

Die Definition von Re_{eff} deckt sich mit Gl. (1.47). Die Konstante c hängt vom Fließindex m des Mediums, die Steigung a von der Pumpwirkung des Rührers ab: $a \sim 1,2 q_L/(nd^3)$.

3.5 Optimieren nach kleinster Mischarbeit

Die Entscheidung darüber, welcher Rührertyp unter den jeweiligen stofflichen und geometrischen Bedingungen für das Homogenisieren eines Flüssigkeitsgemisches ohne Dichte- und Viskositätsunterschiede am geeignetsten ist, läßt sich nur durch Verknüpfung der Mischzeit- und Leistungs-Charakteristiken beantworten. Somit werden Optimalbedingungen erarbeitet, unter denen dieser Vorgang mit kleinster Mischarbeit $P\theta$ [$Ws = J$] durchgeführt werden kann.

Die Frage lautet: Welcher Rührertyp bewirkt beim gegebenen Stoffsystem und gegebenen Behälter (Behälterdurchmesser D) die geforderte Mischzeit θ mit kleinster Leistung und damit kleinster Mischarbeit ($P\theta = \min$)?

Bei dieser Fragestellung interessieren zunächst also weder der Rührerdurchmesser noch seine Drehzahl; die Relevanzliste lautet somit:

$$\{P, \theta; D; \nu, \rho\}$$

Sie liefert zwei Kennzahlen:

$$\Pi_1 = \frac{PD}{\rho \nu^3} = \frac{PD\rho^2}{\eta^3} \quad \text{und} \quad \Pi_2 = \frac{\theta \nu}{D^2} = \frac{\theta \eta}{D^2 \rho} \quad (3.28)$$

Diese beiden Kennzahlen lassen sich aus den bekannten Zahlenwerten von Ne , $n\theta$ und Re unter Zuhilfenahme vom (ebenfalls bekannten) Durchmesser Verhältnis D/d gewinnen. Es gilt nämlich:

$$\Pi_1 = Ne Re^3 D/d \quad \text{und} \quad \Pi_2 = n\theta Re^{-1} (D/d)^2 \quad (3.29)$$

In Abb. 3.11 ist dieser Zusammenhang für jene Rührertypen aus Abb. 2.1 dargestellt, die in einem bestimmten Abschnitt der Kennzahl Π_2 die niedrigsten Π_1 -Werte aufweisen, also in diesem Bereich die kleinste Rührleistung benötigen.

Die Handhabung dieses Arbeitsdiagramms ist äußerst einfach. Man kennt die Werte des Stoffsystems, die Größe des Behälters (D) und die gewünschte Mischzeit θ : damit kann man die Kennzahl Π_2 bilden. Aus dem Kurvenzug $\Pi_1 = f(\Pi_2)$ in Abb. 3.11 gewinnt man nun folgende Informationen:

- 1) Der günstige Rührertyp und Bewehrung sind über der Abszissenachse angegeben. Der Rührerdurchmesser folgt aus dem vorliegenden D und den Angaben zur Rührergeometrie in Abb. 2.1.
- 2) Am Schnittpunkt des Π_2 -Wertes mit der Kurve wird der Zahlenwert von Π_1 abgelesen und daraus die Rührleistung P berechnet.
- 3) Am gleichen Schnittpunkt wird von der Re -Skala der Zahlenwert von Re abgelesen und daraus die Rührerdrehzahl bestimmt.

Es soll betont werden, daß in diesem Diagramm beispielhaft lediglich jene Rührer vertreten sind, deren geometrische Verhältnisse in Abb. 2.1 festgehalten und deren Leistungs- und Mischzeit-Charakteristiken in den Abb. 2.2 und

