Kennlinien und Kennlinienfeld einer Kreiselpumpe

Durch Kennlinien wird das Betriebsverhalten der Pumpe in Abhängigkeit vom Förderstrom $\dot{V}$ dargestellt.

1. Kennlinien einer Kreiselpumpe

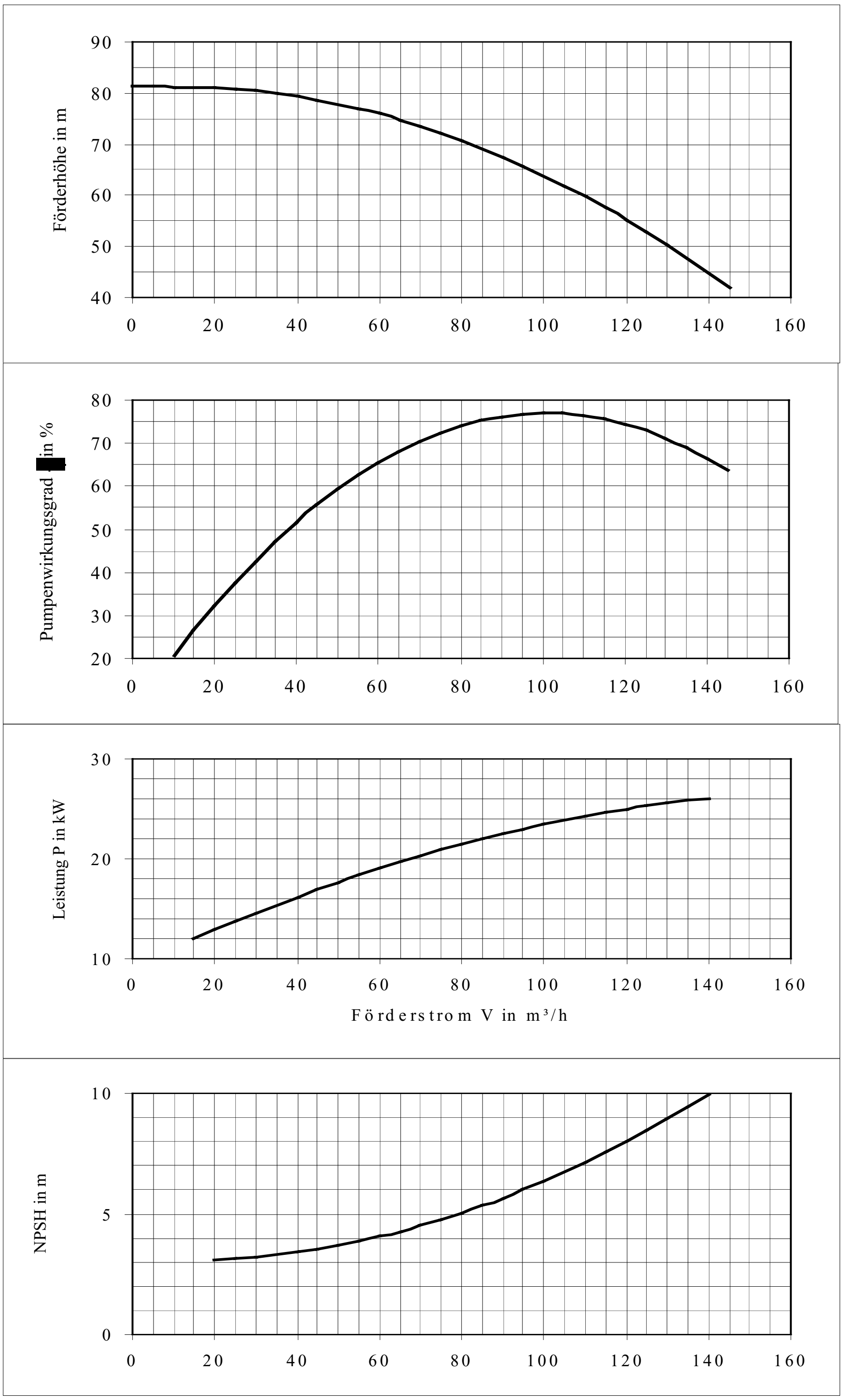

Bild 1 Kennlinien

Hierzu gehören:	$H = f(\dot{V})$
(jeweils bei n = konst.)	$\eta_P = f(\dot{V})$
	$P_W = f(\dot{V})$ bzw. $P_{el} = f(\dot{V})$
	$NPSH = f(\dot{V})$

Tatsächliche Kurven sind Katalogen der Pumpenhersteller zu entnehmen. Die Kennlinie $H = f(\dot{V})$ kann gut durch Parabeln angenähert werden.

