

Abbildung 15: Rührkessel in Standardkonfiguration.

6 Simulation von Einfachrührersystemen

6.1 Pulsexperimente im Standardrührkessel

Inhalt dieses Kapitels sind Untersuchungen zu Pulsexperimenten in einem Rührkesselreaktor in der sogenannten Standardkonfiguration (Abb. 15). Der zylindrische Behälter ist mit vier Strombrechern ausgestattet und die sechsbliättrige Rushton-Turbine ist in der Mitte zwischen Behälterboden und Flüssigkeitsoberfläche eingebaut. Der Rührerdurchmesser beträgt ein Drittel des Tankdurchmessers.

Rührkesselreaktoren in Standardkonfiguration werden häufig im Rahmen experimenteller Untersuchungen der Fluidodynamik verwendet, wobei allerdings Unterschiede in geometrischen Details und messtechnischer Vorgehensweise oft eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse verhindern. Häufig sind auch Konfigurationen mit in Richtung des Behälterbodens versetztem Rührer, wie sie in begasten Rührkesselreaktoren üblich sind. Die Abmessungen des hier simulierten Rührkessels (Abb. 15) entsprechen der von Costes und Couderc [28] in ihren Experimenten zur Messung der Hauptgeschwindigkeiten mittels Laser-Doppler-Anemometrie verwendeten Konfiguration. Jenne [59] führt detaillierte Berechnungen der einphasigen Strömungsverhältnisse in dieser Rührkesselkonfiguration durch, auf deren Ergebnissen auch die im Anschluss diskutierten Simulationen von Pulsexperimenten beruhen. Die Abmessungen sind in Tab. 6 zusammengestellt.

H	T	D	B	C
0,44 m	0,44 m	$T/3 = 0,147$ m	$T/10 = 0,044$ m	$H/2 = 0,22$ m

Tabelle 6: Abmessungen des untersuchten Rührkesselreaktors.

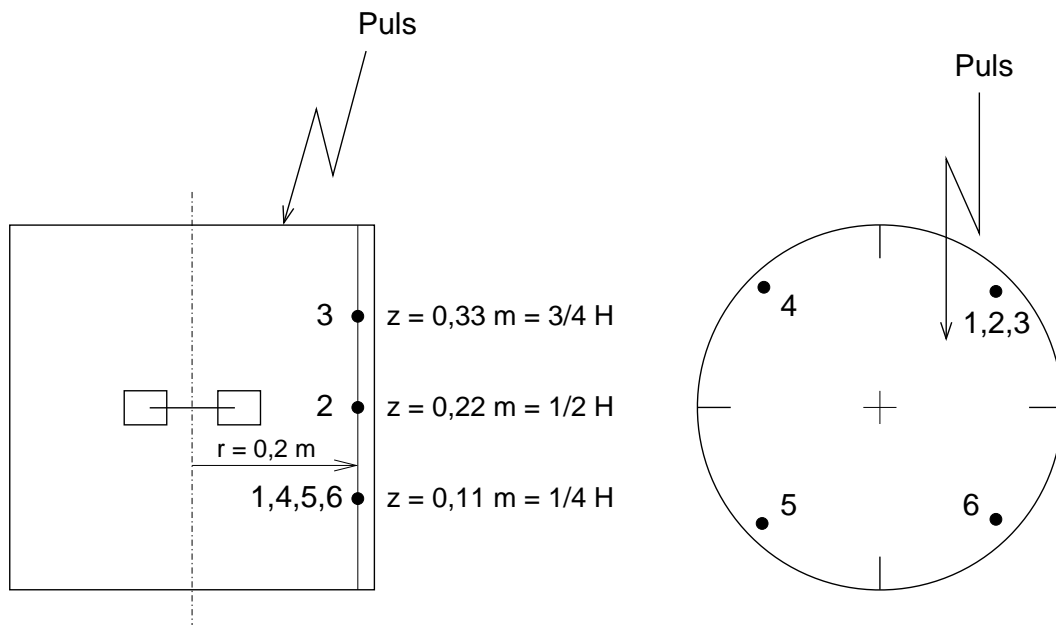


Abbildung 16: Ort von Puls und Pulsantworten beim Puls auf die Oberfläche.

