

Wahre mittlere spezifische Bodenzahl als Maßstab für die Rektifizierungswirkung von Füllkörpersäulen

Von Prof. Dr.-Ing. EMIL KIRSCHBAUM, Karlsruhe/Baden

Die theoretische und experimentelle Erforschung der Vorgänge, welche sich in Füllkörpersäulen der Destillier- und Rektifizierertechnik abspielen, hat in der letzten Zeit beachtliche Fortschritte zu verzeichnen. Eine Verarbeitung der gewonnenen Ergebnisse führt zu klar deutbaren Begriffen, über welche im Folgenden berichtet wird und die für die Beurteilung der Wirkung von Füllkörpersäulen und für deren Vorausberechnung von grundsätzlicher Bedeutung sind. Die Ausführungen und Erkenntnisse haben nicht nur in der Rektifizierertechnik, sondern auch überall dort Gültigkeit, wo Füllkörpersäulen Anwendung finden, wie es vor allem bei Absorptionsapparaten der Fall ist.

Der Vergleichsmaßstab und Versuchsergebnisse

Es ist möglich, unter Anwendung der Gesetze des Wärme-¹⁾ oder Stoffaustausches²⁾ die in einer Rektifiziersäule sich abspielenden Vorgänge rechnerisch im einzelnen zu erfassen und die Abmessungen der Apparate selbst vorauszubestimmen. Diese Verfahren haben den Vorteil, daß sie gestatten, den Einfluß der einzelnen Größen auf die Wirkung getrennt erkennen und bei der Berechnung einsetzen zu können. Dem genannten Vorteil steht jedoch der Nachteil der umständlichen Berechnungsweise entgegen. Es hat sich deshalb als zweckmäßig erwiesen, eine andere Rechnungsart anzuwenden, bei welcher ein bestimmter Begriff, nämlich die sogenannte vergleichsmäßige Bodenzahl gebraucht wird, in welcher die Austauschzahl, die Austauschzeit und die Austauschfläche zusammengefaßt enthalten sind. Der Gebrauch dieser Zahl gestaltet die praktische Berechnung von Füllkörpersäulen sehr einfach.

Die in Frage stehende vergleichsmäßige theoretische Bodenzahl n_t , welche auch kurz mit „Bodenwert“ bezeichnet wird, stellt diejenige Anzahl von theoretisch arbeitenden Böden dar, welche zusammen dieselbe Rektifizierungswirkung haben wie eine Füllkörperschicht von gegebener Höhe. Unter theoretisch arbeitenden Rektifizierböden sind solche zu verstehen, auf denen Flüssigkeitsdurchmischung und vollkommener Austausch vorliegen. Der von einem Boden aufsteigende Dampf steht dann im Phasengleichgewicht mit der von demselben Boden ablaufenden Flüssigkeit. Wie der Bodenwert aus den gemessenen Konzentrationen in der Destillierblase eines Rektifizierapparates und im Destillat für beliebige Rücklaufverhältnisse bestimmt wird, ist an anderer Stelle ausführlich erläutert³⁾, und zu einfachen Auswertungskurven zusammengefaßt⁴⁾. Nach diesen Auswertungsweisen ist es nicht notwendig, den Bodenwert auf eine ganze Zahl abzurunden. Er kann vielmehr durch jeden beliebigen zwischen zwei ganzen Zahlen liegenden Wert angegeben werden und stellt als solcher einen Gradmesser für die Güte der Wirkung einer Füllkörpersäule und die Unterlage für die Vorausberechnung der Schichthöhe dar.

In Bild 1 ist die vergleichsmäßige theoretische Bodenzahl über der auf den freien Säulenquerschnitt bezogenen Dampfgeschwindigkeit w_D [m/s] bei verschiedenen Schichthöhen, für einen Säulendurchmesser von 400 mm, Raschigringe aus Porzellan mit 25 mm Abmessung und das Zweistoffgemisch Äthylalkohol-Wasser auf-