Anmerkungen

1. $H = f(\dot{V})$ wird auch dargestellt mit $H = f(Q)$ und daher Q-H-Kurve genannt.
2. $H = f(\dot{V})$ wird auf dem Prüfstand gemessen, dabei wird $\dot{V}$ durch Drosselung eingestellt. Daher wird $H = f(\dot{V})$ auch Drosselkurve der Pumpe genannt.
3. Bei „kleinen" Heizungspumpen wird häufig im Katalog nur $H = f(\dot{V})$ dargestellt. Darüber werden aber Leistungswerte angegeben, aus denen η errechnet werden kann. Zur Vermeidung von Kavitation werden Drücke bzw. Druckhöhen angegeben, die mindestens im Saugstutzen herrschen müssen.

2. Kennlinien für Radial- und Axialräder

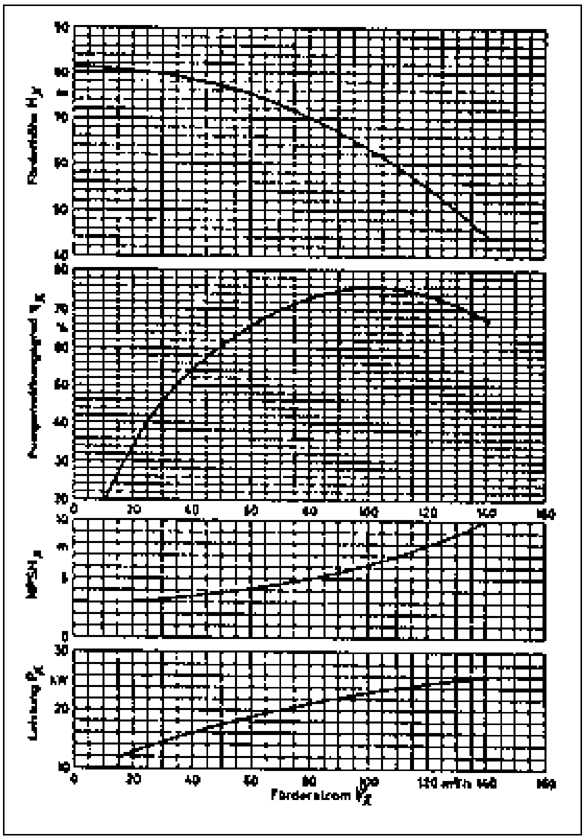

Bild 2 Radialrad

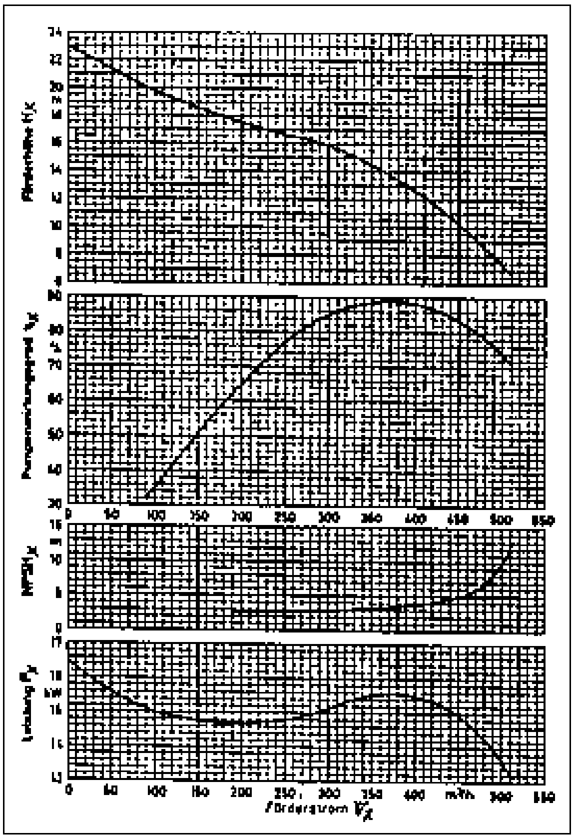

Bild 3 Halbaxialrad

Radialpumpe

Mit steigendem Förderstrom gleichmäßig abfallende Förderhöhe (stabiles Verhalten). Große Nullförderhöhe. Breit ausgeprägtes, flaches Wirkungsgradmaximum (völlige Kurve). Kleinster maximaler Wirkungsgrad (η_{max} = 0,76) der beiden Pumpentypen. Leistungsbedarf und NPSH-Wert steigen mit wachsendem Durchsatz. Bei Nullförderhöhe $\dot{V} = 0$ (geschlossener Druckschieber) niedrigster Leistungsbedarf.