Zunächst wird ein einfaches Pulsexperiment betrachtet, wie es auch experimentell häufig zur Bestimmung der Mischzeit durchgeführt wird. Der Spurstoffpuls wird dabei bei einem Radius von $r = 0,11$ m genau zwischen zwei Strombrechern auf die Flüssigkeitsoberfläche aufgegeben. Bei der Betrachtung der Pulsantworten ist der Einfluss des Messorts auf die simulierte Pulsantwort von Interesse. Es werden daher die Pulsantworten auf drei verschiedenen Höhen sowie auf einer Höhe von $z = 0,11$ m, also genau zwischen Rührer und Behälterboden, an vier verschiedenen Umfangspositionen betrachtet. Der Pulsort und die Lage der simuliertem Antwortsignale ist in Abb. 16 eingezeichnet. Zum besseren Verständnis der im Folgenden dargestellten Ergebnisse der Simulation von Pulsexperimenten zeigt Abb. 17 das Strömungsfeld im untersuchten Rührkesselreaktor.

Man erkennt die großräumigen Wirbel ober- und unterhalb des Rührers sowie die Ausbildung kleiner Wirbel hinter den Strombrechern. Zu beachten ist der unterschiedliche Abbildungsmaßstab der beiden Geschwindigkeitsfelder. Das Geschwindigkeitsniveau in Umfangsrichtung ist niedriger als in radial-axialer Richtung.

In der dreidimensionalen Simulation mit dem Programmpaket *UG* wird der Puls durch die Vorgabe einer entsprechenden Startkonzentration am Pulsort modelliert. Die Rührerdrehzahl beträgt