getragen. An anderer Stelle sind die Versuchseinrichtung- und -auswertung beschrieben⁵⁾, welche die angegebenen Versuchsergebnisse lieferten. Nach diesen ist gemäß Bild 1 der Bodenwert n_t um so größer, je höher die Füllkörperschicht ist. Jede der Versuchslinien zeigt den für die vorliegende Füllkörperform und -größe kennzeichnenden Verlauf: Bei kleiner Belastung nimmt n_t mit zunehmendem w_D bis zu einem Kleinstwert wegen der Verkleinerung der Austauschzeit ab, um mit weiter wachsender Dampfgeschwindigkeit infolge Zunahme der Austauschzahlen auf einen Höchstwert anzusteigen. Wird die diesem Größtwert entsprechende Belastung überschritten, dann nimmt die Wirkung plötzlich ab, weil im Innern der Säule Flüssigkeitsdurchmischung auftritt. Die erwähnte Höchstwert-Belastung liegt um so höher, je niedriger die Schichthöhe H [m] ist. Dieser Zusammenhang ist damit zu erklären, daß bei höheren Säulen ein höherer Gehalt an Leichterdampf im oberen Teil der Schicht erreicht wird, welcher

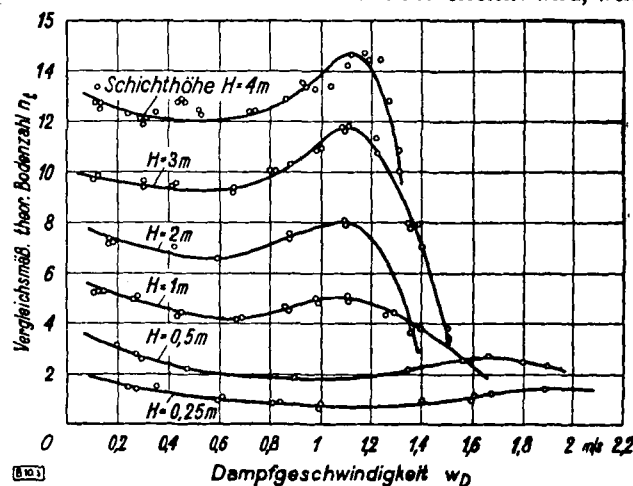


Bild 1

Vergleichsmäßige theoretische Bodenzahl n_t in Abhängigkeit von der Dampfgeschwindigkeit w_D bei verschiedenen Schichthöhen H
Gemisch: Äthylalkohol-Wasser; Alkoholgehalt i. d. Blase rd. 10 Gew.-%
Rücklaufverhältnis $v = \infty$; Porzellan-Raschigringe 25 mm; Säulendurchmesser 400 mm; Flüssigkeitsaufgabe durch Verteilerrad

im vorliegenden Falle eine höhere Dampfwichte zur Folge hat. Je größer diese aber ist, bei einer um so niedrigeren Dampfgeschwindigkeit wird die Flüssigkeit durch den Dampfstrom gestaut.

Beim Vergleich der Linien des Bildes 1 fällt ferner auf, daß der Bodenwert n_t nicht verhältnismäßig der Schichthöhe ist. Bei $w_D = 0,2$ m/s ergibt sich beispielsweise für $H = 1$ m ein n_t von 4,9 und für $H = 2$ m nicht $n_t = 4,9 \times 2 = 9,8$, sondern nur $n_t = 7,2$. Um diese Zusammenhänge klar erkennen zu können, ist in Bild 2 die vergleichsmäßige theoretische Bodenzahl in Abhängigkeit von der Schichthöhe für die beiden Dampfgeschwindigkeiten $w_D = 0,2$ m/s und $w_D = 0,7$ m/s aufgetragen. Die wiedergegebene

¹⁾ Emil Kirschbaum, Verfahren zur Bestimmung der Höhe von Füllkörpersäulen der Destillier- und Rektifizierertechnik, Z. Ver. dtsh. Ing. Beih. Verfahrenstechnik 1943, Nr. 1, 15/20.

²⁾ T. H. Chilton u. A. P. Colburn, Distillation and Absorption in packed Columns, Industr. Engng. Chem. 27, 255/60 [1935].

³⁾ Emil Kirschbaum, Rektifizierungswirkung und Druckverlust in Füllkörpersäulen, Z. Ver. dtsh. Ing. Beih. Verfahrenstechnik 1941, Nr. 3, 53/58.

⁴⁾ Emil Kirschbaum, Einfluß der Rieselmenge auf die Rektifizierungswirkung von Füllkörpersäulen, Z. Ver. dtsh. Ing. Beih. Verfahrenstechnik 1943, Nr. 4, 113/15.

