-3/4} = \underline{0{,}068}$$

Wirkungsgrade: Abhängig von spezifischer Drehzahl sowie Art und Ausführung der Pumpe.

Festgelegt: Pumpe in Gußausführung mit Leiträder in den Zwischenstufen und Spiralgehäuse bei der Endstufe. Hierfür nach

Bild 10-1 für $n_y = 0{,}068$ $\eta_e = 0{,}83$

Gl. (8-130): $\eta_{Sch} = \eta_e + (0{,}05 \ldots 0{,}1) = 0{,}88 \ldots 0{,}93$

Gl. (8-131): $\eta_{Sch} = \sqrt{\eta_e} - (0{,}01 \ldots 0{,}04) = 0{,}9 \ldots 0{,}87$

Erwartet: $\underline{\eta_{Sch} = 0{,}87}$; $\underline{\eta_e = 0{,}83}$; $\underline{\lambda_L = 0{,}94}$

Antriebsleistung:

$$P_e = \dot{m} \cdot Y_e = \varrho \cdot \dot{V} \cdot g \cdot H_{ges}/\eta_e \quad \text{(Gl. 8-114)}$$

$$P_e = 10^3 \cdot 0{,}025 \cdot 9{,}81 \cdot 220/0{,}83\ \left[kg/m^3 \cdot m^3/s \cdot m/s^2 \cdot m\right]$$

$$\underline{P_e = 65006\ W \approx 65\ kW}$$

Wellendurchmesser (Abschätzung):

Gl. (10-46) $D_{We} \approx \sqrt[3]{5 \cdot T_e/\tau_t}$

Gl. (10-47) $T_e = P_e/(2 \cdot \pi \cdot n)$

$= 65006/(2 \cdot \pi \cdot 48)\ [(Nm/s)/(1/s)]$

$= 216$ Nm

Gl. (10-48) $\tau_t = 17\ N/mm^2$ angenommen

Ausgewertet:

$$D_{We} = \sqrt[3]{5 \cdot 216000/17}\ \left[\sqrt[3]{Nmm/(N/mm^2)}\right] = 39{,}9\ mm$$

Ausgeführt: Wegen Wellen/Naben - Befestigung (meist Paßfeder) $\underline{D_{We} = 45\ mm}$

Nabendurchmesser: Nach Gl. (10-49):

$D_N \approx (1{,}2 \ldots 1{,}5) \cdot D_{We} = 54 \ldots 67{,}5$ mm

Ausgeführt: $\underline{D_N = 58\ mm}$

Laufradabmessungen:

Vorläufige Festlegung:

Saugseite: D_{SM}; D_1; β_1; b_1

Saugmundgeschwindigkeit: Nach Gl. (10-50):

$c_{SM} = c_0/(1{,}0 \ldots 1{,}25)$ mit $c_0 = c_{0m}$ bei $\alpha_0 = 90°$

$c_{0m} = \varepsilon \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta Y}$ aus Gl. (4-93)

Mit Gl. (110.4) $\varepsilon = (0{,}73 \ldots 0{,}87) \cdot n_y^{2/3}$

$\varepsilon = (0{,}73 \ldots 0{,}87) \cdot 0{,}068^{2/3}$

$\varepsilon = 0{,}12 \ldots 0{,}14$; angenommen

$\varepsilon = 0{,}13$ (Mittelwert)

$$c_{0m} = 0{,}13 \cdot \sqrt{2 \cdot 539{,}5}\ [m/s] = 4{,}27\ m/s \approx 4{,}3\ m/s$$

$c_{SM} = 4{,}3 \ldots 3{,}4$ m/s Ausgeführt: $\underline{c_{SM} = 3{,}7\ m/s}$

Saugmunddurchmesser: Aus Durchfluß (Gl. 2-54/2-63):

$$D_{SM} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{\dot{V}_{La}}{c_{SM}} + D_N^2} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \frac{0{,}0266}{3{,}7} + 0{,}058^2}$$

$$\left[\sqrt{\frac{m^3/s}{m/s} \quad m^2}\right]$$

$D_{SM} = 0{,}11188$ m Ausgeführt $\underline{D_{SM} = 112\ mm}$

Saugkantendurchmesser: $D_1 \geq D_{SM}$

Ausgeführt: $\underline{D_1 = 115\ mm}$

Radbreite: Aus Durchfluß (Gl 10-52):

$$b_1 = \frac{\dot V_{La}}{c_0 \cdot D_1 \cdot \pi} = \frac{0{,}0266}{4{,}3 \cdot 0{,}115 \cdot \pi} \left[\frac{m^3/s}{m/s \cdot m}\right] = 0{,}0171\,m$$

Ausgeführt: $\underline{b_1 = 17\ \text{mm}}$

Berichtigung von c_0: $c_0 = 4{,}3 \cdot 17{,}1/17 = 4{,}33$ m/s

Relativwinkel:

Mit $u_1 = D_1 \cdot \pi \cdot n = 0{,}115 \cdot \pi \cdot 48$ [m/s] $= 17{,}34$ m/s
und vorerst geschätzt $\tau_1 = 1{,}2$ (Gl. 10-54)

$\tan\beta_0 = c_0/u_1 = 4{,}33/17{,}34 = 0{,}2497 \longrightarrow \beta_0 = 14°$

$\tan\beta_1 = c_1/u_1 = \tau_1 \cdot c_0/u_1 = \tau_1 \cdot \tan\beta_0 = 1{,}2 \cdot 0{,}2497$

$\tan\beta_1 = 0{,}2996 \longrightarrow \underline{\beta_1 = 16{,}7° \approx 16{,}5°}$

Druckseite: $D_2;\ \beta_2;\ b_2$

Richtwerte: $\beta_2 = 15 \ldots 40°$ (Gl. 6-18)
$\psi = 1 \ldots 1{,}1$ (Unterabschnitt 4.3.3.2)
$D_2/D_1 = 1{,}6 \ldots 2{,}3 \ldots 3{,}2$ (Gl. 10-55)

1. Möglichkeit: Vorabfestlegung des Druckkantendurchmessers D_2: Abschätzung mit Gl. (4-51)

$u_2 = \sqrt{2 \cdot \Delta Y/\psi} = \sqrt{2 \cdot 539{,}5/1}\ \left[\sqrt{m^2/s^2}\right] = 32{,}85$ m/s

$D_2 = u_2/(\pi \cdot n) = 32{,}85/(\pi \cdot 48)\ \left[(m/s)/s^{-1}\right] = 0{,}218$ m

somit $D_2/D_1 = 218/115 \approx 1{,}9$ (günstig!)

Druckkantenwinkel:

$\tan\beta_2 = c_{2m}/(u_2 - c_{2u})$ (Gl. 2-85). Mit

$c_{2u} = Y_{Sch\infty}/u_2$ aus Gl. (3-15)

$Y_{Sch\infty} = \Delta Y/(k_M \cdot \eta_{Sch})$ wobei geschätzt $k_M = 0{,}75$

$Y_{Sch\infty} = 539{,}5/(0{,}75 \cdot 0{,}87)\ [m^2/s^2] = 827\ m^2/s^2$

$c_{2u} = 827/32{,}85$ [m/s] $= 25{,}17$ m/s $(< u_2)$

Nach Gl. (10-56) und Vorabrechnung angenommen:

$c_{2m} = 0{,}87 \cdot c_0 = 0{,}87 \cdot 4{,}33 = 3{,}77$ m/s

$$\tan\beta_2 = \frac{3{,}77}{32{,}85 - 25{,}17} = 0{,}4909 \longrightarrow \underline{\beta_2 = 26°}$$

2. Möglichkeit: Vorabfestlegung von Winkel β_2.
Festgelegt: $\beta_2 = 22{,}5°$. Aus Gl. (3-19)

$$u_2 = \frac{c_{2m}}{2 \cdot \tan\beta_2} + \sqrt{\left(\frac{c_{2m}}{2 \cdot \tan\beta_2}\right)^2 + Y_{Sch\infty}}$$

$$u_2 = \frac{3{,}75}{2 \cdot \tan 22{,}5°} + \sqrt{\left(\frac{3{,}75}{2 \cdot \tan 22{,}5°}\right)^2 + 827}\ \left[\sqrt{m^2/s^2}\right]$$

$\underline{u_2 = 33{,}60\ \text{m/s}}$

$D_2 = u_2/(\pi \cdot n) = 33{,}60/(\pi \cdot 48)$ [m] $= 0{,}223$ m

Letztlich festgelegt: $D_2 = 230$ mm, $\beta_2 = 22{,}5°$

Laufschaufelzahl: Nach Gl. (2-72) mit $K_{Sch} = 5 \ldots 6{,}5$

$$z_{La} = K_{Sch} \cdot \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1} \cdot \sin\frac{\beta_2 + \beta_1}{2}$$

$$z_{La} = (5 \ldots 6{,}5) \cdot \frac{230 + 115}{230 - 115} \cdot \sin\frac{22{,}5 + 16{,}5}{2} = 5 \ldots 6{,}5$$

Ausgeführt $\underline{z_{La} = 6}$

Nachrechnung:

Schaufeldicke: Ausgeführt $s_1 = s_2 = 3$ mm (Guß)

Saugkante: Mit Gl. (2-59), (2-62) und (2-65)

$t_1 = D_1 \cdot \pi/z_{La} = 115 \cdot \pi/6$ [mm] $= 60{,}21$ mm

$\sigma_1 = s_1/\sin\beta_1 = 3/\sin 16{,}5°$ [mm] $= 10{,}56$ mm

$\tau_1 = t_1/(t_1 - \sigma_1) = 60{,}21/(60{,}21 - 10{,}56) = 1{,}21$

$\tan\beta_1 = \tau_1 \cdot \tan\beta_0 = 1{,}21 \cdot 0{,}2497 = 0{,}3021 \longrightarrow \underline{\beta_1 = 16{,}8°}$

Somit liegen die Werte der Saugkante fest:

$\underline{D_N = 58\ \text{mm}}$, $\underline{D_{SM} = 112\ \text{mm}}$, $\underline{D_1 = 115\ \text{mm}}$, $\underline{b_1 = 17\ \text{mm}}$

$\underline{\beta_1 = 16{,}8°}$ und $\underline{s_1 = 3\text{mm}}$

Saugkanten-Geschwindigkeitsdreieck:

$c_1 = \tau_1 \cdot c_0 = 1{,}21 \cdot 4{,}3$ [m/s] $= \underline{5{,}20\ \text{m/s}}$, $\alpha_1 = 90°$

$w_1 = \sqrt{c_1^2 + u_1^2} = \sqrt{5{,}2^2 + 17{,}34^2}$ [m/s] $= \underline{18{,}1\ \text{m/s}}$

$u_1 = 17{,}34$ m/s (von weiter oben!)

Druckkante:

Minderleistungsziffer: $k_M = 1/(1 + p)$ (Gl. 3-26)

Mit Gl. (3-38) bei $r_1/r_2 = D_1/D_2 = 115/230 = 0{,}5$

$\psi' = 0{,}6 \cdot (1 + \beta_2°/60) = 0{,}6 \cdot (1 + 22{,}5/60) \approx 0{,}83$

Gl. (3-33) $S = (0{,}115^2/2) \cdot (1 - 0{,}5^2) = 0{,}00496\ m^2$

Gl. (3-31) $p = \psi' \cdot \dfrac{r_2^2}{z_{La} \cdot S} = 0{,}83 \cdot \dfrac{0{,}115^2}{6 \cdot 0{,}00496} = 0{,}37$

Mit den Werten ergibt sich:

$k_M = 1/(1 + 0{,}37) = 0{,}73$ Damit

$Y_{Sch\infty} = \Delta Y/(k_M \cdot \eta_{Sch}) = 539{,}5/(0{,}73 \cdot 0{,}87)\ [m^2/s^2]$
$= 849{,}5\ m^2/s^2$

$$u_2 = \frac{3{,}75}{2 \cdot \tan 22{,}5} + \sqrt{\left(\frac{3{,}75}{2 \cdot \tan 22{,}5°}\right)^2 + 849{,}5}\ \left[\sqrt{m^2/s^2}\right]$$

$\underline{u_2 = 34{,}02\ m/s}$

$D_2 = u_2/(\pi \cdot n) = 34{,}02/(\pi \cdot 48)$ [m] $= 0{,}226$ m

Ausgeführt somit $\underline{D_2 = 230\ \text{mm}}$

Meridianbreite: Aus Durchfluß

$$b_2 = \frac{\dot V_{La}}{c_{2m} \cdot D_2 \cdot \pi \cdot 1/\tau_2} \quad \text{nach Gl. (10-59) mit}$$

$\tau_2 = t_2/(t_2 - \sigma_2)$ Gl. (2-61)

$t_2 = D_2 \cdot \pi/z_{La} = 230 \cdot \pi/6\ [mm] = 120{,}43\ mm$

$\sigma_2 = s_2/\sin\beta_2 = 3/\sin 22{,}5° = 7{,}84\ mm$

$\tau_2 = 120{,}43/(120{,}43 - 7{,}84) = 1{,}07$

$$\underline{b_2} = \frac{0{,}0266 \cdot 1{,}07}{3{,}75 \cdot 0{,}230 \cdot \pi} \left[\frac{m^3/s}{m/s \cdot m}\right] = 0{,}0105\ m = \underline{10{,}5\ mm}$$

Damit liegen auch die Werte der Laufrad-Druckkante fest:

$\underline{D_2 = 230\ \text{mm}}$, $\underline{b_2 = 10{,}5\ \text{mm}}$, $\underline{s_2 = 3\ \text{mm}}$, $\underline{\beta_2 = 22{,}5°}$

Druckkanten-Geschwindigkeits-Dreieck:

$u_2 = D_2 \cdot \pi \cdot n = 0{,}23 \cdot \pi \cdot 48 \ [m/s] = 34{,}68 \ m/s$

$c_{2m} = 3{,}75 \ m/s = w_{2m}$

$w_{2u} = c_{2m}/\tan\beta_2 = 3{,}75/\tan 22{,}5^\circ = 9{,}05 \ m/s$

$w_2 = \sqrt{w_{2u}^2 + w_{2m}^2} = \sqrt{9{,}05^2 + 3{,}75^2} \ [m/s] = 9{,}80 \ m/s$

$c_{2u} = u_2 - w_{2u} = 34{,}68 - 9{,}05 \ [m/s] = 25{,}63 \ m/s$

$c_2 = \sqrt{c_{2u}^2 + c_{2m}^2} = \sqrt{25{,}63^2 + 3{,}75^2} \ [m/s] = 25{,}9 \ m/s$