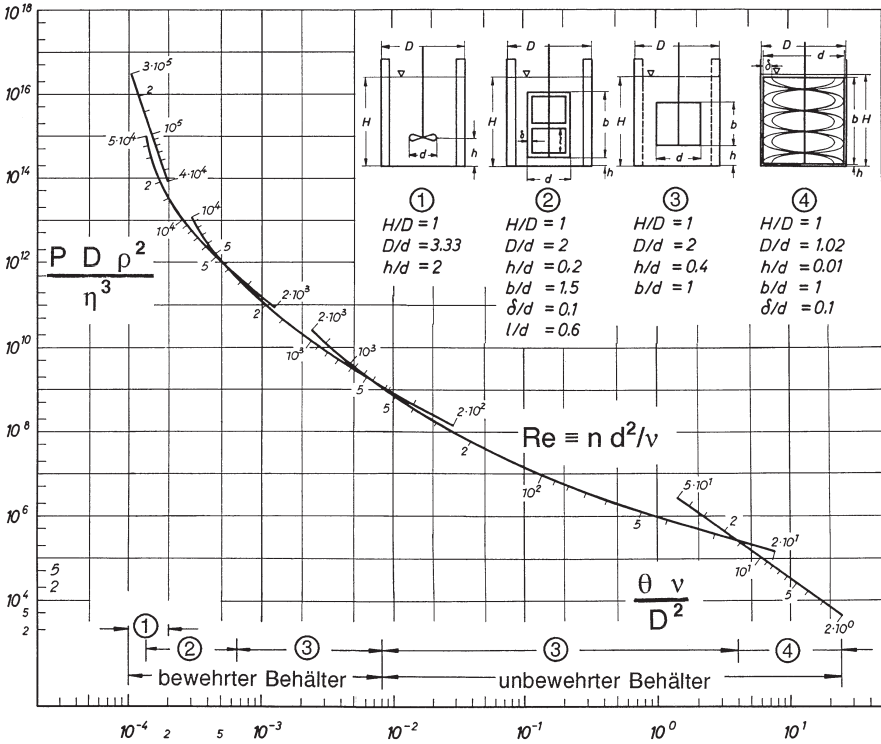


Abb. 3.11. Arbeitsblatt zur Ermittlung des günstigsten Rührertyps und Bestimmung der günstigsten Rührbedingungen zum Erzielen der kleinsten Mischarbeit $P\theta$. Zeichenerklärung für Rührertypen in Abb. 2.1. Aus [611]

3.5 vorgestellt sind. Um herauszufinden, welcher Rührertyp für eine ganz bestimmte Homogenisieraufgabe wirklich der am besten geeignete ist, müßte eine ganze Palette von Rührertypen unter Änderung derer Parameter (Anzahl der Rührerelemente, Anstellwinkel der Schaufeln bzw. der Rührerblätter, usw.) und insbesondere deren Einbaubedingungen (H/D , D/d , h/d , usw.) vermessen und dokumentiert werden; ein Unterfangen, welches den Umfang dieses Buches bei weitem sprengen würde. In diesem Zusammenhang ist [0.19] eine empfehlenswerte Lektüre.

Des weiteren soll darauf hingewiesen werden, daß die dieser Darstellung zugrunde liegenden Mischzeit-Charakteristiken aus Abb. 3.5 einem sehr hohen Mischungsgrad von $M = 99\%$ entsprechen. Es gibt sicherlich viele Rühraufgaben, bei denen ein wesentlich niedrigerer Mischungsgrad genügen wird.

Diese beiden Gesichtspunkte sind bei der Festlegung der Rührbedingungen für eine kostengünstige Homogenisierung unbedingt zu beachten.

3.6 Maßstabsübertragung des Homogenisierungsprozesses

Es besteht kein Zweifel, daß die Charakteristiken $n\theta(Re)$ und $Ne(Re)$ sowie der Zusammenhang $\Pi_1 = f(\Pi_2, Re)$ in Abb. 3.11 die verbindlichen Unterlagen zur Auslegung von Rührern für Homogenisierungsprozesse darstellen. Früher wurde allerdings oft behauptet, daß die volumenbezogene Rührleistung P/V generell ein geeigneter Parameter zur Dimensionierung von Rührwerken sei. Es läßt sich nun leicht überprüfen, ob diese Behauptung bei den Homogenisierungsprozessen zutrifft oder nicht. Dazu bilden wir aus dem Versuchsmaterial $n\theta(Re, D/d)$ und $Ne(Re, D/d)$ eine modifizierte P/V -Kennzahl Π_3 :

$$\Pi_3 \equiv \frac{P}{D^3} \frac{\theta^2}{\eta}, \quad (3.30)$$

die ebenfalls eine Funktion von $\Pi_2 \equiv \theta v/D^2$ und Re sein muß.

Dieser Zusammenhang ist in Abb. 3.12a mit den Versuchsergebnissen von Hoogendorn und den Hartog [220] wiedergegeben und es zeigt sich, daß im laminaren Bereich für einige axialfördernde Rührertypen (Wendel- und Schraubenrührer; Propellerrührer im Leitrohr) $\Pi_3 = \text{const}$ gilt, d. h. die volumenbezogene Rührleistung, welche für eine bestimmte Homogenisierzeit benötigt wird, ist hier proportional der Viskosität η der Flüssigkeit und unabhängig vom Behälterdurchmesser D . In diesem Bereich ist für diese Rührer somit $P/D^3 \approx P/V$ tatsächlich ein Dimensionierungs-Kriterium.