⁵⁾ Emil Kirschbaum, Neuartige Füllkörper und ihre Beurteilung, noch nicht veröffentlicht.

⁶⁾ Emil Kirschbaum, Füllkörpersäulen mit verschiedenen Schichthöhen, diese Ztschr. B. 19, 13/14 [1947].

nen Versuchspunkte wurden dadurch erhalten, daß in Bild 1 bei den Abszissenwerten mit $w_D = 0,2$ m/s und $w_D = 0,7$ m/s senkrechte Gerade gezogen und diese zum Schnitt mit den für verschiedene Schichthöhen geltenden Belastungslinien gebracht wurden. Es fällt auf, daß bis zu $H = 1$ m der Bodenwert stärker mit der Schichthöhe wächst als bei größeren H -Werten. Diese Erscheinung ist in den Fließvorgängen innerhalb der Füllkörperschicht begründet, indem sich die Flüssigkeitsverteilung über den Säulenquerschnitt mit der Rieselhöhe ändert und infolge der Oberflächenspannung der Flüssigkeit sich Bäche bilden. Unter Rieselhöhe ist die senkrechte Wegstrecke zu verstehen, welche die Flüssigkeit von ihrer Auftreffstelle auf die Füllkörper bis zu dem betrachteten Querschnitt zurücklegt. Die Zunahme von n_t mit H kann für $H > 1$ m gemäß Bild 2 für beide Geschwindigkeiten durch zwei Gerade wiedergegeben werden, die sich bei $H = 4,25$ m in einem Punkte schneiden, dem ein n_t von 13 zugeordnet ist.

Die wahre spezifische Bodenzahl

Weil die Neigung der Linien in Bild 2 nicht überall gleich ist, nimmt der Bodenwert mit der Schichthöhe nicht an allen Stellen gleichmäßig zu. Bei näherer Betrachtung zeigt es sich, daß gerade diese Zunahme der vergleichsmäßigen Bodenzahl mit der Schichthöhe einen einfachen Beurteilungsmaßstab abgibt, der zahlenmäßig anzugeben gestattet, wie die Wirkung in einem beliebigen waagerechten Querschnitt der Füllkörpersäule absolut genommen und relativ zu anderen Querschnitten ist. Begrifflich stellt dieser Beurteilungsmaßstab diejenige Anzahl theoretisch arbeitender Böden dar, welche einer 1 m hohen Schicht entspricht. Er werde mit „wahre spezifische Bodenzahl“ benannt und mit n'_s bezeichnet.

Längs der unendlich kleinen Schichthöhe dH habe der Bodenwert einen unendlich kleinen Zuwachs um dn_t . Die wahre spezifische Bodenzahl ist dann durch den Differentialquotienten

$$n'_s = \frac{dn_t}{dH} \quad (1)$$

gegeben. Er kann in einfacher Weise an den Kurven des Bildes 2 abgelesen werden. Zeichnet man nämlich an einem Punkte z. B. im Punkte P der Linie für $w_D = 0,2$ m/s eine Tangente an letztere, so schneidet diese gegen die Waagerechte einen Winkel φ ab. Der Tangens dieses Winkels stellt den Quotienten dn_t/dH dar, so daß in Anbetracht der Gleichung 1 gilt:

$$\operatorname{tg} \varphi = n'_s \quad (2)$$

Liest man $\operatorname{tg} \varphi$ längs der beiden Linien in Bild 2 ab und trägt den Zahlenwert von n'_s über dem jeweiligen Wert von H auf, so erhält man die beiden Linien des Bildes 3. In beiden Fällen liegt die wahre spezifische Bodenzahl bei kleinen Schichthöhen höher als bei großen. Die Ursache dafür, daß in dem Bereich $H < 1$ m Unterschiede in den Kurvenverläufen bestehen, ist darin zu su-

