

## Verweilzeitverteilung

Da experimentelle Bestimmungen der Verweilzeitverteilungen selbst bei komplexen verfahrenstechnischen Anlagen relativ einfach möglich sind, werden diese Messungen recht häufig zur Prozesscharakterisierung herangezogen. Um jedoch ein Maximum an Informationen aus den so gewinnbaren Messkurven zu erhalten, sind eine sehr große Erfahrung oder begleitende theoretische Untersuchungen notwendig, die eine richtige Interpretation der erhaltenen Kurven ermöglichen.

Da die Verhältnisse bei realen Ein- und Zweiphasenströmungen infolge der Wechselwirkung zwischen den Phasen und wegen disperser Effekte stark von den für die theoretischen Grenzfälle angebbaren analytischen Gleichungen für die Verweilzeitverteilung abweichen können, wurden systematische Untersuchungen zur Entwicklung von Verweilzeitverteilungen in Abhängigkeit von den Einflussgrößen durchgeführt und numerische Modelle eingesetzt. Diese basieren auf dem Modell **ZEMP** (Zellenmodell mit Platzwechselwahrscheinlichkeit) und ermöglichen gegenüber anderen numerischen Verfahren geringere Rechenzeiten.

Halbempirische Modelle für die Verweilzeitverteilung ergänzen die Möglichkeiten zur Nachbildung gemessener Kurven. Es wurden Diagramme zur Bestimmung der Parameter aufgestellt und Validierungsrechnungen durchgeführt.

Inzwischen wurden die Betrachtungen auf mehrphasige Systeme ausgedehnt. Dazu musste die Relativgeschwindigkeit der Partikel in das Programm eingearbeitet werden.

### **TU Chemnitz**

Professur Technische Thermodynamik

Ansprechpartner Dr.-Ing. J.-H. Ham

Telefon: 0371/ 531 2355

Telefax: 0371/ 531 2349

## Halbempirische Modellgleichungen für die Verweilzeitverteilungen

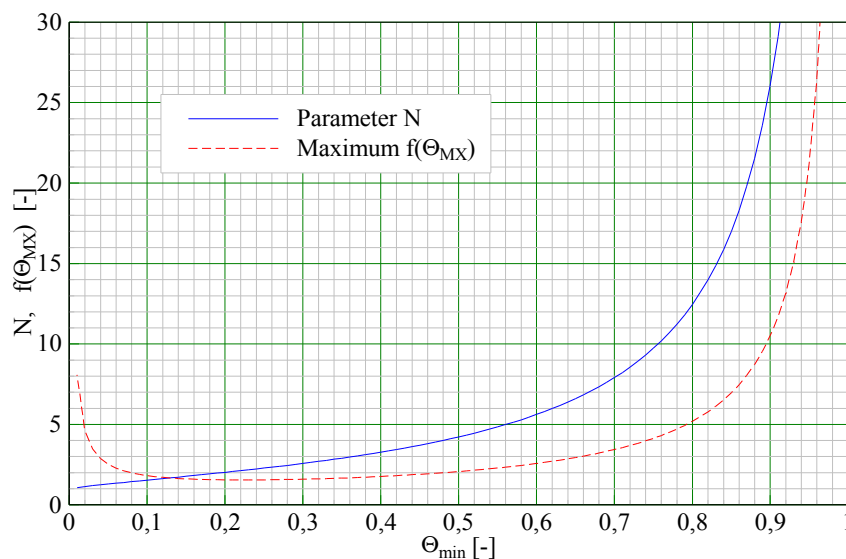
**Tabelle 1:** Halbempirische Beziehungen für die Verweilzeitverteilungsfunktion

Modell	$t_{\max}$	$t_k$	$F(t), t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$	$f(t), t_{\min} \leq t \leq t_{\max}$
<b>A</b>	$\infty$	$t_{\min}$	$\left(1 - \frac{t_k^N}{t^N}\right)^8$	$\frac{8Nt_k^N}{t^{N+1}} \left(1 - \frac{t_k^N}{t^N}\right)^7$
<b>B</b>	$t_{\max}$	$\frac{t_{\max} \cdot t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}$	$\left[1 - \frac{t_k^N}{t^N} \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^N\right]^8$	$\frac{8Nt_k^N}{t^{N+1}} \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^{N-1} \left[1 - \frac{t_k^N}{t^N} \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^N\right]^7$
<b>C</b>	$t_{\max}$	$\frac{t_{\max} \cdot t_{\min}}{t_{\max} - t_{\min}}$	$\left[1 - \frac{t_k^N}{t^N} \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^N\right]^M$	$\frac{MNt_k^N}{t^{N+1}} \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^{N-1} \left[1 - \frac{t_k^N}{t^N} \left(1 - \frac{t}{t_{\max}}\right)^N\right]^{M-1}$

Die halbempirischen Modelle *A*, *B* und *C* können wie auch andere, in der Literatur enthaltene Beziehungen nicht den gesamten Bereich bekannter Verweilzeitverteilungen erfassen. Im Gegensatz zum Dispersionsmodell handelt es sich um schiefe Verteilungen. Ihre Stärken entwickeln sie bei leicht schiefen Verteilungen. Sie erfassen den Gesamtverlauf in einem größeren Bereich genauer, als das durch bisherige Modelle möglich ist.