Radialpumpen sollten bei geschlossenem Druckschieber angefahren werden. Der Leistungsbedarf bei Nullförderung ($\dot{V} = 0$) liegt dann bei $P_0 \approx (0{,}4 \ldots\ 0{,}6) \cdot P$ mit P als Auslegungs- oder Nennleistung.

Diagonalpumpe oder Halbaxialpumpe

Von der Nullförderhöhe aus, mit steigendem Förderstrom rasch abfallende Förderhöhe (stabiles Verhalten). Schmales Wirkungsgradmaximum. Mit 89 % höchster erreichter Wirkungsgrad der beiden Pumpentypen. Über weiten Bereich niedrige, wenig veränderlicher NPSH-Wert. Erst bei sehr großem Förderstrom rascher Anstieg des NPSH-Wertes, weshalb erhöhte Kavitationsgefahr. Leistungsbedarf bei Nullförderung ($\dot{V} = 0$) am größten. Danach fällt der Leistungsbedarf auf weitem $\dot{V}$-Bereich ab, um bei großem Förderstrom nach geringem Anstieg erneut abzufallen. Deshalb Pumpe bei halb geöffnetem Druckschieber anfahren. Der Leistungsbedarf bei Nullförderung ist $P_0 \approx (1{,}1 \ldots\ 1{,}3) \cdot P$.

Man unterscheidet:

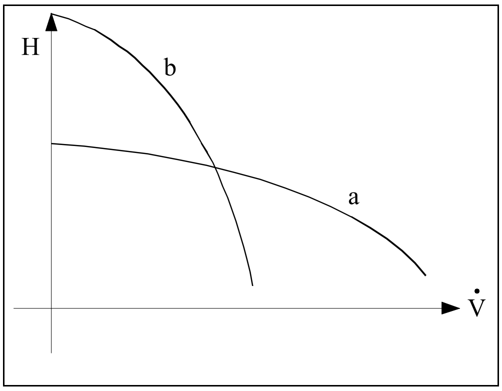

Bild 4 a. Pumpen mit flacher Kennlinie
b. Pumpen mit steiler Kennlinie

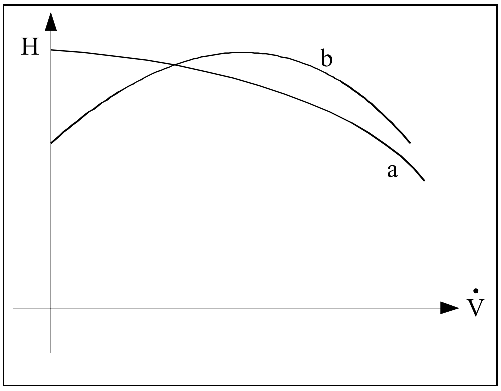

Bild 5 a. Pumpen mit stabiler Kennlinie
b. Pumpen mit instabiler Kennlinie

Grund: hohe Stoßverluste

Abhilfe: Konstruktive Maßnahmen

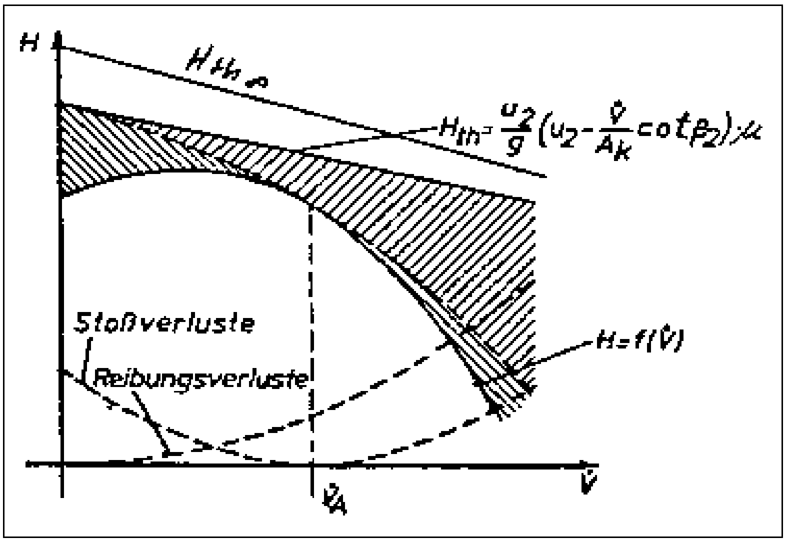

Bild 6 Stoß- und Reibungsverluste

Anmerkungen

1. $H = f(\dot{V})$ wird auch dargestellt mit $H = f(Q)$ und daher Q – H – Kurve genannt.
2. $H = f(\dot{V})$ wird auf dem Prüfstand gemessen, dabei wird $\dot{V}$ durch Drosselung eingestellt, daher wird $H = f(\dot{V})$ auch Drosselkurve der Pumpe genannt.
3. Bei „kleinen" Heizungspumpen wird häufig im Katalog nur $H = f(\dot{V})$ dargestellt. Darüber werden aber Leistungswerte angegeben, aus denen η errechnet werden kann.

Zur Vermeidung von Kavitation werden Drücke bzw. Druckhöhen angegeben, die mindestens im Saugstutzen herrschen müssen. Der übliche Weg beim Einsatz von Pumpen, ist, dass man die Pumpenkennlinie aus dem Katalog in ein Diagramm übernimmt. Die Rohrnetzkennlinie wird berechnet und ebenfalls eingezeichnet. Wenn man nicht nur zeichnen, sondern auch rechnen will, muss man eine Näherungsfunktion für die Pumpenkennlinie aufstellen.

3. Näherungsfunktion der Kennlinie $H = f(\dot{V})$

Zur rechnerischen Ermittlung von Betriebszuständen in Rohrnetzen, muss eine gut handhabbare Funktion $H = f(\dot{V})$ vorliegen. Es kommen mehrere Funktionen in Frage.

Anforderungen an die Funktion

- Sie sollte gut an den realen Verlauf angepasst sein,
- es sollte aber auch eine einfache Funktion sein
- Geraden passen schlecht
- quadratische Funktionen passen besser

3.1. Allgemeine Parabel als Näherungsfunktion

Näherungsfunktion 1: $\boxed{H = C_0 + C_1 \cdot \dot{V} + C_2 \cdot \dot{V}^2}$

Die Näherung ist im allgemeinen gut. Aber: Es muss ein Programm für die Berechnung der Regressionsparabel vorliegen. Bei bestimmten Rohrnetzberechnungsverfahren bereitet das lineare Glied (2. Term) Schwierigkeiten.

Rohrnetze kann man meist nur iterativ durchrechnen. Dabei stört das lineare Glied $C_1 \cdot \dot{V}$, weil durch C_1 das Maximum nach rechts bzw. links verschoben wird.

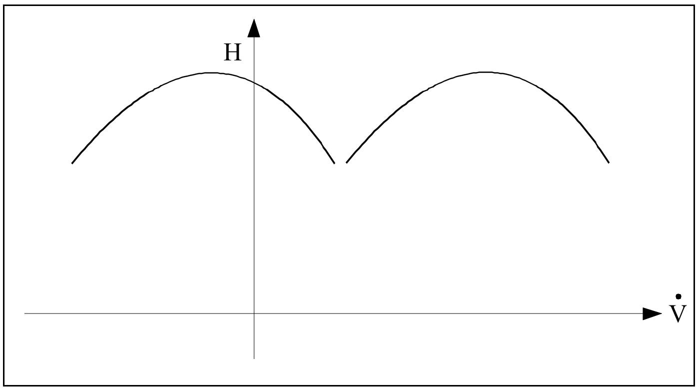

Bild 7 Allgemeine Quadratische Gleichung

3.2. Parabel ohne lineares Glied als Näherungsfunktion

Näherungsfunktion 2: $\boxed{H = C_0 + C_2 \cdot \dot{V}^2}$

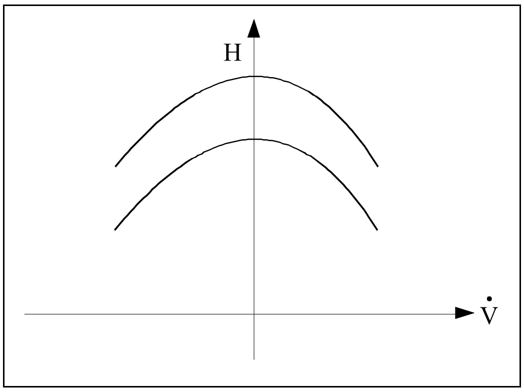

Bild 8 Quadratische Gleichung ohne lineares Glied

Die Näherung ist zwar nicht mehr so gut, aber die Berechnung wird einfacher. Wird $z = \dot{V}^2$ gesetzt, so gilt:

$$H = C_0 + C_2 \cdot z$$

Zur Ermittlung von C_0 und C_2 kann das Verfahren zur Ermittlung der Ausgleichsgeraden (lineare Regression) eingesetzt werden.