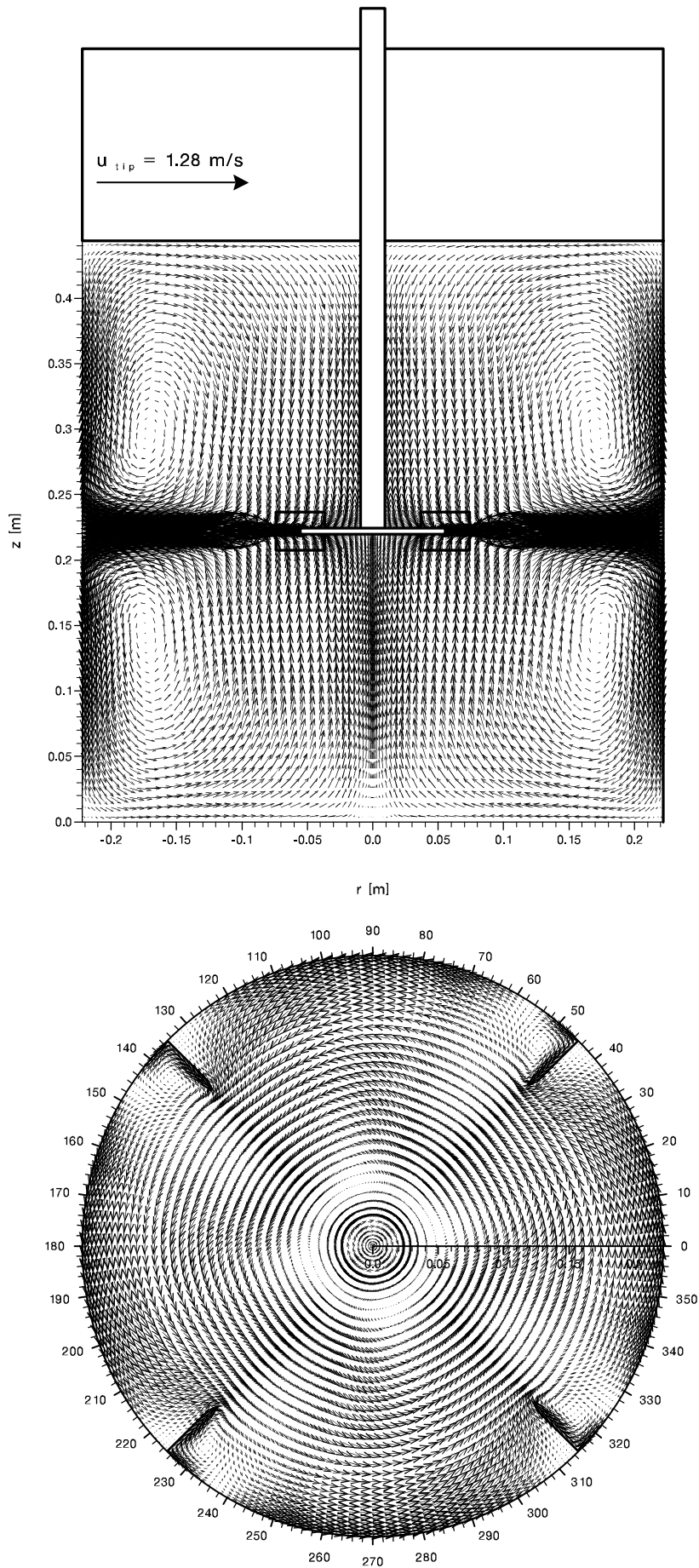


Abbildung 17: Oben Geschwindigkeitsfeld zwischen zwei Strombrechern, unten Geschwindigkeitsfeld auf Höhe des Wirbelkerns (aus Jenne [59]).

Ort (Abb. 16)	1	2	3	4	5	6
Mischzeit $t_{m,95}$ [s]	28,6	28,0	28,6	30,8	28,6	30,8

Tabelle 7: Simulierte Mischzeiten aus den Pulsantworten an unterschiedlichen Orten. Puls auf die Oberfläche.

$n = 165$ 1/min. Abb. 18 und 19 zeigen die Entwicklung der Spurstoffverteilung nach dem Puls. Die Abbildungen zeigen jeweils von links nach rechts zwei radial-axiale Schnitte (Pulsebene und Ebene senkrecht zur Pulsebene) und drei Querschnitte durch den Rührkessel auf Höhen von $z = 0,33$ m, $0,22$ m und $0,11$ m.

Es ist gut zu erkennen, wie der Spurstoff zunächst von der Strömung erfasst wird, die Rührzone durchläuft und an der Aussenwand in zwei Anteile getrennt wird, von denen der Größere oberhalb des Rührers verbleibt. Nach ca. drei Sekunden ist die erste radial-axiale Zirkulation bereits abgeschlossen. Zu diesem Zeitpunkt hat sich das Zentrum der Spurstoffwolke jedoch erst um weniger als 90 Grad in Umfangsrichtung bewegt. Für den Vermischungsvorgang ist also insbesondere der Stoffaustausch in Umfangsrichtung von Bedeutung, und selbst in der Rührerebene (jeweils der mittlere der drei Querschnitte) verschwinden die Konzentrationsunterschiede in dieser Richtung nicht. Dies verdeutlichen auch die in den Abb. 20 und 21 dargestellten simulierten Pulsantworten.

Aus den beiden ersten Spitzen im Antwortsignal 1 an der Umfangsposition des Pulses kann die radial-axiale Zirkulationszeit abgelesen werden. Sie beträgt ca. drei Sekunden. Aufgrund des Transports in Umfangsrichtung wird an der um 90 Grad in Strömungsrichtung versetzten Umfangsposition 4 erst beim zweiten Maximum der höchste Wert der Konzentration erreicht. An den Positionen 5 und 6 sind die von der radial-axialen Zirkulation verursachten Maxima kaum noch erkennbar. Wenn die Spurstoffwolke diese Umfangspositionen erreicht, ist die radial-axiale Vermischung nahezu abgeschlossen. Die an Position 5 nach 8,2 s und an Position 6 nach 12,6 s vorliegenden Maxima sind auf die noch nicht abgeschlossene Vermischung in Umfangsrichtung zurückzuführen (s. auch die unteren beiden Bilderreihen in Abb. 19). Die Zirkulationszeit in Umfangsrichtung beträgt ca. 17 s.