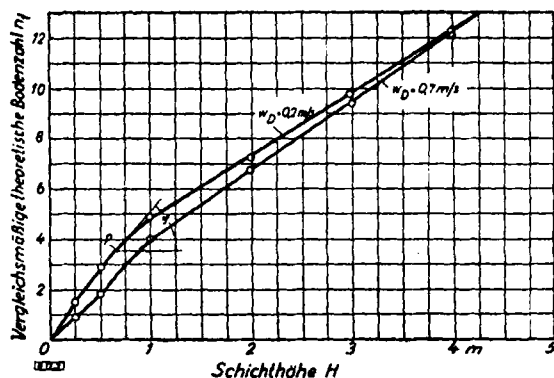


Bild 2

Vergleichsmäßige theoretische Bodenzahl n_t in Abhängigkeit von der Schichthöhe H bei $w_D = 0,7$ m/s und $w_D = 0,2$ m/s

chen, daß bei den Versuchen⁴⁾ als Aufgabevorrichtung ein Verteilerrad benutzt wurde, welches zwei in verschiedener Höhe angebrachte und nicht gleich lange Rohrpaare trug. Bei der kleineren Dampfgeschwindigkeit wurde Flüssigkeit nur durch die unteren bis an den Säulenmantel reichenden zwei gelochten Rohre aufgegeben. Dabei wurde die Flüssigkeit auf die oberste Schicht bereits gleichmäßig verteilt. Bei der größeren Geschwindigkeit waren auch die oberen kürzeren Rohre in Tätigkeit. Durch sie wurde der Rücklauf zum großen Teil in der Säulenmitte den Füllkörpern

zugeleitet, so daß erst bei einer Schichthöhe von $H = 0,75$ m die gleichmäßigste Verteilung und beste Wirkung auftrat.

Um im Zusammenhang mit den zuletzt gemachten Ausführungen das Ergebnis des Bildes 3 auch vorstellungsmäßig klar zu machen, sei folgendes angeführt: Bei der Schichthöhe $H = 0$ liegt die Flüssigkeitsverteilung vor, wie sie das Verteilerrad beim Auftreffen der Flüssigkeit auf die Füllkörperschicht ergibt. Bei den Versuchen mit einer Höhe der gesamten Füllkörperschicht von 0,25 m war die Verteilung nur wenig von der erstgenannten verschieden. Bei Schichthöhen hingegen, die über 1 m liegen, stellt sich im unteren Teil der Säule eine vom oberen Teil stark abweichende Flüssigkeitsverteilung derart ein, daß die Wirkung im unteren Säulenabschnitt sinkt. Um dementsprechend den im vorste-

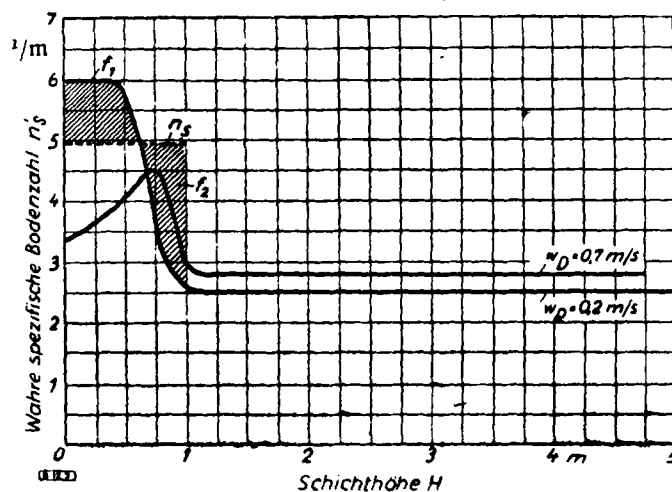


Bild 3

Die wahre spezifische Bodenzahl n'_s in Abhängigkeit von der Schichthöhe H bei $w_D = 0,2$ und $w_D = 0,7$ m/s
Bedingungen nach Bild 1