Tab. 1. Lauf-Schaufelkontur für linearen w-Verlauf.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Punkt Nr.	$r_x = D_x/2$ [m]	Δr_x [m]	b_x 1) [m]	w_x 2) [m/s]	t_x 3) [m]	β_x 4) [grd]	h_x 5) [m^{-1}]	$\Delta r_x \cdot \bar{h}_x$ 6) [–]	$\Sigma \Delta r_x \cdot \bar{h}_x$ [–]	φ_x 7) [grd]
I	$57{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$17 \cdot 10^{-3}$	18,1	$60{,}21 \cdot 10^{-3}$	16,8	57,6	0,5425	0	0
II	$67{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$15{,}87 \cdot 10^{-3}$	16,66	$70{,}69 \cdot 10^{-3}$	16,23	50,89	0,475	0,5425	31,1
III	$77{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$14{,}74 \cdot 10^{-3}$	15,21	$81{,}16 \cdot 10^{-3}$	16,31	44,1	0,409	1,0175	58,3
IV	$87{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$13{,}61 \cdot 10^{-3}$	13,78	$91{,}63 \cdot 10^{-3}$	16,88	37,66	0,345	1,4265	81,73
V	$97{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$12{,}48 \cdot 10^{-3}$	12,33	$102{,}1 \cdot 10^{-3}$	18,16	31,27	0,273	1,7715	101,5
VI	$107{,}5 \cdot 10^{-3}$	$7{,}5 \cdot 10^{-3}$	$11{,}35 \cdot 10^{-3}$	10,88	$112{,}57 \cdot 10^{-3}$	20,22	25,26	0,173	2,0445	117,14
VII	$115 \cdot 10^{-3}$		$10{,}5 \cdot 10^{-3}$	9,8	$120{,}43 \cdot 10^{-3}$	22,52	20,97		2,2175	127,05

1) Aus Meridianschnitt, Bild 1

2) Linear aufgeteilt

3) $t_x = D_x \cdot \pi / z_{La} = 2 \cdot r_x \cdot \pi / 6 = r_x \cdot \pi / 3$

4) Lt. Gl. (6-25) $\sin\beta_x = \frac{s_x}{t_x} + \frac{\dot{V}_{La}}{\pi \cdot D_x \cdot b_x \cdot w_x} = \frac{3 \cdot 10^{-3} [m]}{t_x} + \frac{0{,}0266 \ [m^3/s]}{\pi \cdot 2 \cdot r_x \cdot b_x \cdot w_x} = \frac{3 \cdot 10^{-3} [m]}{t_x} + \frac{4{,}2335 \cdot 10^{-3} [m^3/s]}{r_x \cdot b_x \cdot w_x}$

5) $h_x = (r_x \cdot \tan\beta_x)^{-1}$

6) $\Delta r_x \cdot \bar{h}_x = \Delta r_x \cdot (h_x + h_{x+1})/2$

7) Nach Gl. (6-28) $\varphi_x^\circ = (180/\pi) \cdot \Sigma(\Delta r_x \cdot \bar{h}_x)$

Tab. 2. Schaufelkontur für linearen β-Verlauf.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Punkt Nr	$r_x = D_x/2$ [m]	Δr_x [m]	b_x 1) [m]	β_x 2) [grd]	t_x 3) [m]	w_x 4) [m/s]	h_x 5) [m^{-1}]	$\Delta r_x \cdot \bar{h}_x$ 6) [–]	$\Sigma (\Delta r_x \cdot \bar{h}_x)$ [–]	φ_x 7) [grd]
I	$57{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$17 : 10^{-3}$	16,81	$60{,}21 \cdot 10^{-3}$	18,09	57,57	0,5186	0	0
II	$67{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$15{,}87 \cdot 10^{-3}$	17,8	$70{,}69 \cdot 10^{-3}$	15,0	46,14	0,4203	0,5186	29,71
III	$77{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$14{,}74 \cdot 10^{-3}$	18,79	$81{,}16 \cdot 10^{-3}$	13,01	37,92	0,3485	0,939	53,8
IV	$87{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$13{,}61 \cdot 10^{-3}$	19,78	$91{,}16 \cdot 10^{-3}$	11,62	31,78	0,2941	1,2874	73,76
V	$97{,}5 \cdot 10^{-3}$	$10 \cdot 10^{-3}$	$12{,}48 \cdot 10^{-3}$	20,77	$102{,}1 \cdot 10^{-3}$	10,7	27,04	0,2517	1,5815	90,61
VI	$107{,}5 \cdot 10^{-3}$	$7{,}5 \cdot 10^{-3}$	$11{,}35 \cdot 10^{-3}$	21,76	$112{,}56 \cdot 10^{-3}$	10,09	23,3	0,1661	1,8332	105,3
VII	$115 \cdot 10^{-3}$		$10{,}5 \cdot 10^{-3}$	22,5	$120{,}43 \cdot 10^{-3}$	9,81	21,0		2,0	114,6

1) Aus Meridianschnitt, Bild 1

2) Linear aufgeteilt

3) $t_x = D_x \cdot \pi / z_{La} = 2 \cdot r_x \cdot \pi / 6 = r_x \cdot \pi / 3$

4) Aus Gl. (6-25) $w_x = \frac{\dot{V}_{La}}{\pi \cdot D_x \cdot b_x \cdot (\sin\beta_x - s_x/t_x)} = \frac{0{,}0266 \ [m^3/s]}{\pi \cdot D_x \cdot b_x \cdot (\sin\beta_x - 3 \cdot 10^{-3}/t_x [m])}$

5) $h_x = (r_x \cdot \tan\beta_x)^{-1}$

6) $\Delta r_x \cdot \bar{h}_x = \Delta r_x \cdot (h_x + h_{x+1})/2$

7) Nach Gl. (6-28) $\varphi_x^\circ = [360/(2 \cdot \pi)] \cdot \Sigma(\Delta r_x \cdot \bar{h}_x) = (180/\pi) \cdot \Sigma(\Delta r_x \cdot \bar{h}_x)$

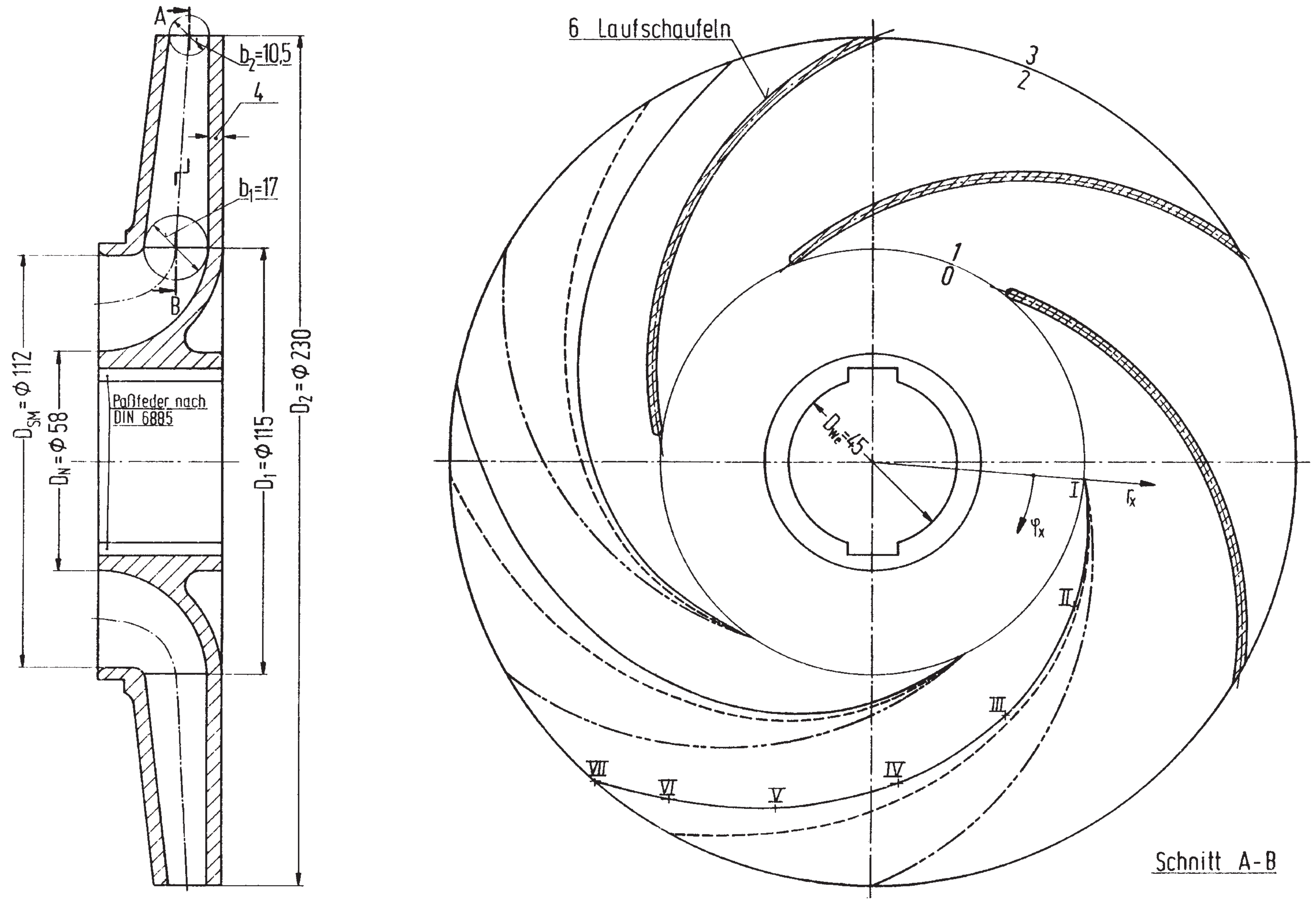


Bild 1. Lösungsskizze 1 zu Ü 41

Entwurfszeichnung des Laufrades. Die dargestellten Laufschaufeln sind als Kreisbogenschaufeln ausgebildet. Die eingezeichneten Skelettlinien zeigen neben dem Schaufelverlauf mittels einem Kreisbogen——die punktweise errechneten Schaufelverläufe: ----mit linearem β-Verlauf, ——mit linearem w-Verlauf.

α_2 = arctan(c_{2m}/c_{2u}) = arctan(3,75/25,63)

$\underline{\alpha_2}$ = 8,32 ° ⟶ Leitrad sinnvoll (Tab. 7-1)

Reaktionsgrad: Nach Gl. (4-43) mit $c_{3u} = k_M \cdot c_{2u}$

$r \approx 1 - c_{3u}/(2 \cdot u_2) = 1 - k_M \cdot c_{2u}/(2 \cdot u_2)$

$\underline{r} \approx 1 - 0{,}73 \cdot 25{,}63/(2 \cdot 34{,}68) = \underline{0{,}73}$

Das bedeutet: 73 % des Druckes werden im Laufrad aufgebaut.

Mit den Werten von Saug- und Druckkante kann der Meridianschnitt des Laufrades gezeichnet werden (Bild 1).

Laufschaufelform (Unterabschnitt 6.1.5.2)

Zum Vergleich sollen die verschiedenen Möglichkeiten einander gegenübergestellt werden.

Einbogenschaufel:

$$\rho = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2 \cdot r_2 \cdot \cos\beta_2 - 2 \cdot r_1 \cdot \cos\beta_1} \qquad \text{(Gl. 6-21)}$$

$$\underline{\rho} = \frac{115^2 - 57{,}5^2}{2 \cdot 115 \cdot \cos 22{,}5° - 2 \cdot 57{,}5 \cdot \cos 16{,}8°} \left[\frac{mm^2}{mm}\right] \approx \underline{97\ mm}$$

$$R = \sqrt{\rho^2 + r_2^2 - 2 \cdot \rho \cdot r_2 \cdot \cos\beta_2} \qquad \text{(Gl. 6-22)}$$

$$R = \sqrt{97^2 + 115^2 - 2 \cdot 97 \cdot 115 \cdot \cos 22{,}5°}\left[\sqrt{mm^2}\right] \approx 45\ mm$$

Die Skelettlinie der Kreisbogenschaufel, d. h. der Einbogenschaufel, ist ebenfalls in Bild 1 dargestellt (Strich-Punkt-Linie mit zwei Punkten zwischen den Strichen)!

Punktweise berechnete Schaufeln:

Die punktweise Berechnung der Laufschaufeln erfolgt tabellarisch gemäß Unterabschnitt 6.1.5.2. Zum Vergleich ist das Verfahren ausgeführt für

- linearen w-Verlauf, Tab. 1
- linearem β-Verlauf, Tab. 2

Die zugehörigen Schaufelkonturen (Skelettlinien) sind in Bild 1 gezeichnet. Es bestätigt sich, daß die Einbogenschaufel am kürzesten ist und damit der Schaufelkanal sich am schnellsten öffnet, was größere Ablösungsgefahr bedeutet. Für die Schaufel mit linearem w-Verlauf gilt das Umgekehrte (grössere Schaufelreibung). Der Schaufel bei linearem β-Verlauf liegt dazwischen. Zur Gegenüberstellung und Kontrolle sind die Verhältnisse in Bild 2 als Diagramme aufgetragen.

Auszuführen wäre in diesem Fall die Schaufel mit linearem w-Verlauf, da Umfangserstreckung (Bild 6-12), Winkel $\varepsilon = \varphi_{max}$ = 127,05 ° günstig ist (< 150°)

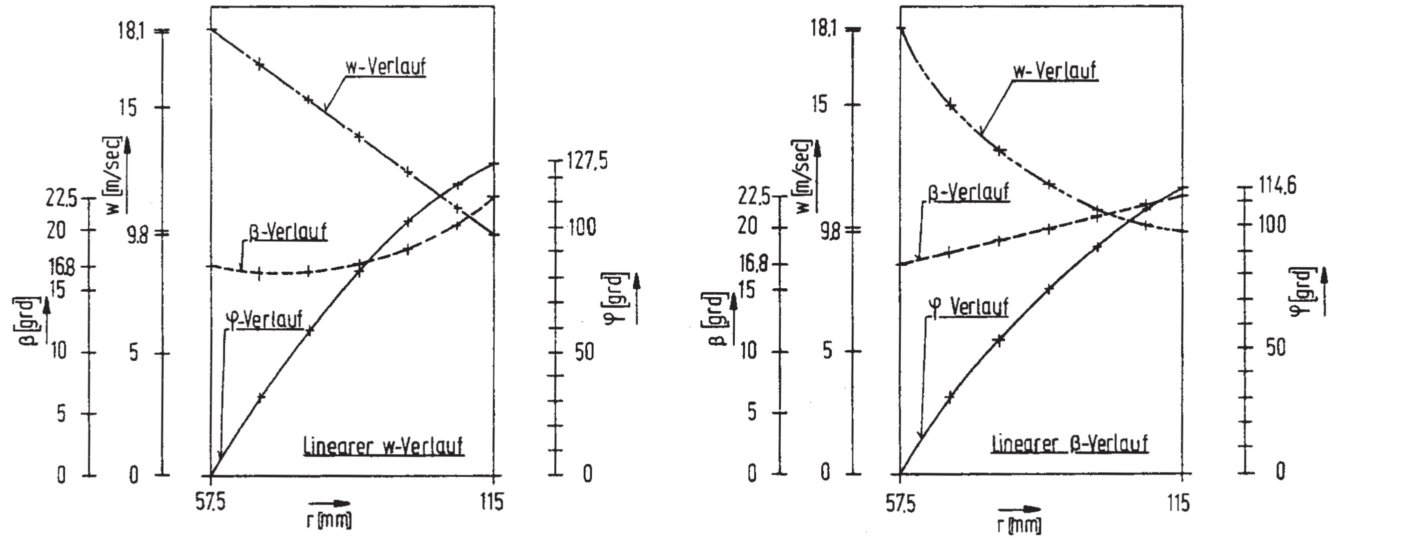


Bild 2 Lösungsskizze 2 zu Ü 41. Schaubilder zum Prüfen der punktweise errechneten Laufschaufeln. Unstetigkeiten in den Kurvenverläufen weisen auf Rechenfehler hin.