Weiterer Schönheitsfehler

C_0 ist die Förderhöhe der Pumpe bei z = 0. Im allgemeinen ist der errechnete Wert C_0 ungleich dem gemessenen Wert $H_{\dot{V}=0} = H_0$. Es gilt also: $C_0 \neq H_0$.

3.3. Parabel ohne lineares Glied mit $C_0 = H_0$ als Näherungsfunktion

H_0 ist die gemessene Förderhöhe bei $\dot{V}_0 = 0$.

Näherungsfunktion 3: $\boxed{H = H_0 + C_2 \cdot \dot{V}^2}$

mit $$C_2 = -\frac{\sum (H_0 - H_i) \cdot \dot{V}_i^2}{\sum \dot{V}_i^4}$$

Die Bestimmung des Koeffizienten C_2 erfolgt aus der Regressionsgleichung 2. Ordnung (Parabel). C_2 kann mit einem einfachen Tischrechner bestimmt werden.

3.4. Beispiel

Gemessene Daten von Pumpe mit Radialrad

$\dot{V}$ in m³/s	0	20	40	60	80	100	120	140
H in m	82	80	78	75	70	63	55	45

Regression nach Näherungsfunktion 3

$\dot{V}$	$\dot{V}^2$	$\dot{V}^4$	H_0 - H_i	$\dot{V}^2 \cdot (H_0 - H_i)$
0	0	0	0	0
20	$4 \cdot 10^2$	$16 \cdot 10^4$	2	$4 \cdot 10^2$
40	$16 \cdot 10^2$	$256 \cdot 10^4$	4	$64 \cdot 10^2$
60	$36 \cdot 10^2$	$1296 \cdot 10^4$	7	$252 \cdot 10^2$
80	$64 \cdot 10^2$	$4096 \cdot 10^4$	12	$768 \cdot 10^2$
100	$100 \cdot 10^2$	$10000 \cdot 10^4$	19	$1900 \cdot 10^2$
120	$144 \cdot 10^2$	$20736 \cdot 10^4$	27	$3888 \cdot 10^2$
140	$196 \cdot 10^2$	$38416 \cdot 10^4$	37	$7252 \cdot 10^2$
Summe		$74816 \cdot 10^4$		$14132 \cdot 10^2$

Berechnung von C_2:

$$C_2 = -\left(\sum \left((H_0 - H_i) \cdot \dot{V}_i^2\right)\right) / \left(\sum V_i^4\right)$$
$$C_2 = -\left(14132 \cdot 10^2 \ m^6 \cdot m \cdot h^4\right) / \left(74816 \cdot 10^4 \ h^2 \cdot m^{12}\right)$$
$$C_2 = -0{,}189 \cdot 10^{-2} \ \frac{m \cdot h^2}{m^6}$$

Gleichung für die Pumpe nach Regression 3:

$$H = 82\ m - 0{,}189 \cdot 10^{-2}\ \frac{m \cdot h^2}{m^6} \cdot \dot{V}^2$$

Aus der nach der Näherungsfunktion ermittelten Regressionsgleichung ergeben sich folgende Förderhöhen der Pumpe:

$\dot{V}$ in m³/s	0	20	40	60	80	100	120	140
H in m	82,0	81,2	79,0	75,2	69,9	63,1	54,8	45,0

Die Werte stimmen sehr gut mit den Messwerten überein.

Regression nach Näherungsfunktion 2

Zum Vergleich wird die Näherungsfunktion 2 auch verwendet. Es ergibt sich für die Pumpe:

$$H = 81{,}4167\ m - 0{,}0019\ \frac{m \cdot h^2}{m^6} \cdot \dot{V}^2$$

Aus der nach Näherungsfunktion 2 ermittelten Regressionsgleichung ergeben sich folgende Förderhöhen der Pumpe

$\dot{V}$ in m³/s	0	20	40	60	80	100	120	140
H in m	81,4	80,7	78,4	74,6	69,3	62,4	54,1	44,2

Regression nach Näherungsfunktion 1

Zum Vergleich wird die Näherungsfunktion 1 auch verwendet. Es ergibt sich für die Pumpe:

$$H = 81{,}416669\ m - 6{,}911116 \cdot 10^{-8}\ \frac{m \cdot h}{m^3} \cdot \dot{V} - 0{,}001845\ \frac{m \cdot h^2}{m^6} \cdot \dot{V}^2$$