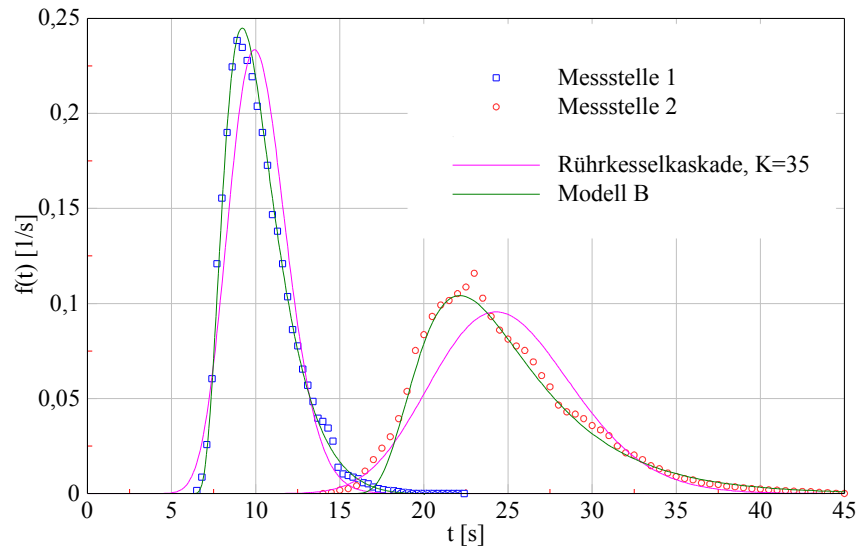
Das einfachste Modell *A* ist vorrangig für einphasige Systeme geeignet, Modell *B* und Modell *C* sind für ein- und mehrphasige Systeme anwendbar. Formal geht Modell *B* für sehr große  $t_{\max}$  in Modell *A* über. Für das Modell *C* wurde der zweite Exponent  $M$  eingefügt und eröffnet damit weitere Anpassungsmöglichkeiten.

Die große Flexibilität des Modells *C* zeigt sich auch dadurch, dass einige theoretisch ableitbare Verweilzeitverteilungen problemlos nachbildbar sind. Parameterbestimmung der Modelle erfolgt je nach dem Modell rechnerisch oder grafisch.



**Bild 1:** Parameter  $N$  des Modells *B* in Abhängigkeit von  $\theta_{\min}$  und  $\theta_{\max}$

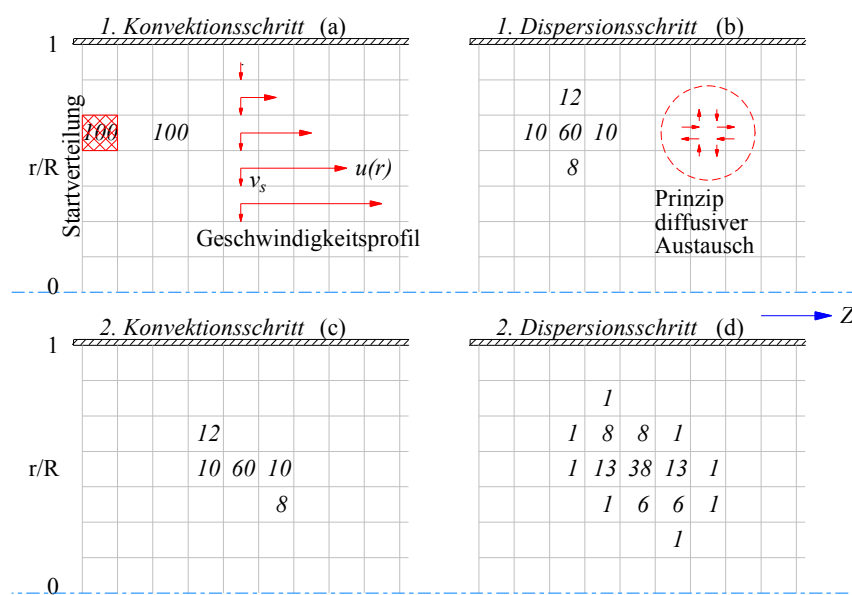
Die Modelle *A*, *B* und *C* wurden mit in der Literatur veröffentlichten Messwerten für unterschiedliche Fälle getestet, wobei zum Vergleich auch andere Modelle herangezogen wurden. In Bild 2 stellt ein Beispiel von der mit dem empirischen Modell nachrechneten Verweilzeitverteilung für zweiphasige Strömung dar.