Die Pulsantworten auf unterschiedlichen Höhen im Reaktor unterscheiden sich lediglich in der Höhe des ersten Maximums (Abb. 21), da der größere Teil des Spurstoffs in der oberen Reaktorhälfte bleibt und dort für das ausgeprägtere Maximum sorgt. Alle drei Kurven münden aber für größere Zeiten in einen sehr ähnlichen Verlauf mit dem gut sichtbaren Maximum nach Ablauf der Zirkulationszeit in Umfangsrichtung.

In Tab. 7 sind die aus den simulierten Pulsantworten an unterschiedlichen Orten ermittelten Mischzeiten $t_{m,95}$ zusammengefasst.

Auf die resultierenden Mischzeiten hat der Ort des Antwortsignals keinen großen Einfluss. Sie

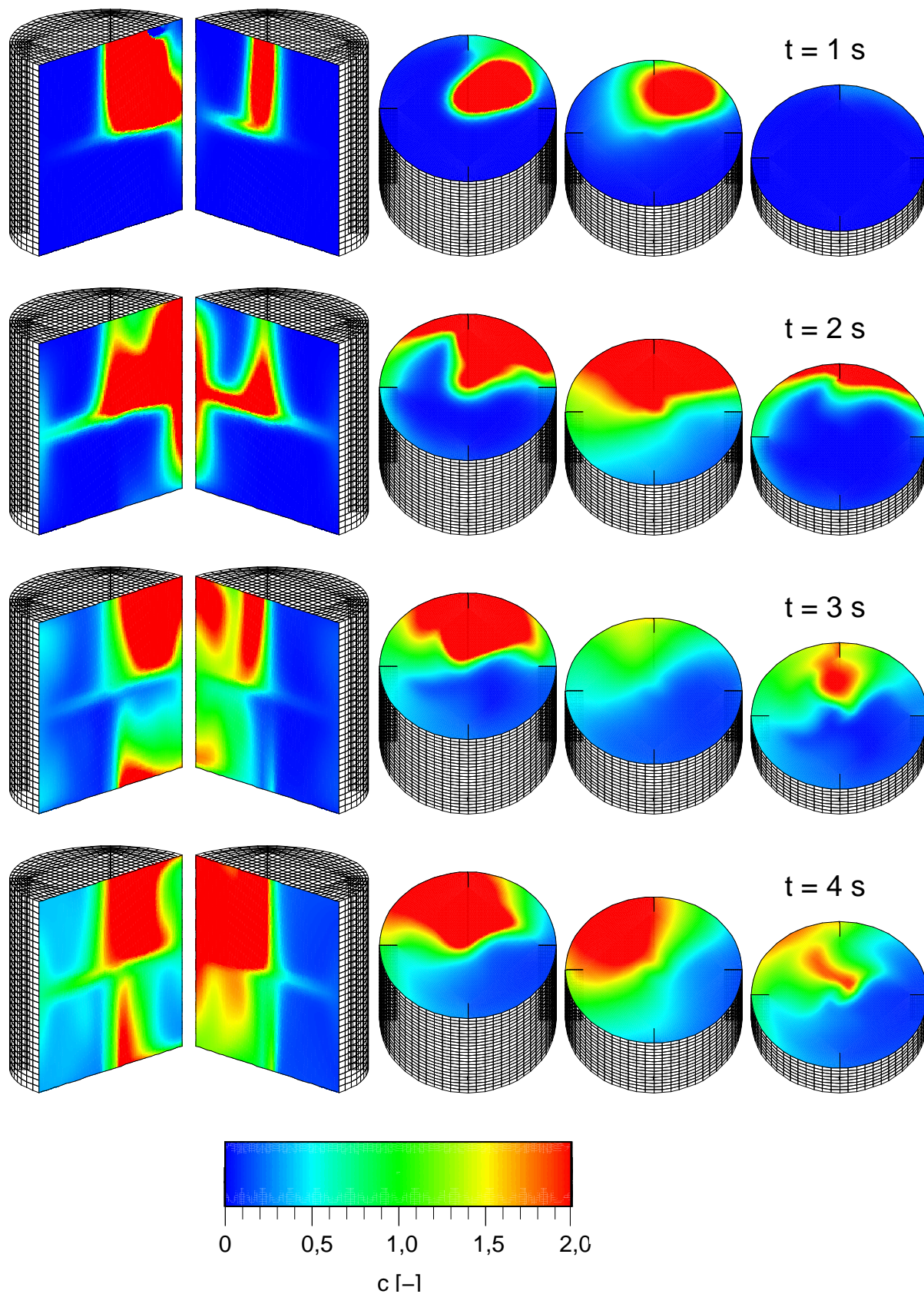


Abbildung 18: Entwicklung der Spurstoffverteilung nach einem Puls auf die Flüssigkeitsoberfläche 1 bis 4 Sekunden nach dem Puls.