henden rein mathematisch abgeleiteten Kurven des Bildes 3 eine vorstellungsmäßige Deutung zu geben, denke man sich die als Abszisse aufgetragene Schichthöhe von der oberen Begrenzung der Füllkörpersäule ab gerechnet. Diese Schichthöhe ist dann gleichbedeutend mit der bereits erläuterten Rieselhöhe. Bild 3 zeigt also, wie die wahre spez. Bodenzahl in der Füllkörpersäule von der Auftreffstelle der Flüssigkeit auf die Schicht nach unten und damit mit steigendem H sich verändert. Daß dabei in der Tat der Einfluß der Flüssigkeitsverteilung zum Ausdruck kommt, geht aus einer genaueren Betrachtung der mittleren Dampfkonzentrationen hervor, die bei dem bei den Versuchen gewählten vollkommenen Rücklauf (Rücklaufverhältnis $v = \infty$) den Flüssigkeitskonzentrationen in einem waagerechten Säulenquerschnitt gleich sind beträgt der Alkoholgehalt in der Destillierblase 10 Gew.-%, wie er bei den Versuchen eingehalten wurde, so steigt der Dampf aus dieser mit rd. 52 Gew.-% auf. Er wird bei $H = 0,25$ m auf etwa 80 Gew.-%, bei $H = 1$ m auf etwa 90 Gew.-% und bei $H = 4$ m auf einen Gehalt verstärkt, der unter 95,57 Gew.-% liegt. Die letztgenannte Konzentration stellt bekanntlich diejenige des azeotropischen Punktes dar und könnte theoretisch nur mit unendlich hoher Säule erreicht werden. Die mittleren Konzentrationen in der Säule waren also bei Schichthöhen über 1 m nahezu gleich, während der mittlere Alkoholgehalt selbst bei der bei den Versuchen verwendeten kleinsten Schichthöhe von 0,25 m (s. Bild 1) nur um sehr wenig kleiner ist. Die beiden Linien des Bildes 3 gelten also für eine nahezu gleichbleibende mittlere Konzentration. Ihre Veränderung ist so klein, daß sie den Verlauf der Kurven nicht beeinflussen kann. Dieser Vorteil ergab sich aus den gewählten Versuchsbedingungen, zu dem sich noch derjenige der Anwendbarkeit der Auswertungen für praktische Berechnungen gesellt.

Bei der kleineren Geschwindigkeit von $w_D = 0,2$ m/s nimmt mit zunehmender Schichthöhe die wahre spezifische Bodenzahl von 6 auf 2,8 ab, während sie bei der größeren Belastung mit $w_D = 0,7$ m/s von einem Höchstwerte von 4,5 auf 2,5 sinkt. Daß diese Veränderung innerhalb einer Füllkörperschicht von $H = 0,5$ bis $H = 1$ m nicht durch eine Veränderung der Konzentration bedingt ist, geht daraus hervor, daß letztere tatsächlich für den ganzen Höhenbereich des Bildes 3, wie nachgewiesen wurde, nahezu gleich ist. Ferner beweisen dies Versuche⁵⁾, welche zeigen, daß die

Zusammensetzung des verwendeten Gemisches in den vorliegenden Grenzen keinen nennenswerten Einfluß auf die Rektifizierung hat. Den Hauptausschlag gab vielmehr stets die Verteilung der Flüssigkeit innerhalb der Schicht¹⁾, worauf auch der Verlauf der Kurve für $w_D = 0,7$ m/s in Bild 3 schließen läßt. Weil nämlich der Gehalt an Leichtersiedendem im Gemisch stetig, wenn auch nur sehr wenig mit H wächst, dürfte die erwähnte Kurve nicht zuerst bis zu einem Höchstwert ansteigen, um anschließend abzufallen, wenn tatsächlich der Einfluß der physikalischen Größen merkbar wäre. Das Gleichbleiben von n'_s bei Schichthöhen, die größer sind als 1 m, läßt erkennen, daß in diesem Gebiet sowohl die Schwerpunktslage der Flüssigkeit selbst als auch die Bachbildung einem unveränderlichen Gleichgewichtszustand entsprechen.

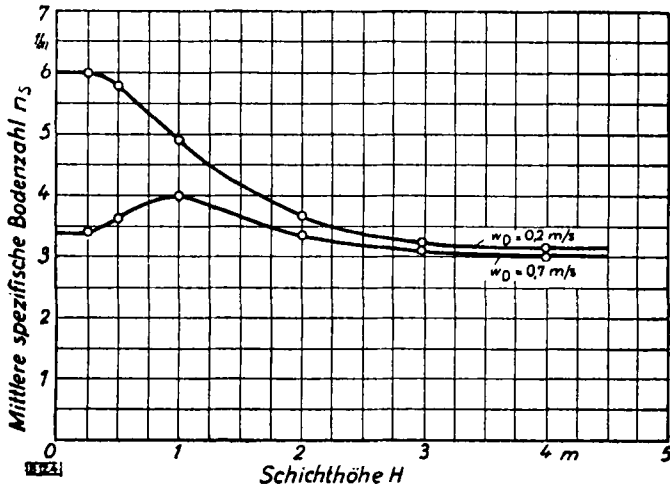


Bild 4
Mittlere spezifische Bodenzahl n_s in Abhängigkeit von der Schichthöhe H für $w_D = 0,2$ m/s und $w_D = 0,7$ m/s
Bedingungen nach Bild 1