Im Bereich $\Pi_2 \gg 10^{-1}$ ist Π_3 auch bei diesen Rührertypen nicht mehr konstant, sondern fällt schnell ab, um dann ab $\Pi_2 = 10^2$ wieder stark anzusteigen; vgl. auch Abb. 3.12b, aus [611]. Insofern eignet sich P/V generell keinesfalls als Dimensionierungs-Kriterium für Homogenisierungsaufgaben.

Um welche großen Unterschiede es sich hierbei handelt, vergegenwärtigen die P/V -Werte für die gleiche Mischzeit von $\theta = 30$ s und den Blattrührer im Behälter ohne Strombrecher bei verschiedenen Behälterdurchmessern; Tabelle 3.1.

Mersmann und Mitarb. [363] ermittelten aus $n\theta(Re)$ -Charakteristiken von verschiedenen Rührertypen in verschiedenen Arbeiten jene $(n\theta^*, Re^*)$ -Wertepaare, bei denen die Mischzeit-Charakteristik im turbulenten Strömungsbereich in eine Gerade übergeht und trugen diese Werte, umgerechnet in Π_1 und Π_2 auf, wie in Abb. 3.13 links oben zu sehen ist.

Tabelle 3.1. Zusammenhang zwischen dem P/V [kW/m³] und der Behältergröße D [m] zum Erreichen der gleichen Mischzeit ($\theta = 30$ s) in gleichem Stoffsystem ($\eta = 10^{-1}$ Pa s; $\rho = 1000$ kg/m³). Aus [632]

D [m]	P/V [kW/m ³]
0,5	$1,2 \cdot 10^{-2}$
1,0	$2,0 \cdot 10^{-2}$
1,5	$5,1 \cdot 10^{-2}$
2,0	$1,5 \cdot 10^{-1}$
3,0	$1,2 \cdot 10^0$
4,0	$1,3 \cdot 10^1$

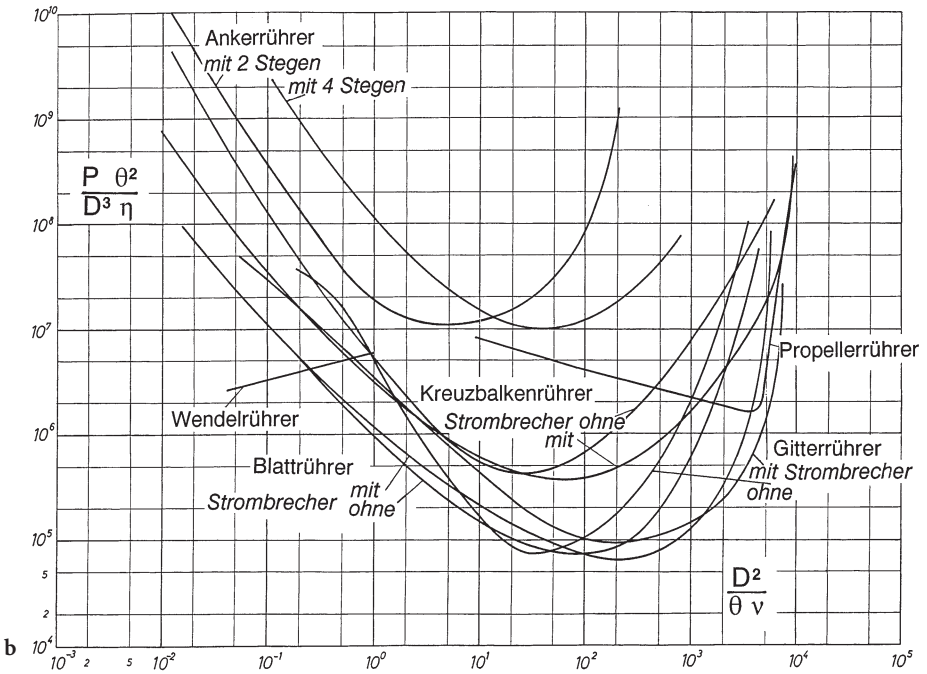
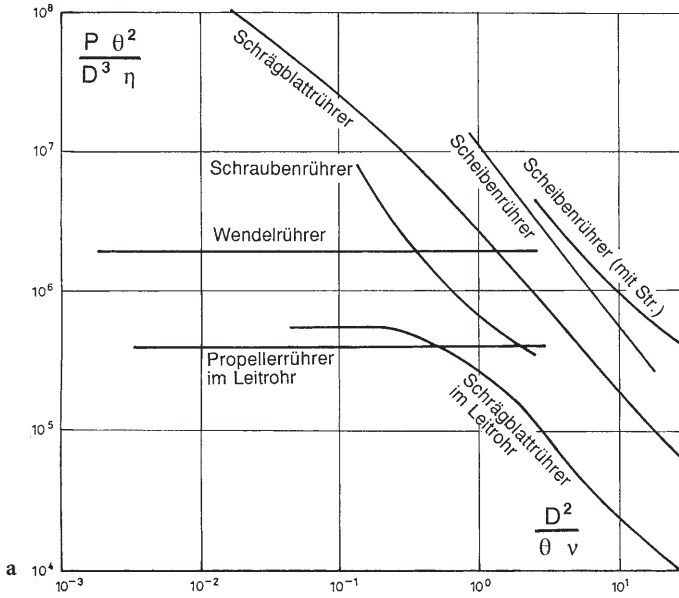
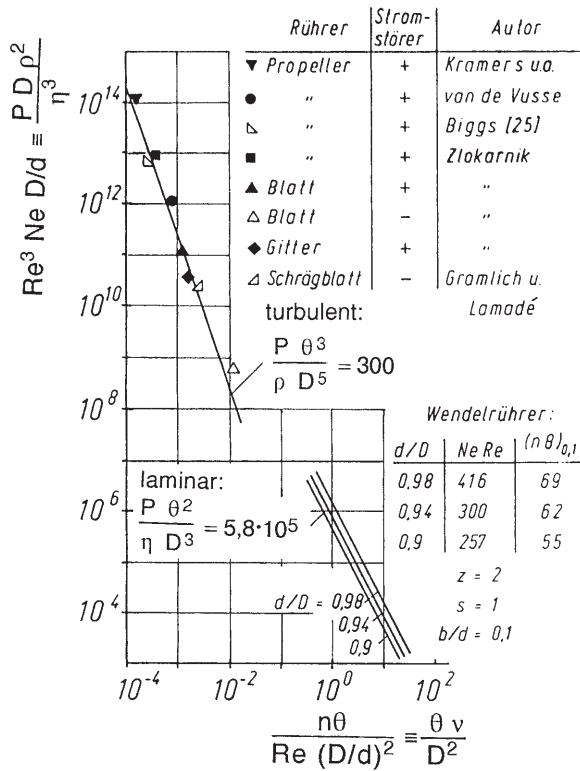