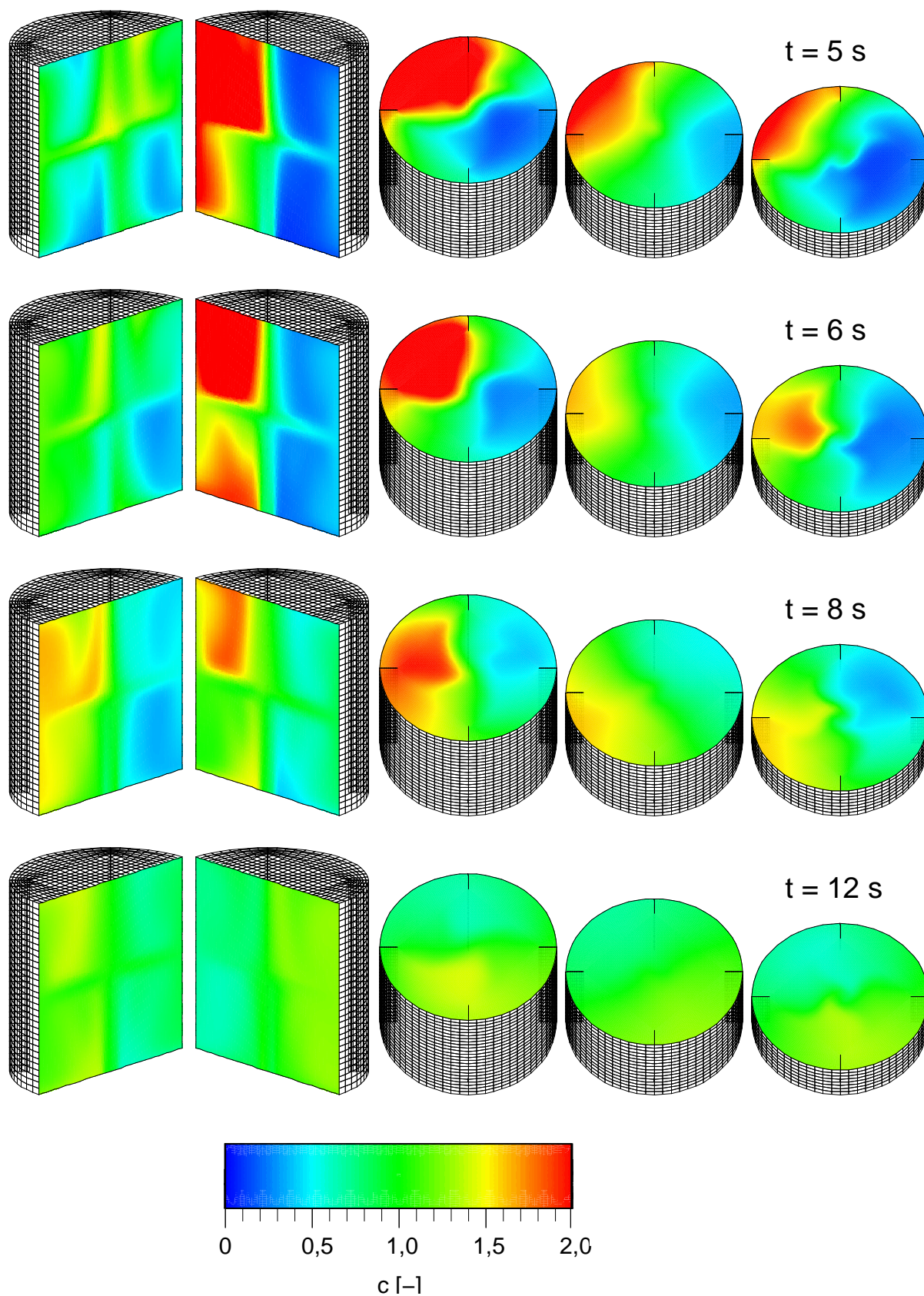


Abbildung 19: Entwicklung der Spurstoffverteilung nach einem Puls auf die Flüssigkeitsoberfläche 5 bis 12 Sekunden nach dem Puls.