Die mittlere spezifische Bodenzahl

Während die spezifische Bodenzahl Aufschluß darüber gibt, wie die Säule in einzelnen Querschnitten wirkt und Schlüsse auf die Fließvorgänge im Innern der Säule zuläßt, ist es notwendig, für praktische Vorausberechnungen einen Mittelwert der wahren spezifischen Bodenzahl einzuführen, welcher für eine bestimmte Säulenhöhe H_1 gilt. Diese mittlere spezifische Bodenzahl n_s entsteht begrifflich aus der wahren spezifischen Bodenzahl n'_s in derselben Weise wie die mittlere spezifische Wärme aus der wahren spezifischen Wärme. Während im letztgenannten Falle ein Integralmittelwert der wahren spezifischen Wärme über einen bestimmten Temperaturbereich gebildet wird, muß im erstgenannten Falle ein Integralmittelwert über einen bestimmten Schichthöhenbereich, nämlich von $H = 0$ bis $H = H_1$ eingeführt werden. Für den genannten Bereich kann danach die mittlere spezifische Bodenzahl angegeben werden zu:

$$n_s = \frac{1}{H_1} \cdot \int_{H=0}^{H=H_1} n'_s \cdot dH \quad (3).$$

Die Mittelwertbildung gestaltet sich auf graphischem Wege besonders einfach. In Bild 3 ist sie für $H = 1$ m und für $w_D = 0,2$ m/s gezeigt. Die waagerechte Gerade, welche durch ihren Ordinatenwert die gesuchte mittlere Bodenzahl n_s zwischen $H = 0$ und $H = 1$ m angibt, muß so gelegt werden, daß die Überschußfläche f_1 gleich ist der Unterschlußfläche f_2 . Auf diese Weise kann für jeden H -Wert die Bodenzahl n_s gefunden werden. Sie ist in Bild 4 für die beiden Geschwindigkeiten $w_D = 0,2$ m/s und $w_D = 0,7$ m/s über der Schichthöhe aufgetragen, wobei Auswertungspunkte für diejenigen Schichthöhen angegeben sind, welche bei den Versuchen gewählt waren. Bei kleinen Schichthöhen ergibt sich ein durch die Flüssigkeitsverteilung bedingter verschiedenartiger Verlauf der beiden Linien, bis sie bei $H = 1$ m die Werte $n_s = 4,9$ und $n_s = 4$ erreichen. Mit weiter steigender Schichthöhe nimmt n_s stetig ab, um sich bei Schichthöhen, die größer sind als 4 m, nur mehr wenig zu ändern. Bei $H = 4$ m läßt sich für die kleine Dampfgeschwindigkeit ein n_s von 3,13 und bei der größeren Belastung ein n_s von 3,06 ablesen. Die beiden Werte sinken bei einer

Schichthöhe von $H = 10$ m auf 2,9 und 2,8. Bei noch größeren Schichthöhen ist die weitere Abnahme von n_s praktisch vernachlässigbar klein.

Die mit Gl. 3 gedeutete mittlere spezifische Bodenzahl kann auch aus den Versuchskurven des Bildes 1 berechnet werden, indem die vergleichsmäßige theoretische Bodenzahl durch den Zahlenwert der Schichthöhe geteilt wird:

$$n_s = \frac{n_t}{H} \quad (4).$$

Aus Bild 1 wird beispielsweise an der Versuchskurve, welche für $H = 4$ m gilt, bei $w_D = 0,2$ m/s ein Bodenwert von $n_t = 12,5$ entnommen. Somit ergibt sich die mittlere spezifische Bodenzahl zu $n_s = 12,5 : 4 = 3,13$. Dieser Wert ist auch aus Bild 4 abzulesen.