Leitrad:

Angewendet als Leitvorrichtung der Zwischenstufen (Stufen I bis III)

Meridianbreite b_{Le}:

Konstant ausgeführt: $b_{Le} = b_4 = b_5 = b_6$ Nach

Gl. (7-2) $b_{Le} = b_{La} + (1...2\ mm) = 11{,}5...12{,}5$ mm

Gl. (7-3) $b_{Le} = (1{,}02...1{,}1) \cdot b_{La} = 10{,}7...11{,}6$ mm

Ausgeführt: $\underline{b_{Le} = 12\ mm}$

Eintrittsdurchmesser $D_4 = D_5$: Mit $s_{Sp,3-4} = 0{,}5...3$mm nach Unterabschnitt 7.2.1.2:

$D_4 = D_5 = D_2 + 2 \cdot s_{Sp,3-4} = 230 + 2 \cdot (0{,}5...3)$ mm
$= 231...236$ mm

Ausgeführt: $\underline{D_4 = D_5 = 234\ mm}$

Schaufeldicke: Ausgeführt $s_5 = 3$ mm (wie Laufrad)

Zuströmverhältnisse:

Gl. (7-12) $\tan\alpha_5 = \mu\cdot\tau_5\cdot\tan\alpha_4$

Gl. (7-11) $\mu \approx 1{,}2 \ldots 1{,}8$

Gl. (7-14) $\tau_5 \approx 1{,}02 \ldots 1{,}2$

Gl. (7-6) $\tan\alpha_4 \approx (b_2/b_5)\cdot\tan\alpha_3$ oder exakt

Gl. (7-5) $\tan\alpha_4 = (b_2/b_5)\cdot\tan\alpha_3 + [\lambda/(4\cdot b_5)]\cdot(r_5-r_2)$

mit $\lambda \approx 0{,}04$

Gl. (3-28) $c_{3u} = k_M\cdot c_{2u}$

Gl. (2-90) $c_{3m} = c_{2m}/\tau_2$

Gl. (2-92) $\tan\alpha_3 = \frac{c_{3m}}{c_{3u}} = \frac{1}{\tau_2\cdot k_M}\cdot\tan\alpha_2$

Ausgewertet: Mit $c_{2u} = 25{,}63$ m/s, $c_{2m} = 3{,}75$ m/s, $\alpha_2 = 8{,}32°$, $\tau_2 = 1{,}07$, $k_M = 0{,}73$ und $b_2 = 10{,}5$ mm.

$$\left.\begin{aligned} c_{3u} &= 0{,}73\cdot 25{,}63 = 18{,}71 \text{ m/s} \\ c_{3m} &= 3{,}75/1{,}07 = 3{,}50 \text{ m/s} \end{aligned}\right\rangle \tan\alpha_3 = 0{,}1873 \quad \text{oder}$$

$$\tan\alpha_3 = \frac{1}{1{,}07\cdot 0{,}73}\cdot\tan 8{,}32 = 0{,}1873 \longrightarrow \alpha_3 = 10{,}6\,°$$

$$\tan\alpha_4 = \frac{10{,}5}{12}\cdot 0{,}1873 + \frac{0{,}04}{4{,}12}\cdot(117 - 115) \quad \text{(Gl. 7-5)}$$

$$= 0{,}1639 + 0{,}0017 = 0{,}1656 \quad \text{(wie Gl. 7-6)}$$

$\alpha_4 = 9{,}4\,°$

Mit erwartet $\mu = 1{,}2$ und vorerst geschätzt $\tau_5 = 1{,}19$:

$$\tan\alpha_5 = 1{,}2\cdot 1{,}19\cdot 0{,}1656 = 0{,}236 \longrightarrow \alpha_5 = 13{,}28\,°$$

Leitschaufelzahl: Nach Gl. (7-30)

$$z_{Le} \approx 2\cdot\pi\cdot\frac{r_5}{b_5 + s_5}\cdot\sin\alpha_5 = 2\cdot\pi\cdot\frac{117}{12 + 3}\cdot\sin 13{,}28\,°$$

$z_{Le} = 11{,}26$ Ausgeführt: $z_{Le} = 10$

Überprüfung von Verengungsfaktor τ_5:

$\tau_5 = t_5/(t_5 - \sigma_5)$ Mit

$t_5 = D_5\cdot\pi/z_{Le} = 234\cdot\pi/10$ [mm] $= 73{,}51$ mm

$\sigma_5 = s_5/\sin\alpha_5 = 3/\sin 13{,}28° = 13{,}06$ mm

$\tau_5 = 73{,}51/(73{,}51 - 13{,}06) = 1{,}22$ (etwa wie angen.!)

Eintrittsweite a_5:

Nach Gl. (7-25):

$$a_5 = \frac{2\cdot\pi}{z_{Le}}\cdot r_5\cdot\sin\alpha_5\cdot\left(1 + \frac{\pi}{2\cdot z_{Le}}\cdot\sin(2\cdot\alpha_5)\right) - s_5$$

$$a_5 = \frac{2\cdot\pi}{10}\cdot 117\cdot\sin 13{,}28°\left(1 + \frac{\pi}{2\cdot 10}\cdot\sin(2\cdot 13{,}28°)\right) - 3 \text{ [mm]}$$

$a_5 = 15{,}07$ mm

Oder näherungsweise lt. Gl. (7-26):

$$a_5 = \frac{2\cdot\pi}{z_{Le}}\cdot r_5\cdot\sin\alpha_5 - s_5 = \frac{2\cdot\pi}{10}\cdot 117\cdot\sin 13{,}28° - 3 \text{ [mm]}$$

$a_5 = 13{,}89$ mm (Abweichung zu groß !)

Ausgeführt: $a_5 = 15$ mm

Leitschaufelform:

Eintrittsverlauf (Schräganschnitt): Meist als Kreisbogen mit Radius ϱ_{Schr} nach Gl. (7-27) ausgeführt:

$\varrho_{Schr} = (r_C + r_5)/(2\cdot\cos\alpha_5)$ Gl. (7-27) Mit

Gl. (7-28) $r_C \approx r_5 + s_5 + a_5$

$\approx 117 + 3 + 15 = 135$ mm

Oder nach Gl. (7-21)

$$r_C = r_5\cdot\exp[(\pi/z_{Le})\cdot\sin(2\cdot\alpha_5)]$$

$$= 117\cdot\exp[(\pi/10)\cdot\sin(2\cdot 13{,}28°)] \text{ [mm]}$$

$= 134{,}65$ mm ≈ 135 mm (wie zuvor)

$\varrho_{Schr} = (135 + 117)/(2\cdot\cos 13{,}28°)$ [mm] $= 129{,}5$ mm

Radius des Kreises auf dem die Mittelpunkte von ϱ_{Schr} liegen, nach Gl. (7-29)

$$R_{Schr} = \sqrt{r_5^2 + \varrho_{Schr}^2 - 2\cdot r_5\cdot\varrho_{Schr}\cdot\cos\alpha_5}$$

$$R_{Schr} = \sqrt{117^2 + 129{,}5^2 - 2\cdot 117\cdot 129{,}5\cdot\cos 13{,}28°}$$

$R_{Schr} = 31{,}09$ mm ≈ 31 mm

Hilfskreis: $D_5\cdot\sin\alpha_5 = 234\cdot\sin 13{,}28° = 53{,}8$ mm

Schräganschnitt-Winkel: Nach Gl. (7-17) und (7-19):

$$\varphi = \frac{\ln(r_C/r_5)}{\tan\alpha_5} = \frac{\ln(134{,}65/117)}{\tan 13{,}28°} = 0{,}595 \longrightarrow \varphi° = 34{,}1°$$

$$\gamma = \frac{2}{\sin(2\alpha_5)}\cdot\ln\frac{r_C}{r_5} = \frac{2}{\sin(2\cdot 13{,}28)}\cdot\ln\frac{134{,}65}{117}$$

$\gamma = 0{,}6285 \longrightarrow \gamma° = 36{,}01°$ Oder

$\gamma = 360/z_{Le} = 360°/10 = 36\,°$

Schaufelverlauf: Vergleichsweise sollen die verschiedenen Schaufelkonturen nach Unterabschnitt 7.2.1.3 gegenübergestellt werden.

Richtwerte:

Schaufeldicke	$s_{Le} \geq 3$ mm
Erweiterungswinkel	$\delta \leq 8\ldots 12°$
Kanallänge	$L_{Le} \leq 4\cdot a_5$
Endquerschnitt	$A_6 \leq (1{,}5\ldots 3)\cdot A_5$
Außendurchmesser	$D_6 \approx (1{,}2\ldots 1{,}4\ldots 1{,}6)\cdot D_5$

$D_6 \approx (1{,}2\ldots 1{,}4\ldots 1{,}6)\cdot 234 = 280\ldots 328\ldots 374$ mm

Ausgeführt: $D_6 = 334$ mm , $s_{Le} = 5$ mm

Anfangswerte: Aus Konstruktion (Bild 3)

für Fortsetzung nach Schräganschnitt: $r_{Le,x} = 137$ mm und $\alpha_{Le,x} = 14°$. Hierzu aus Gl. (7-33) mit $b_{Le,x}$ = konst = 12 mm , $s_{Le,x}$ = konst = 3 mm , $z_{Le} = 10$ und $t_{Le,x} = 2\cdot r_{Le,x}\cdot\pi/z_{Le} = 2\cdot 137\cdot\pi/10 = 86{,}1$ mm:

$$c_{Le,x} = \frac{\dot V_{La}}{z_{Le}\cdot b_{Le,x}\cdot t_{Le,x}\cdot(\sin\alpha_{Le,x} - s_{Le,x}/t_{Le,x})} \qquad (16\text{-}9)$$

$$c_{Le,x} = \frac{0{,}0266}{10\cdot 0{,}012\cdot 0{,}0861\cdot(\sin 14° - 5/86{,}1)}\left[\frac{m^3/s}{m^2}\right]$$

$c_{Le,x} = 14{,}0$ m/s

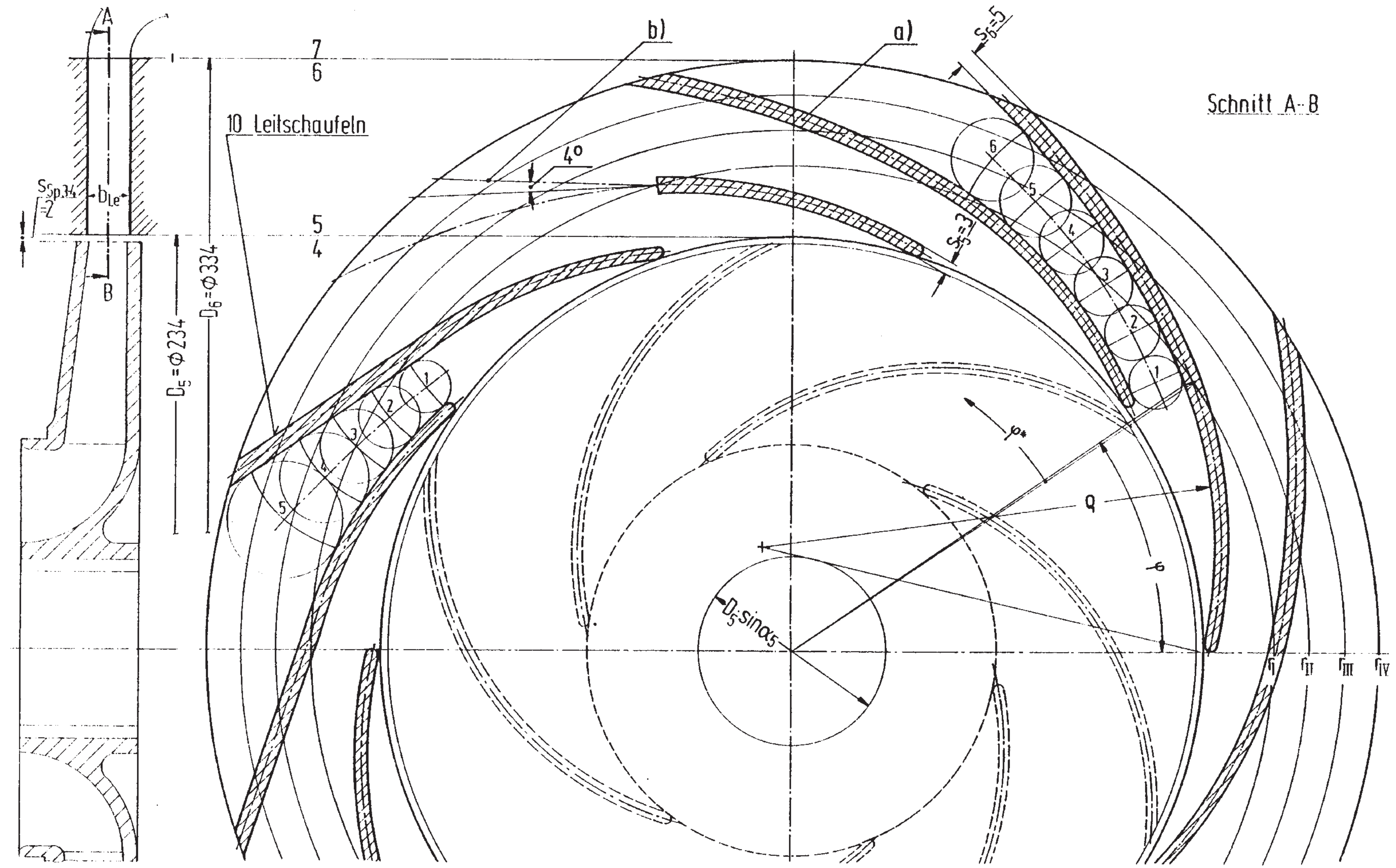


Bild 3 Lösungsskizze 4 zu Ü 41

Entwurfszeichnung des Leitrades.
Der Einlauf der Leitschaufeln ist als Kreisbogen mit dem Halbmesser ϱ ausgebildet. Dieser Verlauf stellt eine gute Annäherung an die logarithmische Spirale dar. Die Fortsetzung des Leitschaufelverlaufs kann auf verschiedene Weise erfolgen. In der Enwurfszeichnung sind zwei Möglichkeiten aufgezeigt: a) durch punktweise Berechnung, b) durch diffusorartige Erweiterung mit $\delta/2 = 4°$.

a) Schaufelverlauf nach Schräganschnitt punktweise berechnet:
Hierbei ist entweder der α_{Le}- oder c_{Le}-Verlauf vorab festzulegen. Bei Wahl des Verlaufes von c_{Le} soll die Leitschaufelkontur tabellarisch berechnet werden (Tab. 3).
Der zugehörige Leitschaufelverlauf ist in Bild 3 eingezeichnet (rechte Bildhälfte).