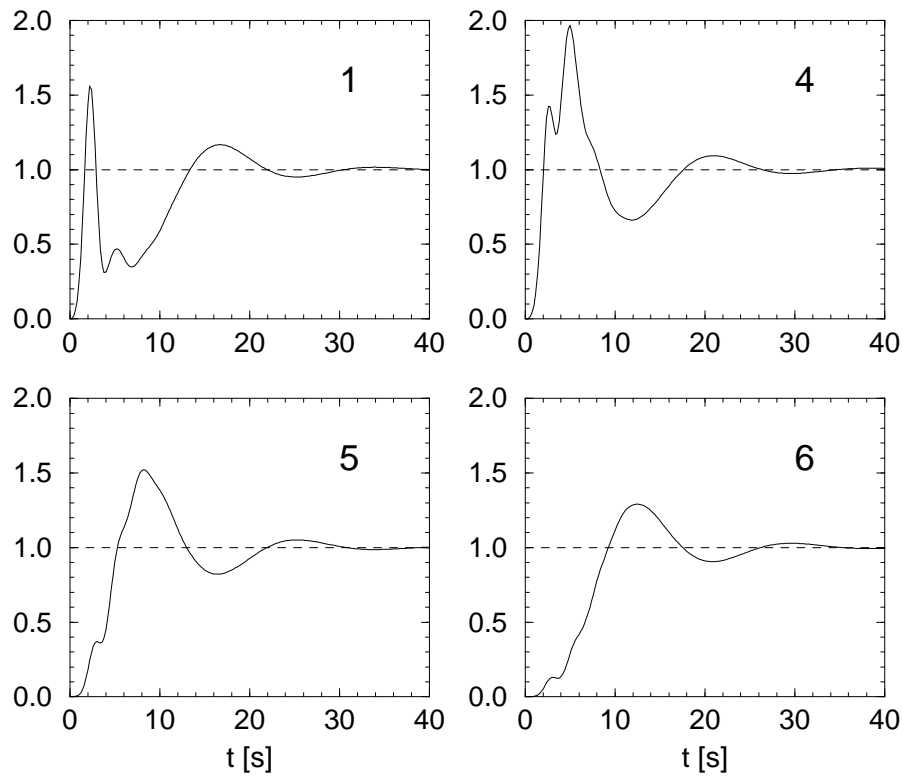


Abbildung 20: Pulsantwort an unterschiedlichen Umfangspositionen bei $z = 0,11$ m, Puls auf die Oberfläche.