Aus der nach Näherungsfunktion 1 ermittelten Regressionsgleichung ergeben sich folgende Förderhöhen der Pumpe

$\dot{V}$ in m³/s	0	20	40	60	80	100	120	140
H in m	81,4	80,7	78,5	74,8	69,6	63,0	54,9	45,3

Übersicht

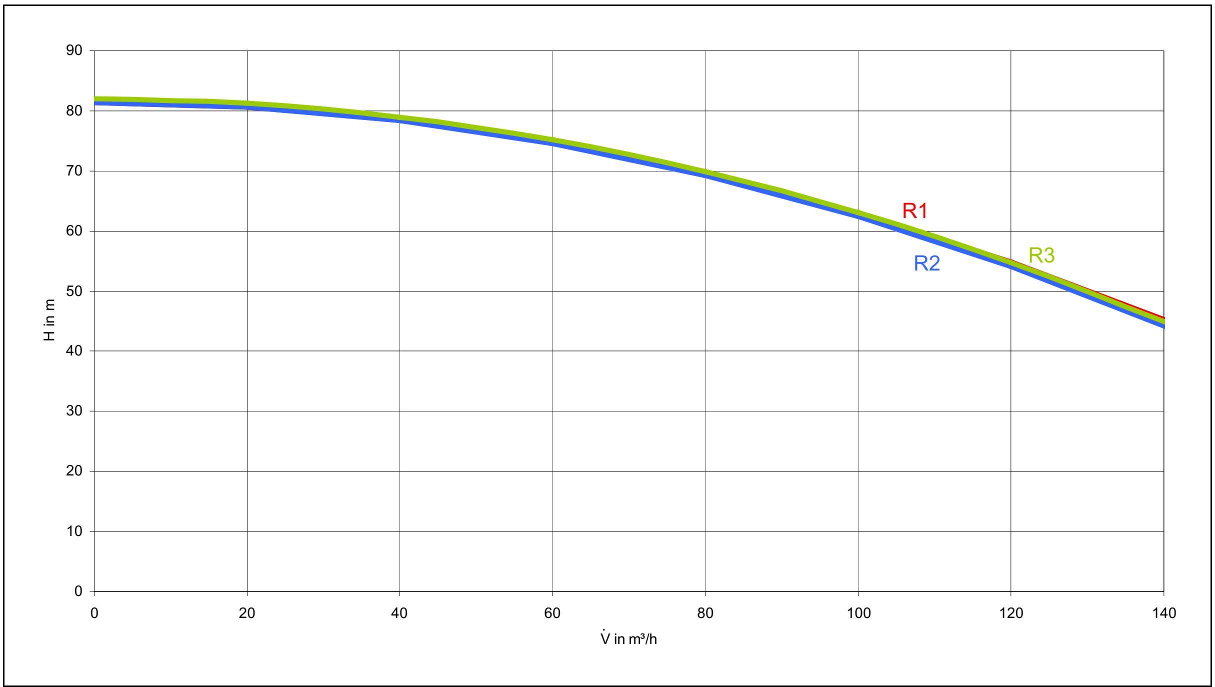

Bild 9 Vergleich der Regressionen

4. *Abhängigkeit der charakteristischen Daten* $\dot{V}, H, P, \eta$ *von der Drehzahl bei Radialrädern*

Es gelten (ohne Ableitung) für:

- Förderstrom $\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \frac{n_1}{n_2}$
- Förderhöhe $\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$
- Nutzleistung $\frac{P_{N1}}{P_{N2}} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^3$
- Wirkungsgrad (empirisch) $\eta_2 = 1 - (1 - \eta_1) \cdot \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,1}$

Der Term $\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^{0,1}$ bleibt weitgehend in der Nähe von 1, damit bleibt η_2 in der Nähe von η_1 .

Beispiel

$\eta_1 = 0,8$ und $\frac{n_1}{n_2} = 0,8$

$\eta_2 = 1 - (1 - 0,8) \cdot 0,8^{0,1} = 0,8$

5. Kennlinienfeld

In einem Kennlinienfeld werden $H = f(\dot{V})$ und $\eta = f(\dot{V})$ entweder mit der Drehzahl n als Parameter oder mit dem Laufraddurchmesser D als Parameter dargestellt.