Tab. 3. Punktweise berechnete Fortsetzung der Leitschaufeln (nach Schräganschnitt) bei vorgegebenem c_{Le}-Verlauf.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Pkt. Nr.	$r_{Le,x}$ [m]	$t_{Le,x}$ [m]	$c_{Le,x}$ 1) [m/s]	$\alpha_{Le,x}$ 2) [grd.]	h_x 3) [m^{-1}]	$\bar{h}_x$ 4) [m^{-1}]	$\Sigma \bar{h}_x$ [m^{-1}]	$\varphi_{Le,x}$ 5) [grd.]
I	$137 \cdot 10^{-3}$	$86{,}1 \cdot 10^{-3}$	14,0	14	29,28	25,92	0	0
II	$147 \cdot 10^{-3}$	$90{,}4 \cdot 10^{-3}$	10,5	16,79	22,55	19,79	25,92	14,9
III	$157 \cdot 10^{-3}$	$98{,}6 \cdot 10^{-3}$	7,5	20,52	17,02	13,47	45,71	26,2
IV	$167 \cdot 10^{-3}$	$104{,}9 \cdot 10^{-3}$	4,5	31,15	9,91		59,18	33,9

1) vorgegeben 2) Mit $z_{Le} = 10$, $s_{Le} = konst = 5 \cdot 10^{-3}\,m$, $b_{Le} = konst = 12 \cdot 10^{-3}\,m$, $\dot{V}_{La} = 0{,}0266\ m^3/s$ nach Gl. (7-33)

$\sin\alpha_{Le,x} = s_{Le,x}/t_{Le,x} + \dot{V}_{Le}/(c_{Le,x} \cdot z_{Le} \cdot b_{Le,x} \cdot t_{Le,x})$

3) $h_x = (r_{Le,x} \cdot \tan\alpha_{Le,x})^{-1}$ 4) $\bar{h}_x = (h_x + h_{x+1})/2$

5) Lt. Gl. (7-36) $\varphi_{Le,x} = (180°/\pi) \cdot \Delta r_{Le} \cdot \Sigma \bar{h}_x$ mit $\Delta r_{Le} = 10^{-2}\,m$

b) Leitschaufelverlauf nach Schräganschnitt geradlinig mit diffusorartiger Erweiterung:
Für Erweiterungswinkel $\delta = 8°$ in Bild 3 eingezeichnet (linke Hälfte). Es ergibt sich unstetiger Übergang vom Schräganschnittende zum Leitschaufelkanal (verlustbehaftet).

Mit den aus der Zeichnung abgemessenen α_{Le}-Werten kann der Geschwindigkeitsverlauf schrittweise berechnet werden (Tab. 4).

Tab. 4. Geschwindigkeits-Verlauf bei geradliniger Leitschaufel-Fortsetzung.

	A	B	C	D
Punkt Nr.	$r_{Le,x}$ [m]	$\alpha_{Le,x}$ [grd.]	$t_{Le,x}$ [m]	$c_{Le,x}$ 1) [m/s]
I	$137 \cdot 10^{-3}$	14 18	$86{,}1 \cdot 10^{-3}$	14,0 10,26
II	$147 \cdot 10^{-3}$	28	$90{,}4 \cdot 10^{-3}$	5,92
III	$157 \cdot 10^{-3}$	34,5	$98{,}6 \cdot 10^{-3}$	4,36
IV	$167 \cdot 10^{-3}$	40	$104{,}9 \cdot 10^{-3}$	3,55

1) Nach Gl. (16-9)

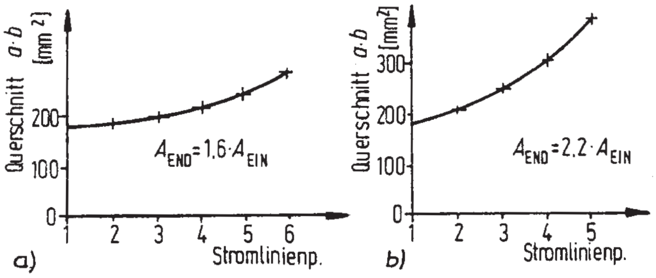


Bild 4. Lösungsskizze 3 zu Ü 41. Leitkanal-Querschnittsverlauf. a) punktweise berechnet, b) geradlinig diffusorartig erweitert.

Eigenschaften des geradlinigen Verlaufes:
- Der erforderliche Endquerschnitt wird früher erreicht. Dies führt zu kleinerem Außendurchmesser D_6.
- Strombahn zwischen den Schaufeln ist kürzer. Weniger Reibungsverluste, jedoch größere Ablösungsgefahr.
- Einfachere Konstruktion und Herstellung.

Außerdem werden Querschnittsverlauf und Erweiterungswinkel der Leitschaufelkanäle verglichen.

Querschnittsverlauf: Für die in Bild 3 eingezeichneten Punkte 1...6 bei punktweise berechneter Schaufel, bzw. 1...5 bei geradlinigem Verlauf, sind die Kanalabmessungen zu entnehmen und der Querschnitt über den zugehörigen Kanalweg aufzutragen (Bild 4).

Erweiterungswinkel: Hierzu sind die Querschnitte in Ersatzkreise ($r_{Er} = \sqrt{A/\pi} = \sqrt{a \cdot b/\pi}$) umzurechnen.

Punktweise errechnete Schaufel: Größter Anstieg zwischen den Punkten 4 und 6 mit A [mm²] aus Bild 4:

$$\tan(\delta/2)_{max} = \frac{\sqrt{A_6/\pi} - \sqrt{A_4/\pi}}{\Delta l_{6-4}} = \frac{9{,}57 - 8{,}41}{32{,}5}\left[\frac{mm}{mm}\right] = 0{,}0357$$

$\delta_{max} = 4{,}1°$ kleiner Wert → langer Kanal

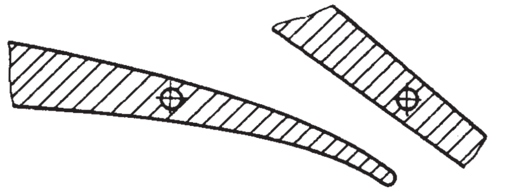


Bild 5. Lösungsskizze 5 zu Ü 41. Leitschaufeln mit durchgeführten Gehäusezugankern.

Geradliniger Kanal: Steilster Anstieg zwischen den Punkten 3 und 5.

$$\tan(\delta/2)_{max} = \frac{\sqrt{A_5/\pi} - \sqrt{A_3/\pi}}{\Delta l_{5-3}} = \frac{11{,}23 - 8{,}96}{29{,}5} = 0{,}077$$

$\bar{\delta}_{max} = 8{,}8°$ Liegt noch in günstigen Grenzen

Hinweis: Bei mehrstufigen Kreiselpumpen in Gliederbauweise werden die Gehäuse-Zuganker oft durch die Leitschaufeln hindurchgeführt (Bild 5).

Die Leitschaufelzahl richtet sich dann auch nach der Zahl der erforderlichen Zuganker. Zudem ist die Leitschaufeldicke s_{Le} dabei entsprechend auszuführen.

Spiralgehäuse

Angewendet als Leitvorrichtung der letzten Stufe (Stufe IV).

Festgelegt: Spirale wird in Kreisquerschnitt ausgeführt und für Nennvolumenstrom $\dot{V} = 0{,}025\ m^3/s$ ausgelegt.

Anfangsdaten: $c_{3u} = 18{,}71$ m/s (von zuvor)
$D_2 = 0{,}23$ m, $b_2 = 10{,}5$ mm

Mit Spaltverlusten (nach Gl. 2-90):

$$c_{3m} = \frac{\dot{V}_{La}}{D_2 \cdot \pi \cdot b_2} = \frac{0{,}0266}{0{,}23 \cdot \pi \cdot 0{,}0105} \left[\frac{m^3/s}{m \cdot m}\right] = 3{,}51\ m/s$$

$$\tan\alpha_3 = c_{3m}/c_{3u} = 3{,}51/18{,}71 = 0{,}1876 \rightarrow \alpha_3 = 10{,}6^\circ \approx 10^\circ$$

Ohne Spaltverluste:

$$c_{3m} = \frac{\dot{V}}{D_2 \cdot \pi \cdot b_2} = \frac{0{,}025}{0{,}23 \cdot \pi \cdot 0{,}0105} \left[\frac{m^3/s}{m \cdot m}\right] = 3{,}3\ m/s$$

$$\tan\alpha_3^* = c_{3m}/c_{3u} = 3{,}3/18{,}71 = 0{,}1764 \longrightarrow \alpha_3^* = 10^\circ$$

α_3 liegt etwas unter dem Bereich (Tab 7-1) der direkten Spiralgehäuseanwendung. Trotzdem soll hier kein Leitrad zwischengeschaltet, also das Spiralgehäuse unmittelbar angesetzt werden. Aufschluß, ob dies möglich ist, gibt auch der Spiralenendquerschnitt und der dann notwendige Druckstutzen. Ergeben sich ungünstige Werte (langer Druckstutzen), ist ein Leitrad zwischenzuschalten.

Zungenradius nach

Gl. (7-60): $r_z \geq 1{,}035 \cdot r_2 = 1{,}035 \cdot 0{,}115\,[m] \approx 0{,}120$ m

Gl. (7-61): $r_z \approx (1{,}05 \ldots 1{,}4) \cdot r_2 = 120 \ldots 161$ mm

Ausgeführt: $r_z = 124$ mm $= 0{,}124$ m

Spiralenbreite (Eintrittsbreite) nach Gl. (7-4):

$b_{Spir} \leq (1{,}1 \ldots 1{,}3 \ldots 1{,}5) \cdot b_2 = 11{,}5 \ldots 15{,}7$ mm

Ausgeführt: $b_{Spir} = \underline{11{,}5\ mm}$

Spirale ausgelegt auf $\varphi = 360^\circ = \varphi_{max}$.

Endquerschnitt: Nach Gl. (7-85) bei $\alpha_3 \approx \alpha_3^* = 10^\circ$

$$\varrho_{max} = b_2 \cdot \tan\alpha_3^* + \sqrt{2 \cdot r_z \cdot b_2 \cdot \tan\alpha_3}$$

$$\varrho_{max} = 10{,}5 \cdot 0{,}1764 + \sqrt{2 \cdot 124 \cdot 10{,}5 \cdot 0{,}1764}\ [mm]$$

$$\varrho_{max} = \underline{23{,}3\ mm \approx 23{,}5\ mm} \rightarrow A_{max} = 1{,}73 \cdot 10^{-3}\ m^2 = A_{End}$$

Zugehörige "End"-Strömungsgeschwindigkeit

$$c_{End} = \dot{V}/A_{End} = \dot{V}/(\varrho_{max}^2 \cdot \pi) = 0{,}025/(0{,}0235^2 \cdot \pi)$$

$$c_{End} = 14{,}41\ m/s$$

Druckstutzen: Austrittsgeschwindigkeit (Gl. 7-64):

$$c_D = (0{,}1 \ldots 0{,}3) \cdot \sqrt{2 \cdot \Delta Y} = (0{,}1 \ldots 0{,}3) \cdot \sqrt{2 \cdot 539{,}5}\ [m/s]$$

$$c_D = 3{,}2 \ldots 9{,}8\ m/s$$

Ausgeführt $c_D = 3{,}2$ m/s

Austrittsquerschnitt aus Durchfluß:

$$A_D = \dot{V}/c_D = 0{,}025/3{,}2\ [m^2] = 7{,}81 \cdot 10^{-3}\ m^2 \rightarrow D_D = 0{,}0997\ m$$

Ausgeführt $D_D = 100$ mm (Norm-NW)

Druckstutzenlänge: Bei Erweiterungswinkel $\delta = 10^\circ$:

$$L_{DS} = \frac{r_D - \varrho_{max}}{\tan(\delta/2)} = \frac{50 - 23{,}5}{\tan 5^\circ}\ [mm] = \underline{303\ mm}$$

Die Konstruktion zeigt, daß sich dieser Druckstutzen gut verwirklichen läßt, obwohl er außerhalb der in Unterabschnitt 7.2.1.5 angegebenen Richtwerte ($L_{DS} \leq 8 \cdot \varrho_{max}$ und $A_D/A_{max} \approx 1{,}5 \ldots 2{,}5$) liegt. Deshalb wird die Spirale gemäß vorhergehender Werte ausgeführt.

Spiralenradius: Nach Gl. (7-83) für $\varphi = 0 \ldots 360^\circ$:

$$\varrho = \varphi^\circ/C + \sqrt{2 \cdot r_z \cdot \varphi^\circ/C} \quad \text{mit } r_i \approx r_z \text{ (Gl. 7-82).}$$

Hierbei nach Gl. (7-78) bei $\dot{V}$ statt $\dot{V}_{La}$ und Gl. (7-80):

$$C = \frac{720^\circ \cdot \pi \cdot K_{G,Spir}}{\dot{V}} = \frac{720^\circ \cdot \pi \cdot r_2 \cdot c_{3u}}{\dot{V}}$$

$$C = \frac{720 \cdot \pi \cdot 0{,}115 \cdot 18{,}71}{0{,}025} \left[\frac{^\circ \cdot m \cdot m/s}{m^3/s}\right] = 194676{,}7\ [^\circ/m]$$

$C = 194{,}68\ ^\circ/mm$ Eingesetzt ergibt:

$$\underline{\varrho = \varphi/194{,}68 + \sqrt{248 \cdot \varphi/194{,}68}} \quad \text{in mm bei } \varphi \text{ in Grad}$$

In Tab. 5 ist die Beziehung $\varrho = f(\varphi)$ ausgewertet und in Bild 6 die Ergebnisse aufgezeichnet. Der Reibungseinfluß gemäß Gl. (7-86) und Gl. (7-87) soll unberücksichtigt bleiben.