**Bild 2:** Differentielle Verweilzeitverteilungen von Partikeln im Couette-Taylor-Apparat

## Numerische Verweilzeitverteilungen (ZEMP)

Mit dem Modell **ZEMP** können für Partikel die resultierenden Vorgänge des konvektiven Transports und der Dispersion bei vorgegebenem Geschwindigkeitsprofil und bekanntem Dispersionsverhalten erfasst werden. Für jeden Zeitschritt werden die Konvektion und die Dispersion abwechselnd berechnet. Im Konvektionsschritt werden die Partikel entsprechend den örtlich vorliegenden Geschwindigkeiten (Berücksichtigung der Fluidgeschwindigkeit und der sich ergebenden Relativgeschwindigkeit) im vorgegebenen Gitternetz verschoben. Im daran anschließenden Dispersionsschritt werden die Wechselwirkungen mit den direkt angrenzenden Nachbarzellen berücksichtigt, wobei die Anzahl und die Masse der Partikel erhalten bleibt.

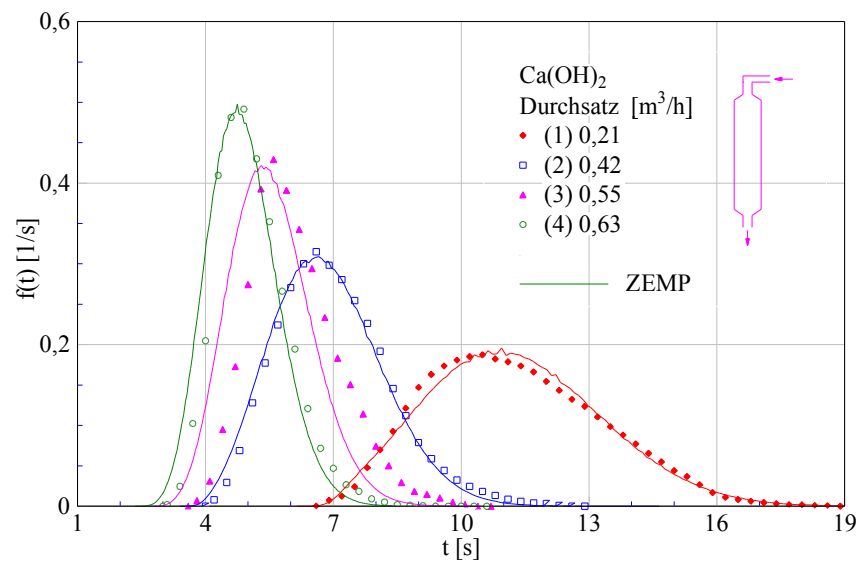


**Bild 1:** Schematische Darstellung des Berechnungsablaufes für den Konvektions- und Dispersionsschritt; a) in einer Zelle starten die Partikel (die Pfeillänge veranschaulicht das Geschwindigkeitsprofil als Vielfaches der Zellenabmessungen pro Zeitschritt); b) diffusiver Austausch mit den Nachbarzellen (Berücksichtigung von Flächenverhältnis); c) Konvektionsschritt; d) Dispersionsschritt

Um die Dispersionswirkungen in dem vorgegebenen Gitternetz richtig nachzubilden, müssen bei der Lösung bestimmte Größenverhältnisse zwischen der Orts- und der Zeitschrittweite eingehalten werden.

$$\frac{\Delta x}{\sqrt{2\beta D \Delta t}} \approx 1,3 \text{ für } \beta = 2 \text{ und } 1,5 \sim 1,6 \text{ für } \beta = 1$$

Bei dem dadurch naturgemäß sehr kleinem  $\Delta t$  ist die Anzahl der berechneten Punkte für die Verweilzeitverteilung sehr groß. Durch die Diskretisierung treten Schwankungen beim Austrittssignal auf, die durch die Auswertung mit einer größeren Zeitdifferenz infolge der dabei auftretenden Mittelung gedämpft werden können. Im Bild 2 wurden Messwerte für die Verweilzeitverteilungen von  $\text{Ca(OH)}_2$ -Partikeln mit dem Modell ZEMP nachgebildet.



**Bild 2:** Differentielle Verweilzeitverteilungen von  $\text{Ca(OH)}_2$  - Partikeln der Größe =  $11,5 \mu\text{m}$  im senkrechten Rohr