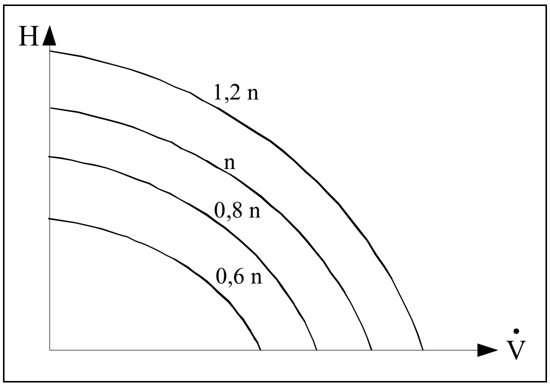

Bild 10 Kennlinienfeld

Eine besondere Form einer Darstellung eines Kennlinienfeldes ist das sogenannte *Muscheldiagramm* . Unter Verwendung der Formeln ergibt sich das Kennlinienfeld in Bild 2. Dabei wurden die Kurven $\eta = f(\dot{V}, n)$ nicht direkt aufgetragen. Vielmehr wurden die η-Verläufe auf den zugehörigen Linienzug H = f ($\dot{V}$) projeziert und dann die Punkte gleichen Wirkungsgrades verbunden.

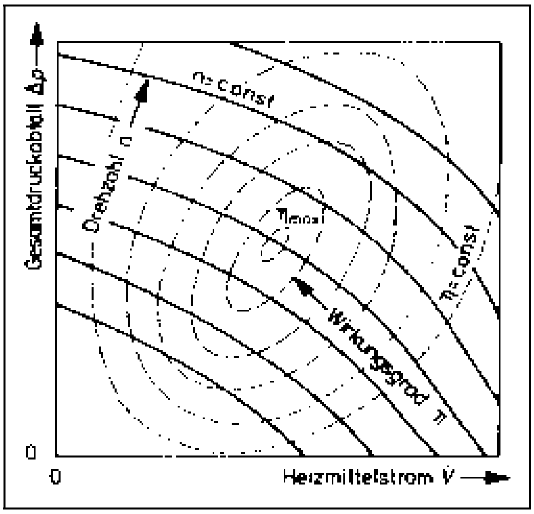

Bild 11 Muscheldiagramm

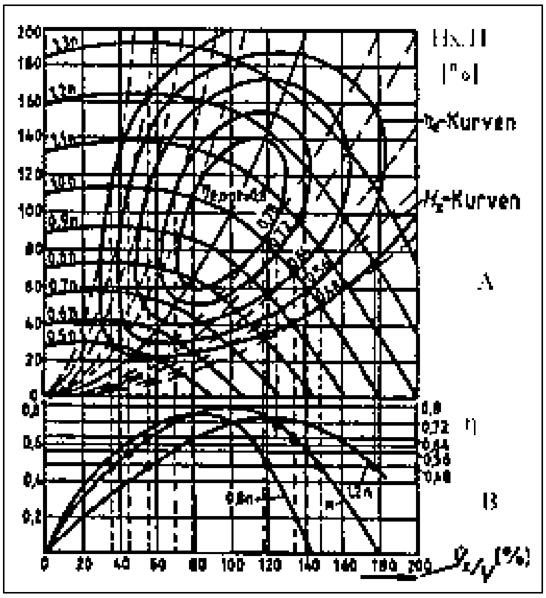

Bild 12 Kennfeld einer Kreiselpumpe in dimensionslosen Koordinaten (A – Muscheldiagramm, B - Wirkungsgradkurve)

5.1. Zeichnerische Ermittlung der Kennlinie

Zeichnerische Ermittlung der Kennlinie $H = f(\dot{V})$ bei n_2, wenn sie bei n_1 gegeben ist:

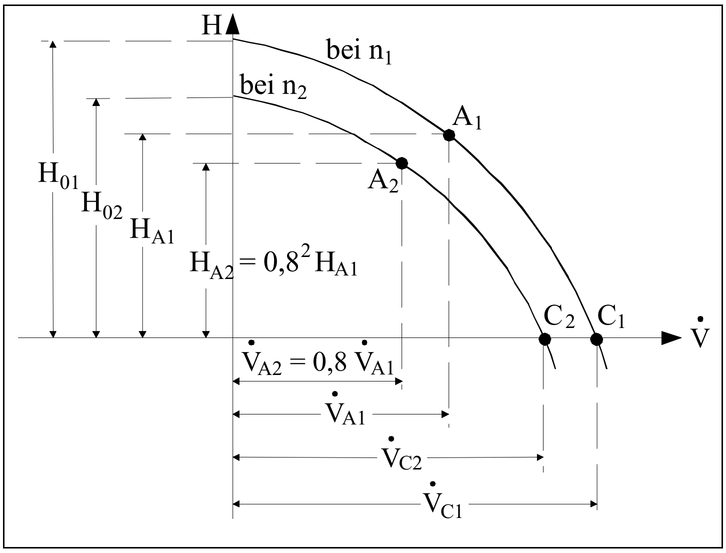

Bild 13 Zeichnerische Ermittlung der Kennlinie (Annahme: $n_2 = 0{,}8 \cdot n_1$)