Tab. 5. Spiralenradius ϱ, abhängig vom Drehwinkel φ.

φ [grd.]	0	10	20	30	60	90	120	150
ϱ [mm]	0	3,62	5,15	6,34	9,05	11,17	12,98	14,59

φ [grd.]	180	210	240	270	300	330	360	370
ϱ [mm]	16,07	17,43	18,72	19,93	21,09	22,20	23,26	23,61

Der kleinste verwirklichbare Spiralenradius ist

$\varrho_{min} = b_{Spir}/2 = 11{,}5/2 = \underline{5{,}75\ mm}$

Das bedeutet nach Tab. 5 daß die Querschnitte bis etwa $\varphi = 30^\circ$ anders ausgebildet werden müssen, und zwar gemäß Unterabschnitt 7.2.1.5 mit allmählichem Übergang zur Kreisform.

Festgelegt:

Spiralenquerschnitt für $\varphi \geq 30^\circ$ kreisförmig

Spiralenquerschnitt für $\varphi = 0 \ldots 30^\circ$ der Kreisform langsam angenähert.

Bestimmen des nichtkreisförmigen Querschnittverlaufes im Bereich $\varphi = 0 \ldots 30^\circ$:

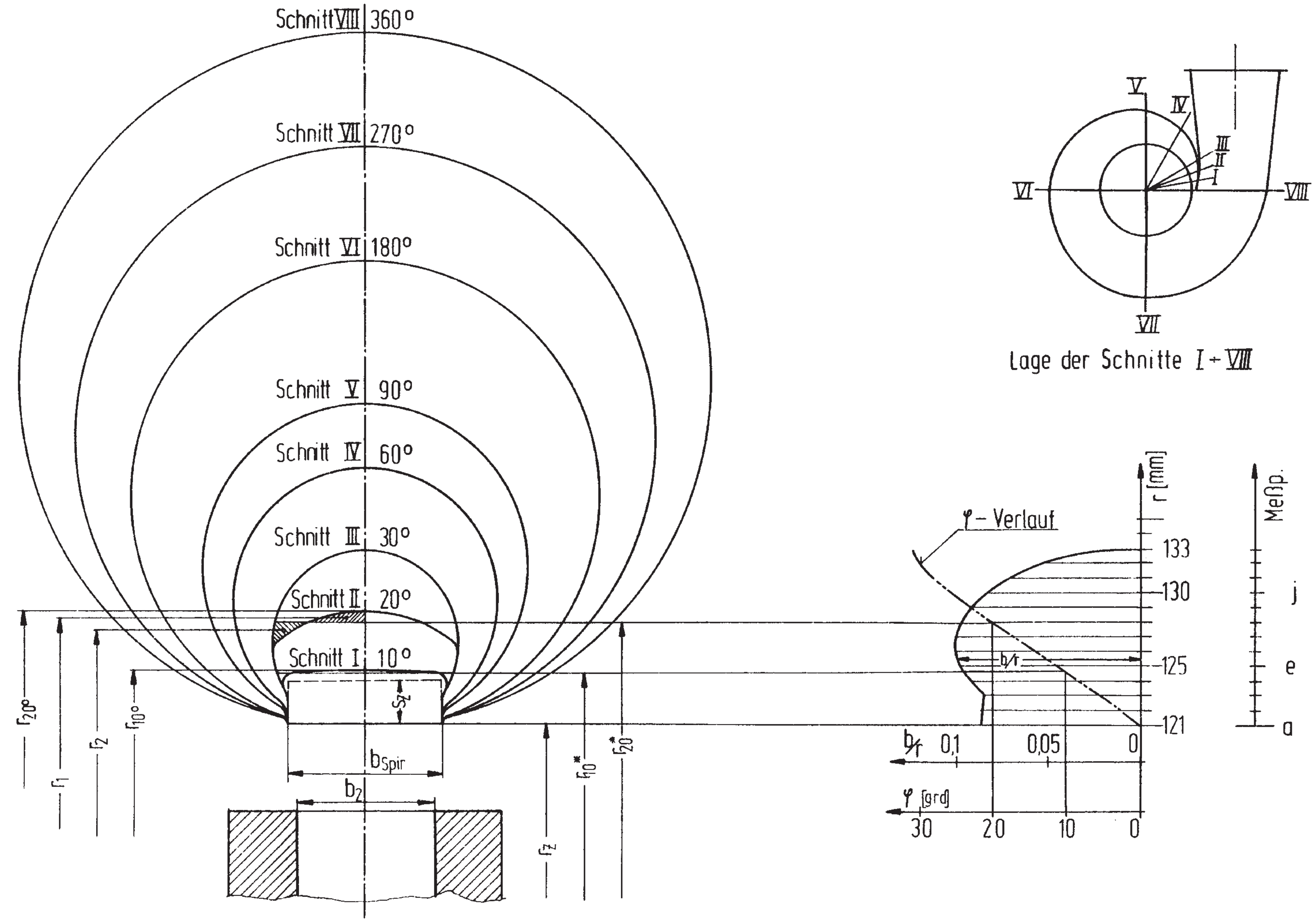


Bild 6. Lösungsskizze 6 zu Ü 41

Entwurfszeichnung des Spiralgehäuse.
Der Querschnitt des Spiralgehäuses ist kreisförmig ausgebildet. Am Anfang des Spiralumfangs läßt sich dieser kreisförmige Querschnitt nicht verwirklichen, da der Kleinstwert von $q = b_{Spir}/2$ ist. Im Bereich von $\varphi = 0° \div 30°$ wird der Querschnittsverlauf langsam der Kreisform angenähert.

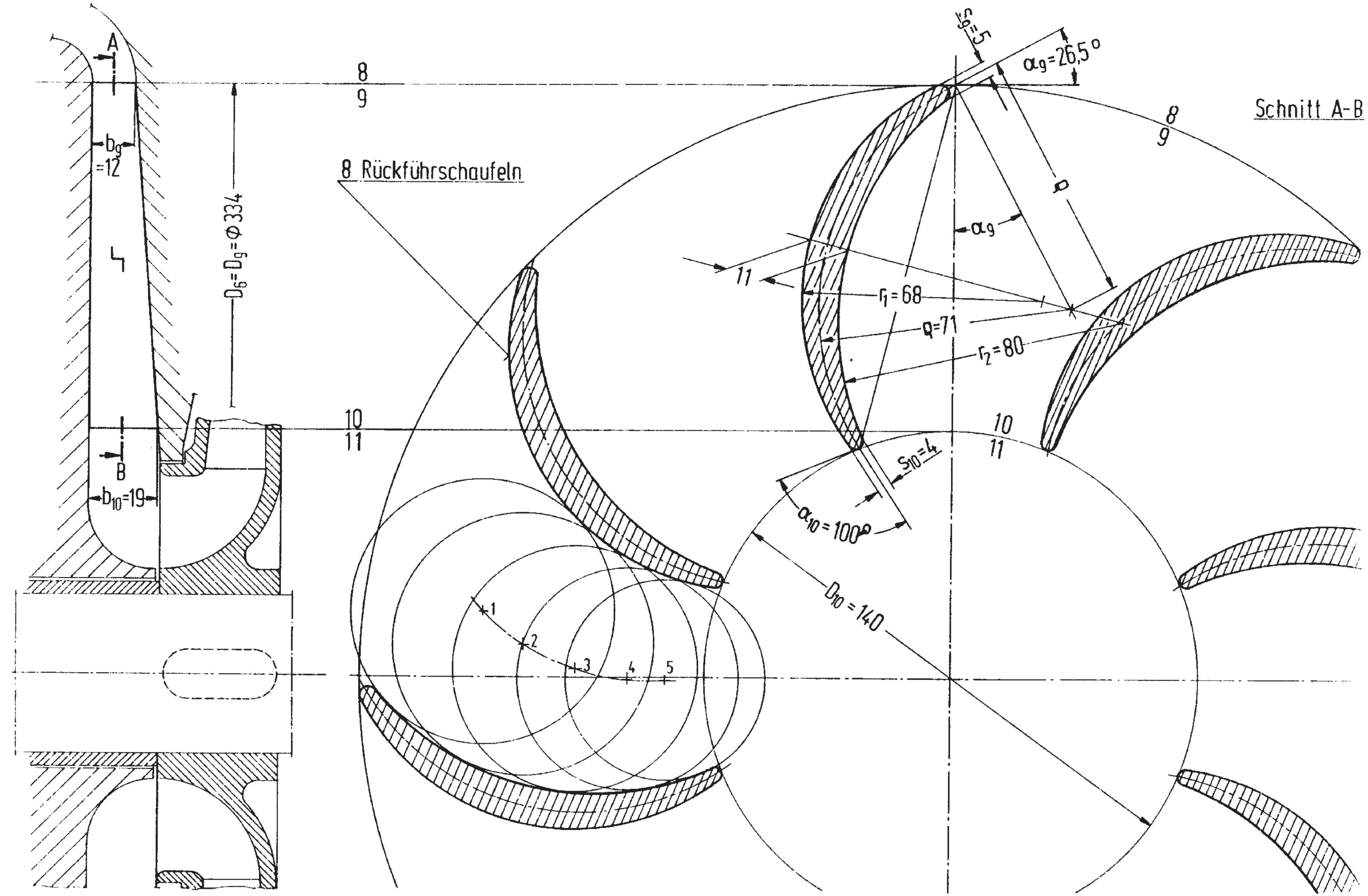


Bild 7. Lösungsskizze 7 zu Ü 41

Entwurfszeichnung der Rückführschaufeln.
Die Rückführschaufeln sind als Kreisbogenschaufeln dargestellt. Durch die veränderliche Schaufelstärke ist es möglich, die Schaufelvorder- bzw. -rückseite als Kreisbogen auszubilden, wobei auf den stetigen Verlauf des Schaufelkanals zu achten ist.

Bei etwa gleicher Querschnittgröße wie die berechneten Kreise nach Tab. 5 wird der Querschnittsverlauf festgelegt und dann die Breite ausgemessen. Die Werte sind in Tab. 6 eingetragen (Spalte A und B). Das Berechnen des zugehörigen Winkels φ erfolgt mit Hilfe von Gl. (7-73):

$$\varphi^o \approx (360 \cdot K_{D,Sp}/\dot{V}) \cdot \Delta r \cdot \Sigma \bar{h}$$

Mit Δr = 1 mm = konst (Tab. 6) und $K_{D,Sp} = r_2 \cdot c_{3u}$ wird

$$\varphi^o \approx \frac{360 \cdot 0{,}115 \cdot 18{,}71}{0{,}025} \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot \Sigma \bar{h} \quad \left[\frac{m \cdot m/s}{m^3/s} \cdot m\right]$$

$$\varphi^o \approx 30{,}98 \cdot \Sigma \bar{h}$$

wobei $\bar{h} = (h_x + h_{x+1})/2 = [(b/r)_x + (b/r)_{x+1}]/2$

Die tabellarische Auswertung ergibt Spalten C bis F in Tab. 6 Bei Zeile *m* müßte lt. Konstruktion gerade der Winkel $\varphi = 30^o$ erreicht sein. Die Abweichung beruht auf Ungenauigkeiten von Zeichnung und Rechenverfahren.

Abschließend sind zum Abrunden der Querschnitte die Flächen gemäß Formel (7-74) zeichnerisch zu korrigieren.

<u>Radialkraft:</u> Infolge Spiralgehäuse nach Gl. (7-62)

$$F_r = k_r \cdot \mathfrak{s} \cdot \Delta Y \cdot D_2 \cdot B_2$$

Mit Maximalwerte von Faktor k_r bei Nullförderung ($\dot{V}_x = 0$) lt. Gl. (7-63) k_r = 0,36...0,6 und Gesamtbreite $B = b_2 + 2 \cdot a_{SW} = 10{,}5 + 2 \cdot 4 = 18{,}5$ mm:

Tab. 6. Tabellarisch ermittelte Werte für den Querschnittsverlauf ab Zunge ($\varphi = 0^o$, r = 121 mm) in Radius-Schrittweite 1mm im Radiusbereich bis zum Zentriwinkel $\varphi \approx 30^o$.

	A	B	C	D	E	F
Meß-pkt.	r_x [mm]	b_x [mm]	$h_x = b_x/r_x$ [–]	$\bar{h}$ [–]	$\Sigma\bar{h}$ [–]	φ [grd]
a	121	11,5	0,0950		0	0
				0,0947		
b	122	11,5	0,0943		0,0947	2,9
				0,0939		
c	123	11,5	0,0935		0,1886	5,8
				0,0931		
d	124	11,5	0,0927		0,2817	8,7
				0,0952		
e	125	12,2	0,0976		0,3769	11,7
				0,0988		
f	126	12,6	0,1		0,4757	14,7
				0,1004		
g	127	12,8	0,1008		0,5761	17,8
				0,0985		
h	128	12,3	0,0961		0,6746	20,9
				0,0938		
i	129	11,8	0,0915		0,7684	23,8
				0,0877		
j	130	10,9	0,0838		0,8561	26,5
				0,0770		
k	131	9,2	0,0702		0,9331	28,9
				0,0620		
l	132	7,1	0,0538		0,9951	30,8
				0,0269		
m	133	0	0		1,0220	31,7

$$F_{r,max} = (0{,}36...0{,}6) \cdot 10^3 \cdot 539{,}5 \cdot 0{,}23 \cdot 0{,}0185 \quad [kg/m^3 \cdot m^2/s^2 \cdot m \cdot m]$$

$$\underline{F_{r,max} = 826...1377\ N}$$

<u>Rückführeinrichtung:</u>

<u>Umlenkraum:</u> Meist schaufellos. Gestalt abhänig vom verfügbaren Raum. Die Gestaltung des Übergangs richtet sich nach konstruktiven Gesichtspunkten (Platzverhältnisse), wobei der Übergang so groß wie möglich zu gestalten ist, um die Strömungsverluste (Umlenkverluste) klein zu halten.