Abb. 3.12 a, b. Überprüfung des Dimensionierungs-Kriteriums $P/V = \text{const}$ für verschiedene Rührertypen und verschiedene Strömungsbedingungen. a aus [220], b aus [611]

Abb. 3.13. Optimale Homogenisier-Bedingungen. Oben links: Verschiedene Rührertypen im turbulenten Strömungsbereich; unten rechts: Wendelrührer bei unterschiedlichen d/D -Verhältnissen im laminaren Strömungsbereich. Aus [363]



Sie fanden den Zusammenhang

$$\Pi_1 = \text{const } \Pi_2^{-3} \quad \text{bzw.} \quad \frac{P\theta^3}{\rho D^5} = 300, \tag{3.31}$$

der zahlenmäßig bis zum damaligen Zeitpunkt von keinem der untersuchten Rührer unterschritten wurde und welcher sich auf folgende Abhängigkeit bringen läßt:

$$(n\theta)^* = 6,7 Ne^{1/3} (D/d)^{5/3}. \tag{3.32}$$

Die Beziehung (3.32) erlaubt es, die Zahl der zur Homogenisierung erforderlichen Rührerumdrehungen aus dem Durchmesser Verhältnis und aus der Newton-Kennzahl im turbulentem Bereich zu errechnen und ist deshalb besonders geeignet, die Wirksamkeit neuer Rührertypen auf ihre Leistungsfähigkeit in diesem Bereich zu prüfen. Sie legt es allerdings auch nahe, insbesondere den Einfluß des Durchmesser Verhältnisses D/d auf Ne und auf $n\theta$ im turbulenten Bereich zu prüfen; vgl. Abb. 2.3 und 2.4.

Aus Gl. (3.31) geht zweierlei unmittelbar hervor:

- a) bei $P/V = \text{const}$ steigt $\theta \sim \mu^{2/3}$ an; ($\mu = D_T/D_M$ - Maßstabsfaktor)
- b) bei $D = \text{const}$ nimmt θ mit $(P/V)^{-1/3}$ ab.