Gesucht wird die Kennlinie für n_2 bei $n_2 = 0{,}8 \cdot n_1$.
A_1 ist ein beliebiger Punkt auf der Kurve für n_1.
Daraus ergibt sich ein Wertepaar $\dot{V}_{A1}$ und H_{A1}.
Es sollen sein: $\dot{V}_{A2} = 0{,}8 \cdot \dot{V}_{A1}$ und $H_{A2} = 0{,}8^2 \cdot H_{A1} = 0{,}64 \cdot H_{A1}$.
Die eingetragenen Werte liefern A_2.

C_2 ergibt sich aus C_1 bei $\dot{V}_{max}$.	$\dot{V}_{C2} = 0{,}8 \cdot \dot{V}_{C1}$
H_{02} ergibt sich aus H_{01} bei $\dot{V}_0$.	$H_{02} = 0{,}8^2 \cdot H_{01}$

5.2. Rechnerische Ermittlung der Kennlinie

Rechnerische Ermittlung der Kennlinie $H = f(\dot{V})$ bei n_2, wenn sie bei n_1 gegeben ist.

1. Näherungsgleichung

$$H = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot C_0 + \left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cdot C_1 \cdot \dot{V} + C_2 \cdot \dot{V}^2$$

2. Näherungsgleichung

$$H = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot C_0 + C_2 \cdot \dot{V}^2$$

3. Näherungsgleichung

$$H = \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 \cdot H_0 + C_2 \cdot \dot{V}^2$$

6. Abhängigkeit der charakteristischen Daten $\dot{V}$, H, P, η vom Laufraddurchmesser D

Es gelten (ohne Ableitung) für:

- Förderstrom $\frac{\dot{V}_1}{\dot{V}_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$
- Förderhöhe $\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2$
- Nutzleistung $\frac{P_{N1}}{P_{N2}} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^4$
- Wirkungsgrad η bleibt in der Nähe von η_{max} ungefähr gleich

Welche praktischen Konsequenzen werden aus den genannten Bedingungen gezogen:

1. Pumpenfirmen bieten Pumpen an, die sich ausschließlich durch Laufräder mit verschiedenen Außendurchmessern unterscheiden. (Vorteile bei Fertigung und Lagerhaltung)
2. Ist der Volumenstrombedarf eines Netzes dauernd kleiner als der von der Pumpe gelieferte Förderstrom, kann durch Abdrehen des Laufrades die Pumpe angepasst werden. (Auch geringe Vergrößerung um max. 3-4 % durch Anschärfen der Schaufeln möglich)

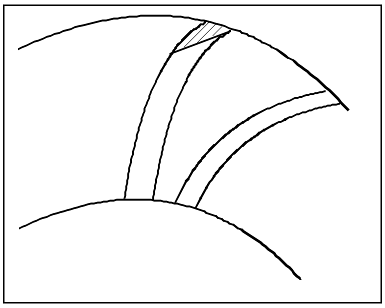

Bild 14 Angeschärfte Schaufeln

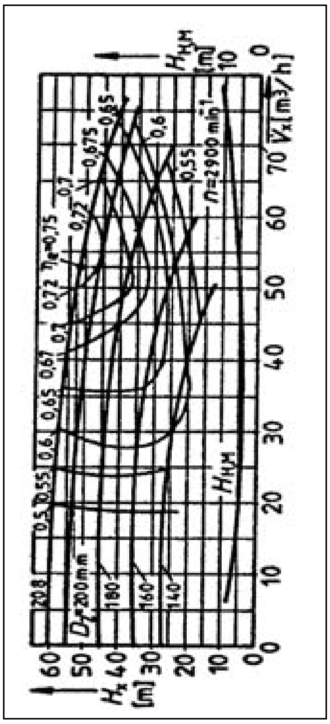

Bild 15 Kennfeld einer Kreiselpumpe bei verschiedenen Abdrehungen des Laufraddurchmessers

Quelle: Datenpool IfHK, FH Wolfenbüttel