<u>Ausgeführt:</u> Kreisringförmiger Umlenkraum in gleicher Breite. Abmessungen aus Konstruktion:

<u>Mittlerer Krümmungsradius:</u> $\bar{r}$ = 18 mm

<u>Kanalbreite:</u> $b_{Um} = b_7 = b_8 = 12$ mm (wie b_{Le})

<u>Eintrittswerte</u> (Stelle 6/7): Nach Gl. (7-51):

$$\cot\alpha_7 = \tau_6 \cdot \left[\frac{r_4}{r_6} \cdot (1 - k_{M,Le}) \cdot \frac{c_{4u}}{c_{6m}} + k_{M,Le} \cdot \cot\alpha_6\right] \quad \text{Mit}$$

$$\tau_6 = t_6/(t_6 - \sigma_6) \;;\; t_6 = \pi \cdot D_6/z_{Le} \;;\; \sigma_6 = s_6/\sin\alpha_6$$

Gl. (7-38) $\quad k_{M,Le} = 1/(1 + p_{Le})$

Gl. (7-39) $\quad p_{Le} = (\psi'_{Le} \cdot r_6^2)/(z_{Le} \cdot S_{Le})$

Gl. (7-41) $\quad S_{Le} = (r_6^2 - r_5^2)/2$

$r_5/r_6 = D_5/D_6 = 234/334 = 0{,}7 > 0{,}5$ Dazu nach

Gl. (7-46) $\quad \psi'_{Le,kor} = (1{,}6 \dots 2{,}0) \cdot (r_5/r_6) \cdot \psi'_{Le}$

Gl. (7-44) $\quad \psi'_{Le} = 0{,}6 \cdot (1 + \alpha_6^o/60)$

Ausgewertet für punktweise berechnete Leitschaufeln:

Mit r_4 = 117 mm, r_6 = 167 mm, z_{Le} = 10, $\alpha_6 = 31{,}15^o$, c_6 = 4,5 m/s, $\alpha_4 = 9{,}3^o$, c_{3m} = 3,5 m/s, $s_6 = s_{Le}$ = 3 mm, $c_{4m} = c_{3m}$ = 3,5 m/s und $c_{4u} \approx c_{3u}$.

$$c_{4m} = c_{3m} \cdot \frac{r_3}{r_4} \cdot \frac{b_3}{b_4} = 3{,}5 \cdot \frac{115}{117} \cdot \frac{10{,}5}{12} = 3{,}01\ m/s$$

$$c_{4u} = c_{4m}/\tan\alpha_4 = 3{,}01/\tan 9{,}3^o = 18{,}38\ m/s \approx c_{3u}$$

$$c_{6m} = c_6 \cdot \sin\alpha_6 = 4{,}5 \cdot \sin 31{,}15^o\ [m/s] = 2{,}33\ m/s$$

$$t_6 = \pi \cdot 334/10\ [mm] = 104{,}93\ mm$$

$$\sigma_6 = 3/\sin 31{,}15^o\ [mm] = 5{,}8\ mm$$

$$\tau_6 = 104{,}93/(104{,}93 - 5{,}8) = 1{,}06$$

$$S_{Le} = (167^2 - 117^2)/2\ [mm^2] = 7100\ mm^2$$

$$\psi'_{Le} = 0{,}6 \cdot (1 + 31{,}15/60) = 0{,}91$$

$$\psi'_{Le,kor} = 1{,}8 \cdot 0{,}7 \cdot 0{,}91 = 1{,}15 \quad (\text{Mittelwert!})$$

$$p_{Le} = (1{,}15 \cdot 1{,}67^2)/(10 \cdot 7100)\ [mm^2/mm^2] = 0{,}45$$

$$k_{M,Le} = 1/(1 + 0{,}45) = 0{,}69$$

$$\cot\alpha_7 = 1{,}06 \cdot \left[0{,}7 \cdot (1 - 0{,}69) \cdot \frac{18{,}38}{2{,}33} + 0{,}69 \cdot \cot 31{,}15^o\right]$$

$$\cot\alpha_7 = 3{,}025 \longrightarrow \underline{\alpha_7 = 18{,}3^o}$$

Die Abweichung $\Delta\alpha = \alpha_6 - \alpha_7 = 12{,}8^o$ ist beachtlich und daher zu berücksichtigen.

Austrittswerte: Nach Gl. (7-89)

$$\tan\alpha_8 = \tan\alpha_7 + (\lambda/4)\cdot L/b_6 \quad \text{Mit}$$

$$\lambda \approx 0{,}04$$

$$L = 2\cdot\bar{r}\cdot\pi/2 = \bar{r}\cdot\pi = 18\cdot\pi\ [mm] = 56{,}5\ mm$$

$$\tan\alpha_8 = \tan 18{,}3^\circ + (0{,}04/4)\cdot 56{,}5/12 = 0{,}3778$$

$$\underline{\alpha_8 = 20{,}7^\circ}$$

Rückführraum (beschaufelt): Schließt direkt an den Umlenkraum an.

Rückführschaufelzahl z_R: Anzahl meist zwischen z_{La} und z_{Le}. Ausgeführt: $\underline{z_R = 8}$

Rückführschaufeldicke: Ausgeführt $s_9 = 5$ mm

Eintrittswerte (Stelle 8/9): $r_9 = r_8 = r_7 = r_6 = 167$ mm, $b_8 = b_7 = 12$ mm, $\alpha_8 = 20{,}7^\circ$
Damit nach Gl. (7-90):

$$\tan\alpha_9 = \mu\cdot\tau_9\cdot\tan\alpha_8 \quad \text{Hierbei}$$

$$\mu \approx 1{,}2$$

$$\tau_9 \approx 1{,}1 \quad (\text{Gl. 7-94}). \quad \text{Oder}$$

$$\tau_9 = t_9/(t_9 - \sigma_9) \quad \text{mit}$$

$$t_9 = D_9\cdot\pi/z_R = 334\cdot\pi/8\ [mm] = 131{,}2\ mm$$

$$\sigma_9 = s_9/\sin\alpha_9 \approx s_9/\sin\alpha_8$$

$$\sigma_9 = 5/\sin 20{,}7^\circ\ [mm] = 14{,}1\ mm$$

$$\tau_9 = 131{,}2/(131{,}2 - 14{,}1) = 1{,}12 \approx 1{,}1$$

Ist anschließend nachzuprüfen!

$$\tan\alpha_9 = 1{,}2\cdot 1{,}1\cdot\tan 20{,}7^\circ = 0{,}4988 \longrightarrow \alpha_9 = 26{,}5^\circ$$

Überprüfung von τ_9:

$$\sigma_9 = s_9/\sin\alpha_9 = 5/\sin 26{,}5^\circ\ [mm] = 11{,}2\ mm$$

$$\tau_9 = 131{,}2/(131{,}2 - 11{,}2) = 1{,}093 \approx 1{,}1$$

Wie angenommen. Also bleibt $\alpha_9 = 26{,}5^\circ$

Austrittswerte (Stelle 10/11):

Nach Gl. (7-97): $\alpha_{10} \approx 95...100^\circ$, ausgef. $\underline{\alpha_{10} = 100^\circ}$

Lt. Gl. (7-98): $b_{11} = \dot{V}_{La}/(c_{SM}\cdot D_{11}\cdot\pi)$

Mit konstruktiv $D_{11} = \underline{140\ mm}$ festgelegt, wird

$$b_{11} = \frac{0{,}0266}{3{,}7\cdot 0{,}140\cdot\pi}\ \left[\frac{m^3/s}{m/s\cdot m}\right] = 0{,}0163\ m \approx 16{,}5\ mm$$

Damit auch beim Umlenken zum Saugmund geringe Beschleunigung (ergibt bessere Strömungsführung), ausgeführt: $b_{11} = 19$ mm. Außerdem ebene Seitenwände, also geradlinige Verbindung zwischen Stellen 9 u. 10.

Schaufelform: Rückführschaufeln mit Kreisbogen - Skelettlinie von 5 mm an den Rändern zur Mitte auf 11 mm verdickt ausgeführt (Bild 7).

Krümmungsradius der Skelettlinie nach Gl.(7-99):

$$\varrho_R = \frac{r_9^2 - r_{10}^2}{2\cdot(r_9\cdot\cos\alpha_9 - r_{10}\cdot\cos\alpha_{10})}$$

$$\varrho_R = \frac{167^2 - 70^2}{2\cdot(167\cdot\cos 26{,}5^\circ - 70\cdot\cos 100^\circ)}\ \left[\frac{mm^2}{mm}\right]$$

$$\underline{\varrho_R = 71{,}1\ mm \approx 71\ mm}$$

Radius des Kreises, auf dem die Mittelpunkte von ϱ_R liegen nach Gl. (7-100):

$$R_R = \sqrt{r_9^2 + \varrho_R^2 - 2\cdot r_9\cdot\varrho_R\cdot\cos\alpha_9}$$

$$R_R = \sqrt{167^2 + 70^2 - 2\cdot 167\cdot 70\cdot\cos 26{,}5^\circ}\ \left[\sqrt{mm^2}\right]$$

$$\underline{R_R = 108{,}9\ mm \approx 109\ mm}$$

Drosselkurve:

Die Gesamtdrosselkurve, d.h. die $(\dot{V},H)$-Linie der gesamten Pumpe, ergibt sich durch Überlagern - Hintereinanderschaltung – der einzeln Stufen-Drosselkurven in Ordinatenrichtung. Da die vier Stufen gleich sind, somit durch Vervierfachen der Einzeldrosselkurve, d. h. der Drosselkurve einer Stufe.

Drosselkurve einer Stufe:

Theoretische Gerade $H_{th\infty,x}$: Nach Gl. (9-1):

$$H_{th\infty,x} = \frac{1}{g}\cdot u_2\cdot\left(u_2 - \frac{\tau_2}{\lambda_L\cdot D_2\cdot\pi\cdot b_2}\cdot\cot\beta_2\cdot\dot{V}_x\right)$$

$$H_{th\infty,x} = \frac{1}{9{,}81}\cdot 34{,}68\cdot\left(34{,}68 - \frac{1{,}07\cdot\cot 22{,}5^\circ}{0{,}94\cdot 0{,}23\cdot\pi\cdot 0{,}0105}\cdot\dot{V}_x\right)$$

$$\left[\frac{1}{m/s^2}\cdot\frac{m}{s}\cdot\left(\frac{m}{s}\quad \frac{1}{m\cdot\ m}\cdot\frac{m^3}{s}\right)\right]$$

$H_{th\infty,x} = 3{,}54\cdot(34{,}68 - 362\cdot\dot{V}_x\ [m^3/s]\ )$ in m

$H_{th\infty,x} = 122{,}6 - 1282{,}2\cdot\dot{V}_x\ [m^3/s]$ in m

Theoretische Gerade $H_{th,x}$: Bei angen. $k_{M,x} = k_M = 0{,}73$

$H_{th,x} = k_M\cdot H_{th\infty,x} = 0{,}73\cdot H_{th\infty,x}$

$\underline{H_{th,x} = 89{,}5 - 936{,}0\cdot\dot{V}_x\ [m^3/s]}$ in m Hieraus

Theoretische Nullförderhöhe, d.h. bei $\dot{V}_x = 0$ (Ordinatenpunkt)

$\underline{H_{th,0} = 89{,}5\ m}$

Theoretische Nennförderhöhe, also bei $\dot{V}_x = \dot{V} = 0{,}025\ m^3/s$ (Füllungsgrad $\dot{V}_x/\dot{V} = 1$)

$\underline{H_{th}} = 89{,}5 - 936{,}0\cdot 0{,}025\ [m] = \underline{66{,}10\ m}$

Die Verbindung dieser beiden Punkte, (0;89,5) und (0,025;66,10), führt zur theoretischen Förderhöhengeraden $H_{th,x} = Y_{Sch,x}/g$ (Bild 8).

Reibungsparabel: Nach Gl. (9-3):

$$Z_{Sch,x} = (1 - \eta_{Sch})\cdot Y_{Sch}\cdot(\dot{V}_x/\dot{V})^2$$

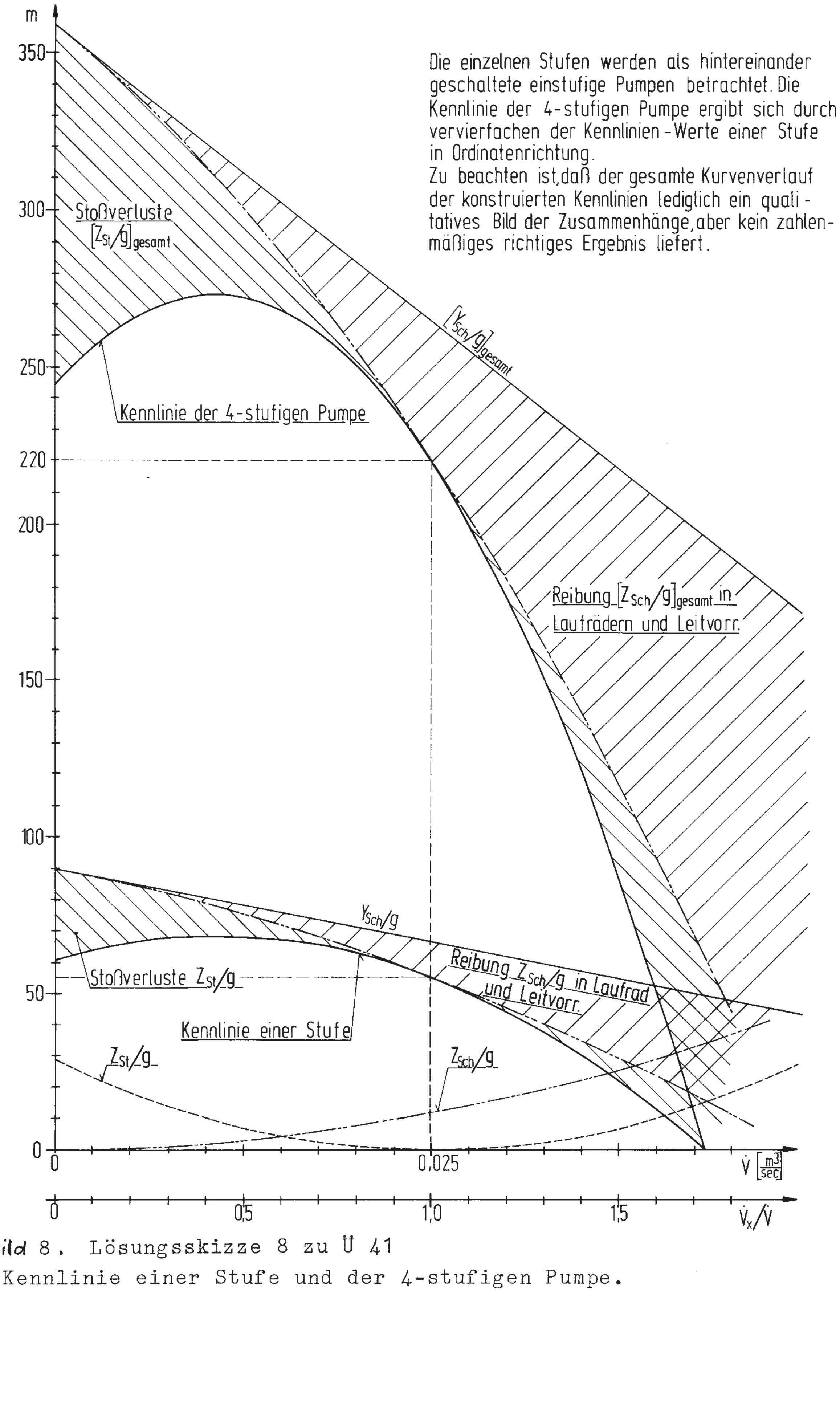


Bild 8. Lösungsskizze 8 zu Ü 41
Kennlinie einer Stufe und der 4-stufigen Pumpe.