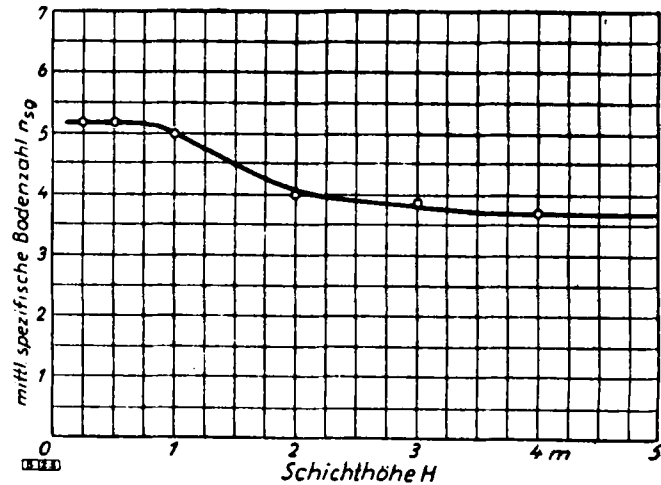


Bild 5
Günstigste spezifische Bodenzahl n_{sg} in Abhängigkeit von der Schichthöhe H

Ermittelt man für den ganzen Höhenbereich und für die beiden gewählten Geschwindigkeiten von $w_D = 0,2$ m/s und $w_D = 0,7$ m/s n_s sowohl nach Gl. 3 aus Bild 3 als auch nach Gl. 4 aus Bild 1, so ergeben sich in beiden Fällen die Ergebnislinien des Bildes 4. Diese Übereinstimmung ist ein Beweis für die Genauigkeit der Versuche, welche die Ergebnisse des Bildes 1 lieferten. Bodenwerte nämlich, welche an einer Versuchslinie des Bildes 1 abgelesen werden, gelten für einen Mittelwert zwischen den Konzentrationen, welche an der unteren und an der oberen Begrenzungsfläche der Füllkörperschicht herrschen. Diese Mittelwerte sind bereits den Schichthöhen zugeordnet, welche in Bild 3 als Abszisse aufgetragen sind. Für einen Mittelwert dieser Mittelwerte gelten jedoch diejenigen mittleren spezifischen Bodenzahlen, welche als Integral-Durchschnittswert über einen bestimmten Schichthöhenbereich graphisch aus Bild 3 ermittelt werden.

Wenn keine Belastungsschwankungen vorliegen, ist für die Vorausberechnung von Füllkörpersäulen diejenige mittlere spezifische Bodenzahl n_{sg} von besonderer Bedeutung, welcher ein Höchstwert der Wirkung in Abhängigkeit von der Dampfgeschwindigkeit entspricht. Dieser Höchstwert liegt nach Bild 1 bei Schichthöhen über 1 m bei $w_D = 1,1$ m/s. Bei kleineren Schichthöhen entspricht der Höchstwert von n_t einer Dampfgeschwindigkeit, welche größer ist als 1,1 m/s. Er liegt für $H = 0,5$ m bei $w_D = 1,7$ m/s. Die erwähnte mittlere spezifische Bodenzahl n_{sg} ist in Bild 5 über der Schichthöhe aufgetragen. Sie nimmt mit steigender Schichthöhe stetig bis zu einem nahezu gleichbleibendem Werte ab. Bei $H = 0,5$ m ist $n_{sg} = 5,2$, bei $H = 1$ m wird $n_{sg} = 5$ und bei $H = 4$ m ist n_{sg} auf 3,7 gesunken. Für $H = 10$ m kann n_{sg} 3,5 gesetzt werden.

Zusammenfassung

Die vergleichsmäßige theoretische Bodenzahl, welche auch Bodenwert genannt wird und in der alle maßgebenden Einflüsse zusammengefaßt enthalten sind, eignet sich besonders für die Beurteilung und Vorausberechnung von Rektifizier-Füllkörpersäulen. Aus gemessenen Bodenwerten, welche für verschiedene Säulenhöhen gelten, wird der Begriff der wahren spezifischen Bodenzahl und daraus derjenige der mittleren spezifischen Bodenzahl abgeleitet. Ersterer verhält sich zu letzterer wie die wahre zu der mittleren spezifischen Wärme.

[B 12]

Eingeg. 4. Nov. 1946