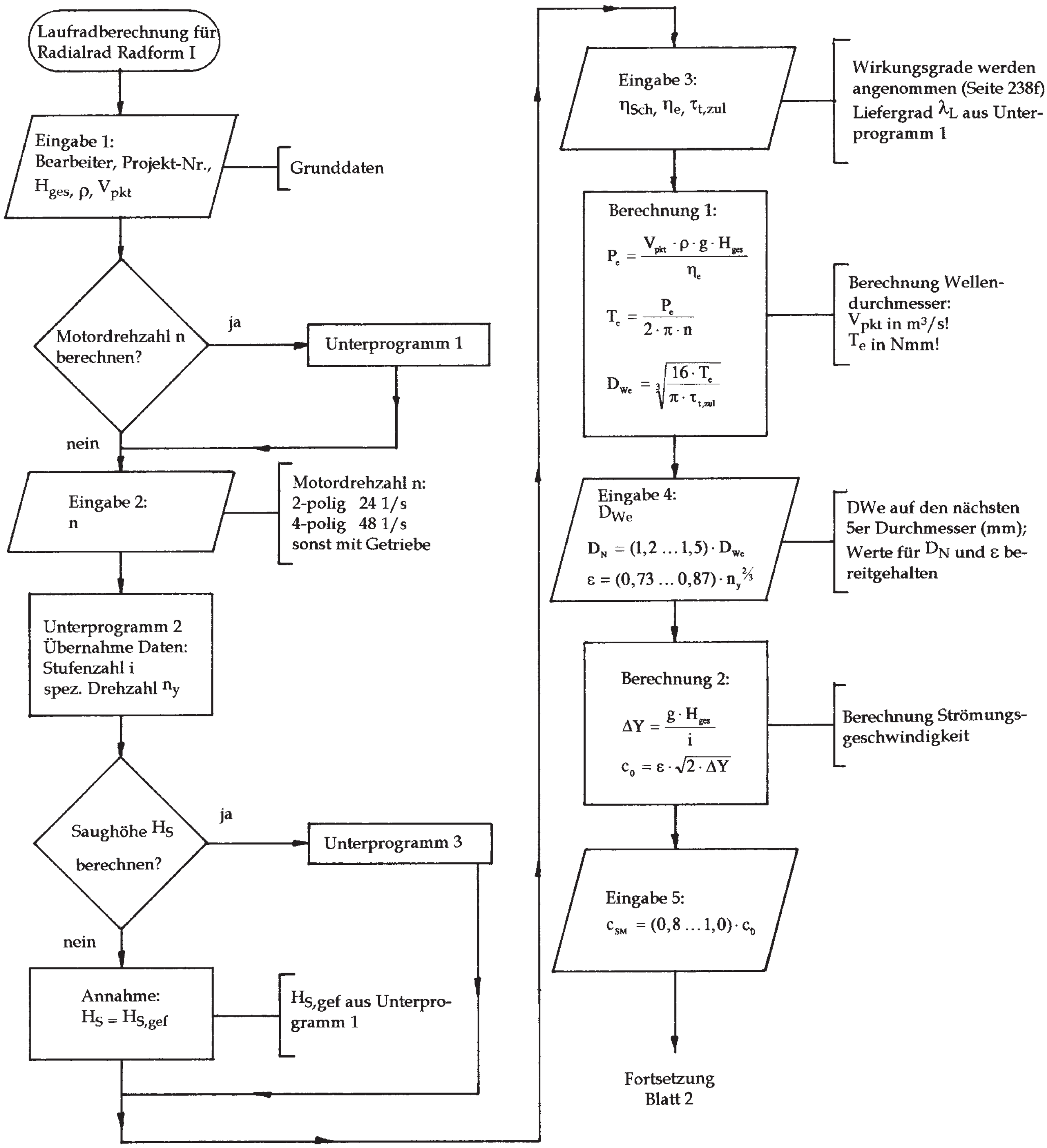


Bild 9 Lösungsskizze 9 zu Ü41. Flußdiagramm, Hauptprogramm Blatt 1
Hinweis: $\dot{V}_{pkt} \equiv \dot{V}$

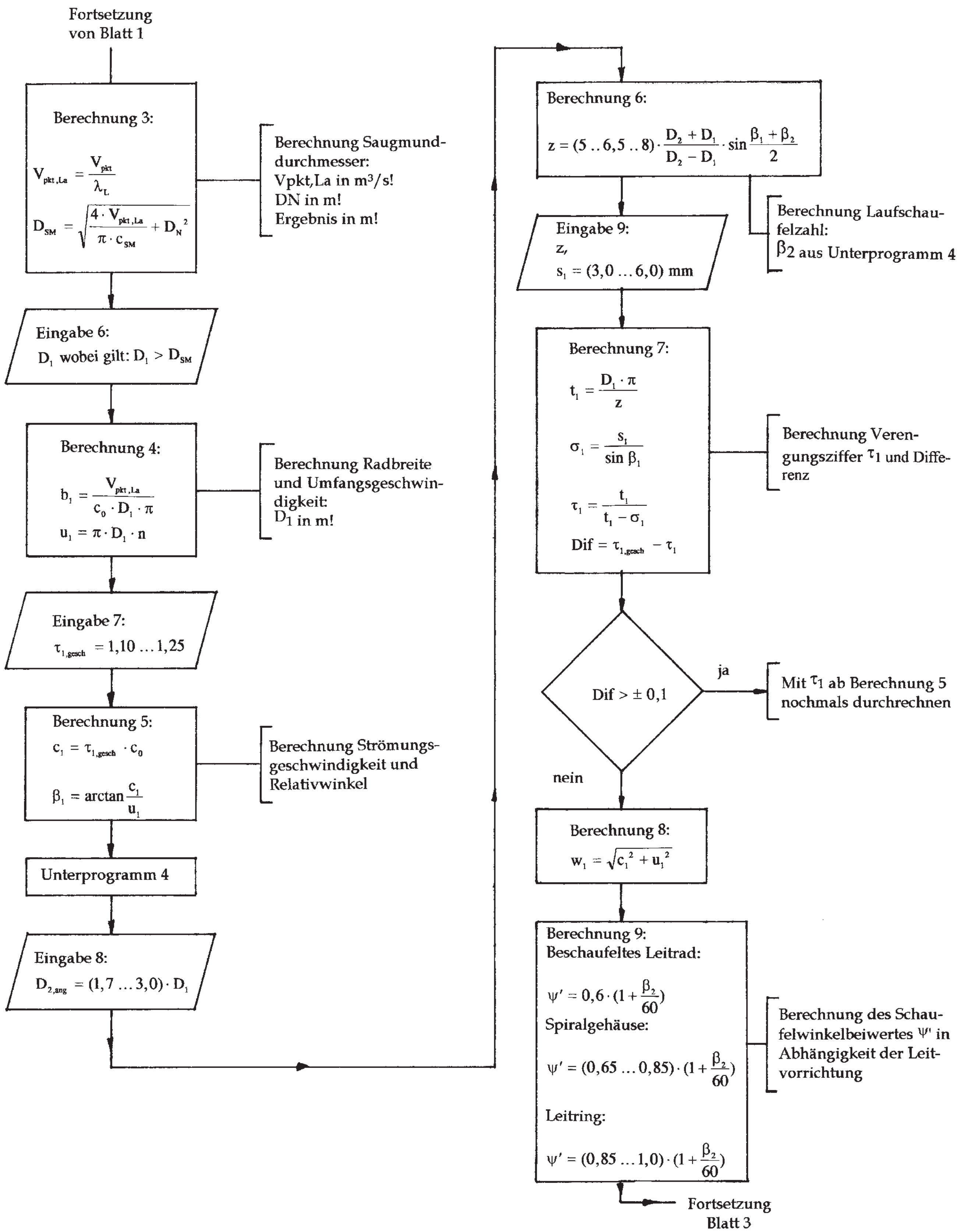


Bild 10 Lösungsskizze 10 zu Ü41. Flußdiagramm, Hauptprogramm Blatt 2

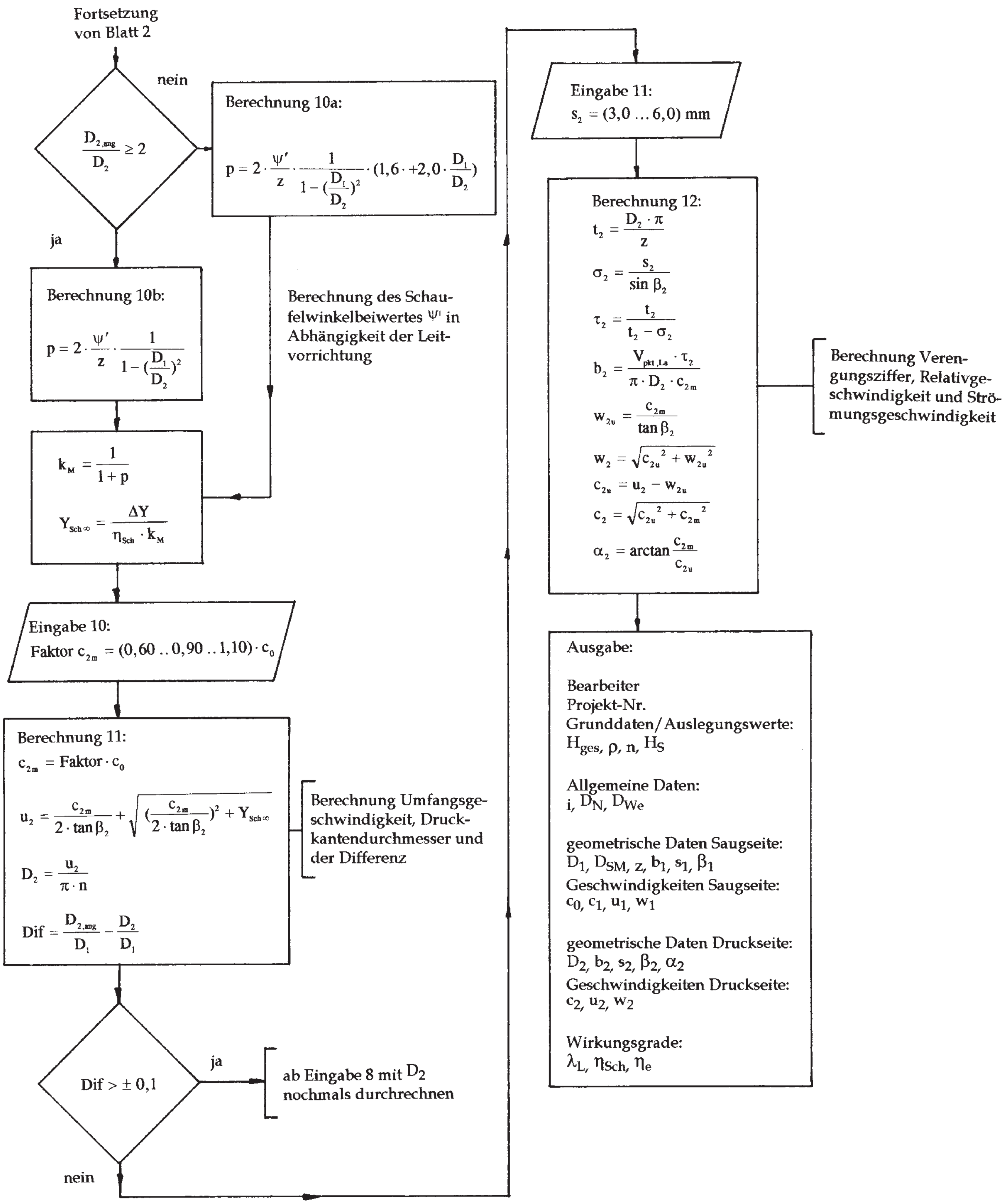


Bild 11 Lösungsskizze 11 zu Ü41. Flußdiagramm, Hauptprogramm Blatt 3
Fortsetzung: Unterprogramme 1 bis 4

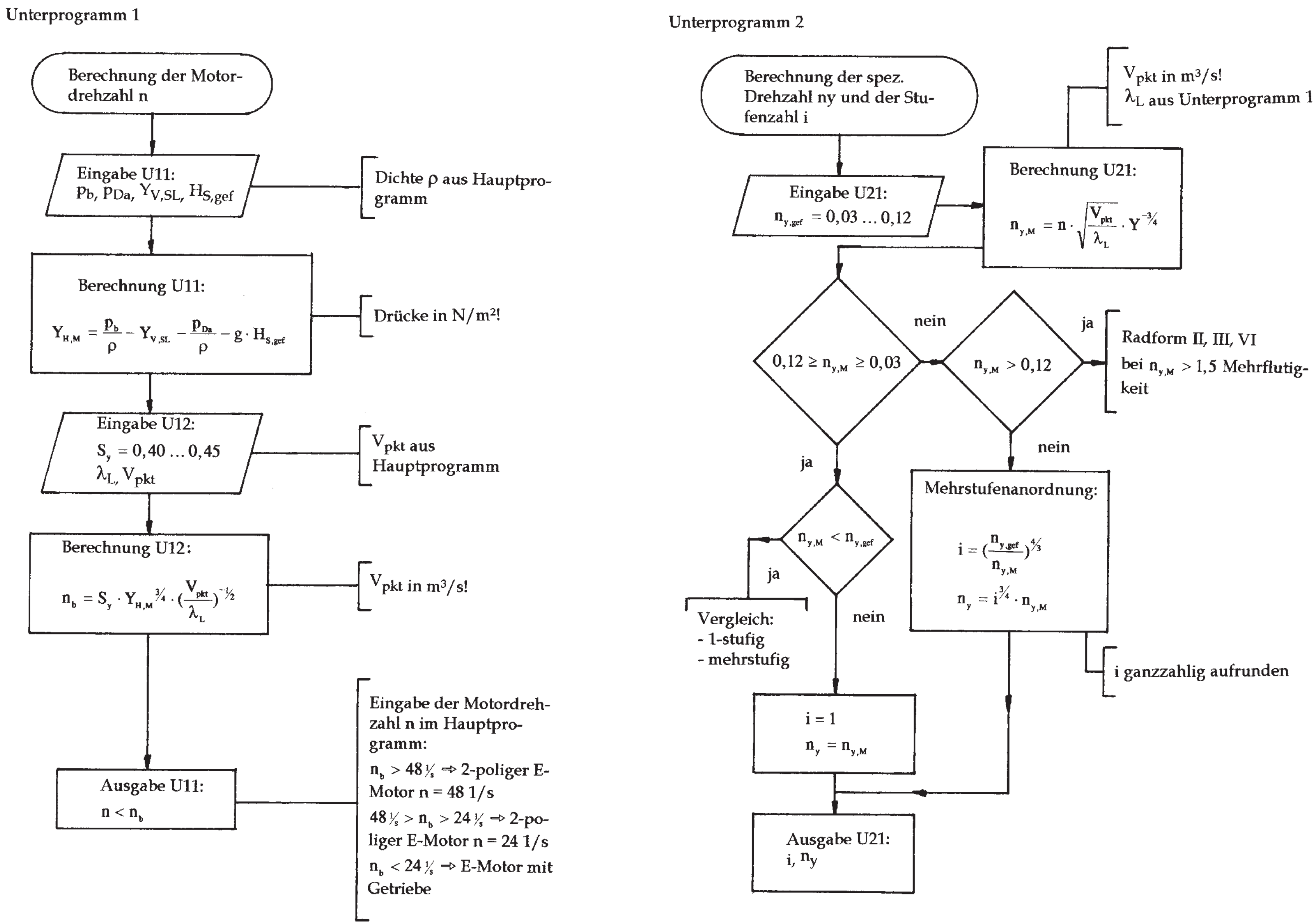
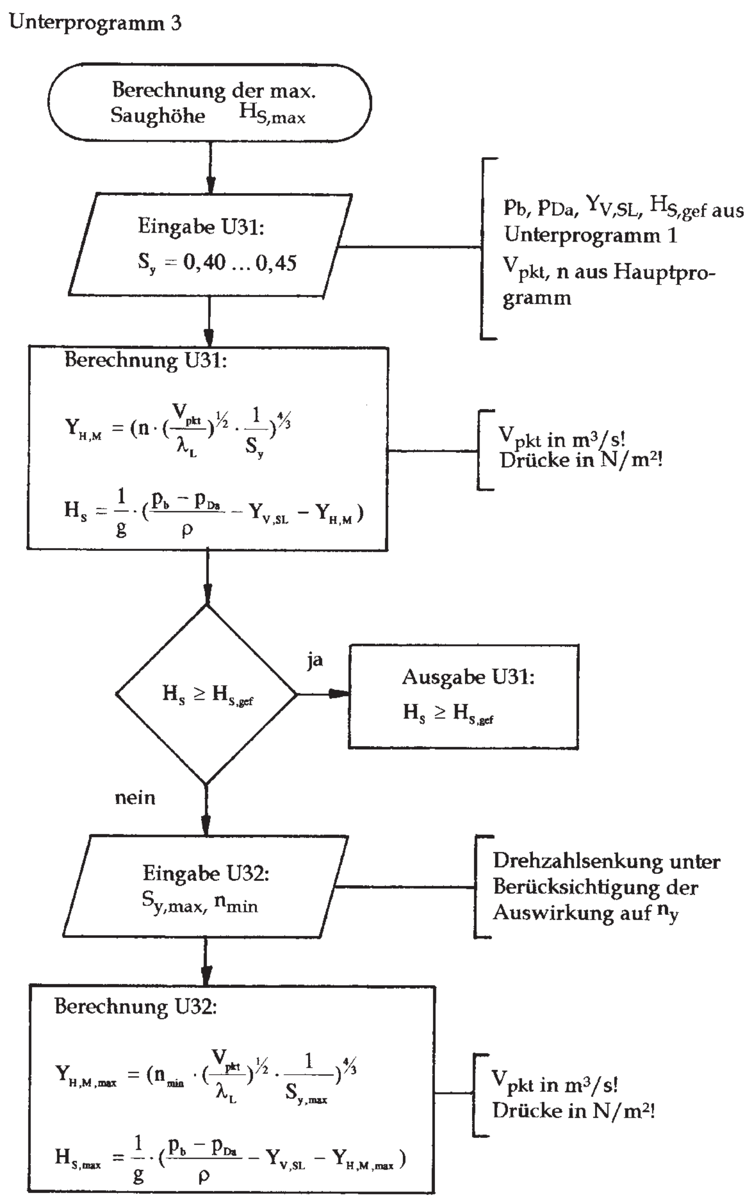


Bild 12. Lösungsskizze 12 zu Ü41. Flußdiaramm, Unterprogramme 1+2
Hinweise: Eingabe U11 bedeutet Unterprogramm1, Eingabe 1
Berechnung U21 bedeutet Unterprogramm 2, Berechnung 2
$\dot{V}_{pkt} \equiv \dot{V}$



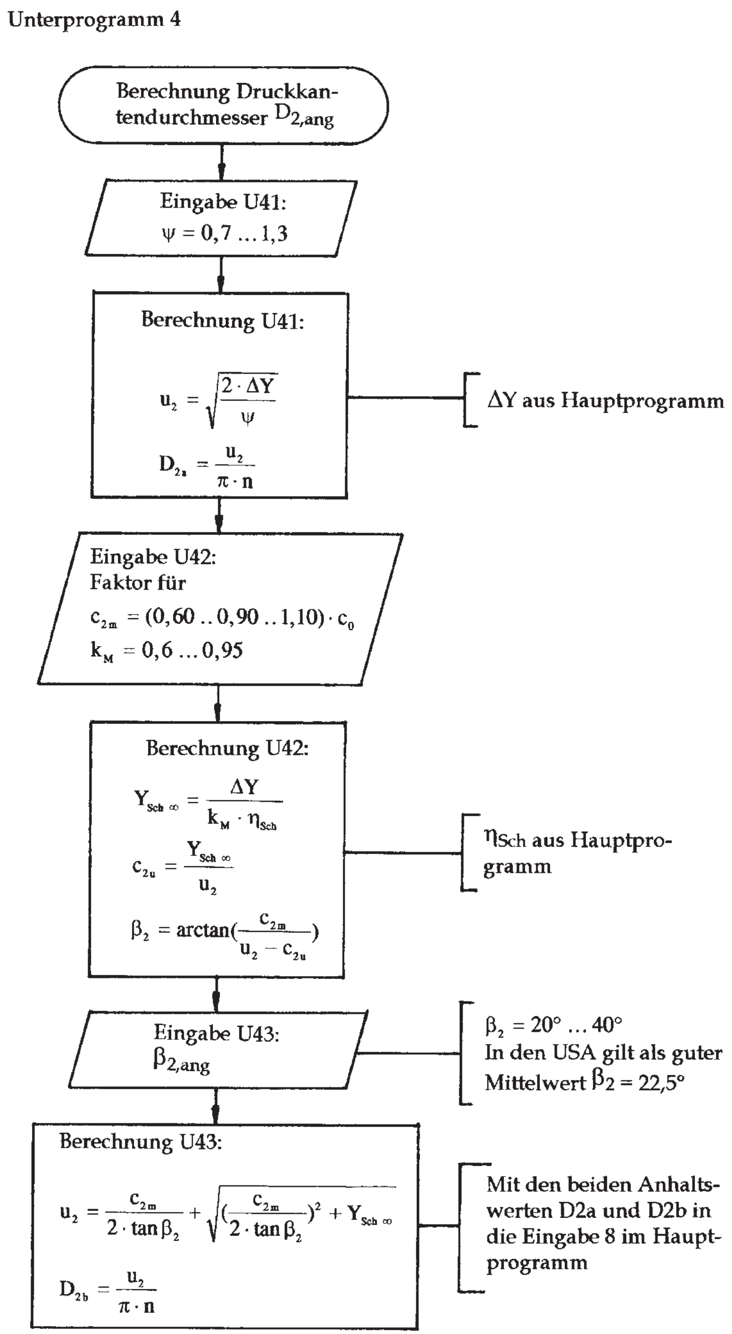


Bild 13. Lösungsskizze 13 zu Ü41. Flußdiaramm, Unterprogramme 3+4

Oder mit $Y_{Sch}/g = H_{th}$ wird als Energiehöhe

$Z_{Sch,x}/g = (1 - \eta_{Sch})\cdot H_{th}\cdot(\dot{V}_x/\dot{V})^2$ [m]

$Z_{Sch,x}/g = (1 - 0{,}87)\cdot 66{,}10\cdot(\dot{V}_x/\dot{V})^2$ [m]

$Z_{Sch,x}/g = 8{,}59\cdot(\dot{V}_x/\dot{V})^2$ [m]

Tab. 7. $Z_{Sch,x}/g = f(\dot{V}_x/\dot{V})$, Schauflungsverluste abhängig vom Durchsatzgrad.

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$Z_{Sch,x}/g$ [m]	0	0,09	0,34	0,77	1,37	2,15	3,09

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$Z_{Sch,x}/g$ [m]	4,20	5,50	6,96	8,59	10,39	12,37	14,52

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$Z_{Sch,x}/g$ [m]	16,84	19,33	22,00	24,83	27,84	31,01	34,36

Tabellarisch ausgewertet (Tab. 7) und aufgetragen in Bild 8 .

Stoßparabel: Nach Gl. (8-88):

$Z_{St,x} = (\varphi_{St}/2)\cdot(1 - \dot{V}_x/\dot{V})^2\cdot\left[u_1^2 + u_2^2\cdot(k_M\cdot D_2/D_4)^2\right]$

Hierbei

lt. Gl. (8-91): $\varphi_{St} = 0{,}5\ldots0{,}7(\ldots0{,}9)$ oder gemäß

Gl. (8-92): $\varphi_{St} = 0{,}3 + 0{,}6\cdot\beta_2^0/90$

$= 0{,}3 + 0{,}6\cdot 22{,}5/90 = 0{,}45$

erwartet: $\varphi_{St} = 0{,}6$ (etwa Mittelwert)

$D_2/D_4 = 230/234 = 0{,}983 \approx 1$

Werte eingesetzt, ergibt:

$Z_{St,x} = \frac{0{,}6}{2}\cdot(1 - \dot{V}_x/\dot{V})^2\cdot\left[17{,}34^2 + 34{,}68^2(0{,}73\cdot 0{,}983)^2\right]$

$Z_{St,x} = 276\cdot(1 - \dot{V}_x/\dot{V})^2\,[m^2/s^2]$ Oder als Energiehöhe

$Z_{St,x}/g = 28{,}13\cdot(1 - \dot{V}_x/\dot{V})^2$ [m]

Tabellarisch ausgewertet (Tab. 8) und im Diagramm von Bild 8 aufgetragen.

Tab. 8. Tabellarische Auswertung der Stoßparabel $Z_{St,x}/g = f(\dot{V}_x/\dot{V})$.

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$Z_{St,x}/g$ [m]	28,13	22,79	18,00	13,78	10,13	7,03	4,50

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$Z_{St,x}/g$ [m]	2,53	1,13	0,28	0	0,28	1,13	2,53

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$Z_{St,x}/g$ [m]	4,5	7,03	10,13	13,78	18,00	22,79	28,13

Kennlinie $H_x = F(\dot{V}_x)$ bzw. $H_x = f(\dot{V}_x/\dot{V})$:

$H_x = H_{th,x} - (Z_{Sch,x}/g + Z_{St,x}/g)$

In Bild 8 geometrisch subtrahiert.

Kennlinie der 4-stufigen Pumpe:

$H_{th,x,ges}$-Linie: $H_{th,x,ges} = Y_{Sch,x,ges}/g$

Nullhöhe: $H_{th,0,ges} = 4\cdot H_{th,0,St} = 4\cdot 89{,}5 = 358$ m

Nennhöhe: $H_{th,ges} = 4\cdot H_{th,St} = 4\cdot 66{,}1 = 264{,}4$ m

Damit läßt sich die Linie $H_{th,x,ges} = Y_{Sch,x,ges}/g$ auftragen.

In Tab. 8 sind die Verluste

$Z_{ges,x}/g = Z_{Sch,x}/g + Z_{St,x}/g$

für eine Stufe und die gesamte Pumpe zusammengestellt.

Gesamtkennlinie:

$H_{ges,x} = H_{th,ges,x} - (Z_{ges,x}/g)_{Pumpe}$

ergibt sich ebenfalls durch geometrische Subtraktion

Tab. 9. Gesamtverluste einer Stufe und der gesamten Pumpe, abhängig vom Durchsatzgrad, also $Z_{ges,x} = f(\dot{V}_x/\dot{V})$.

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
$(Z_{ges,x}/g)_{Stufe}$ [m]	28,13	22,9	18,34	14,55	11,50	9,18	7,59
$(Z_{ges,x}/g)_{Pumpe}$ [m]	112,5	91,6	73,4	58,2	46,0	36,72	30,36

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3
$(Z_{ges,x}/g)_{Stufe}$ [m]	6,73	6,63	7,24	8,59	10,67	13,5	17,05
$(Z_{ges,x}/g)_{Pumpe}$ [m]	26,92	26,52	28,96	34,36	42,68	54,0	68,2

$\dot{V}_x/\dot{V}$ [-]	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0
$(Z_{ges,x}/g)_{Stufe}$ [m]	21,34	26,36	32,13	38,61	45,84	53,8	62,49
$(Z_{ges,x}/g)_{Pumpe}$ [m]	85,36	105,44	128,52	154,44	183,36	215,2	249,96

In Bild 8, oder durch vervierfachen der Stufenkennlinie $H_{ges,x} = 4\cdot H_{Stufe,x}$

Abschließend sind die Flußdiagramme zum Erstellen eines Computer-Programmes zur Laufradberechnung zusammengestellt (Bilder 9, 10 und 11).

Flußdiagramme für Rechnerprogramme zum Berechnen der Leitvorrichtungen sind entsprechen aufzubauen.