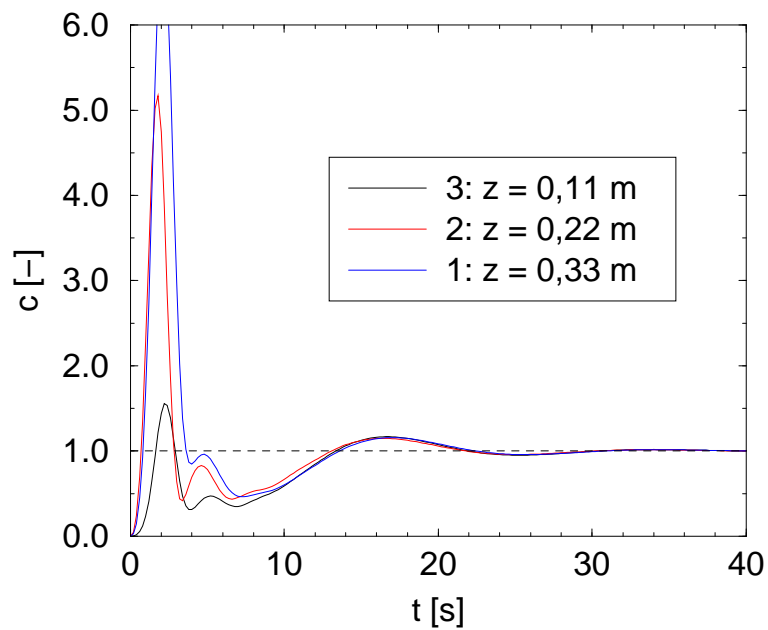


Abbildung 21: Pulsantwort in unterschiedlichen Höhen, Puls auf die Oberfläche.

liegen zwischen 28,6 und 30,8 Sekunden, womit sich die dimensionslose Mischzeit $n t_m = 81,7$ ergibt. Die relativ großen Mischzeiten resultieren nur aus der vergleichsweise langsamen Vermischung in Umfangsrichtung (s. auch [78]). Eine Simulation des selben Pulsexperiments auf einem axialsymmetrisch approximierten Strömungsfeld ergibt am Messort 1 eine Mischzeit von lediglich $t_{m,95} = 10,0$ s. Entscheidenden Einfluss auf die Bestimmung der Mischzeit hat also, ob der Spurstoff wirklich nur punktuell zugegeben wird, oder ob er bereits aufgrund der Injektionsmethode eine Vermischung in Umfangsrichtung aufweist (s. Kap. 6.2). Der Vergleich mit experimentellen Ergebnissen aus der Literatur ist schwierig, da die angegebenen Korrelationen üblicherweise nicht Methode und Ort der Spurstoffaufgabe berücksichtigen bzw. sie überhaupt nicht angegeben wird. Darüberhinaus ist auch der verlangte Homogenitätsgrad von Bedeutung. Beispielsweise ergäbe sich am Messpunkt 5 für einen von 97,5 % auf 95 % verringerten Homogenitätsgrad mit $t_{m,90} = 24,0$ s eine deutlich kleinere Mischzeit. Stellvertretend für eine Vielzahl von Korrelationen für die Mischzeit in Rührkesselreaktoren mit Rushton-Turbinen in Standardkonfiguration seien die Folgenden herausgegriffen. Alle beruhen auf der Annahme, dass für einen bestimmten Rührer in einer fest stehenden Kesselgeometrie die dimensionslose Mischzeit $n t_m$ unter turbulenten Strömungsbedingungen eine Konstante ist. Es werden jedoch unterschiedliche Abhängigkeiten von geometrischen Verhältnissen und/oder dem Leistungseintrag angegeben. Es ist jeweils die für den hier untersuchten Rührkesselreaktor berechnete dimensionslose Mischzeit angegeben.

Prochazka und Landau [101]:

$$n t_m = 0,905 \left(\frac{T}{D} \right)^{2,57} \log \left(\frac{2}{\Delta c} \right) = 32,0 \quad (78)$$

Shiue und Wong [120]:

$$n t_m = 5,01 \left(\frac{T}{D} \right)^{2,4} = 70,0 \quad (79)$$

Kossen und Oosterhuis [67]:

$$n t_m = \frac{1,54 V}{D^3} = 32,7 \quad (80)$$

Kawase und Moo-Young [64]:

$$n t_m = 42,7 \quad (81)$$

Lunden et al. [78]:

$$n t_m = 35 - 55 \quad (82)$$

Nienow [94]:

$$n t_m = 5,3 (Ne)^{-1/3} \left(\frac{D}{T} \right)^{-2} = 27,9 \quad (83)$$

Auffallend ist der weite Bereich, in dem die berechneten Werte streuen. Die Mischzeit aus der Simulation liegt allerdings aufgrund des Einflusses der Vermischung in Umfangsrichtung am oberen

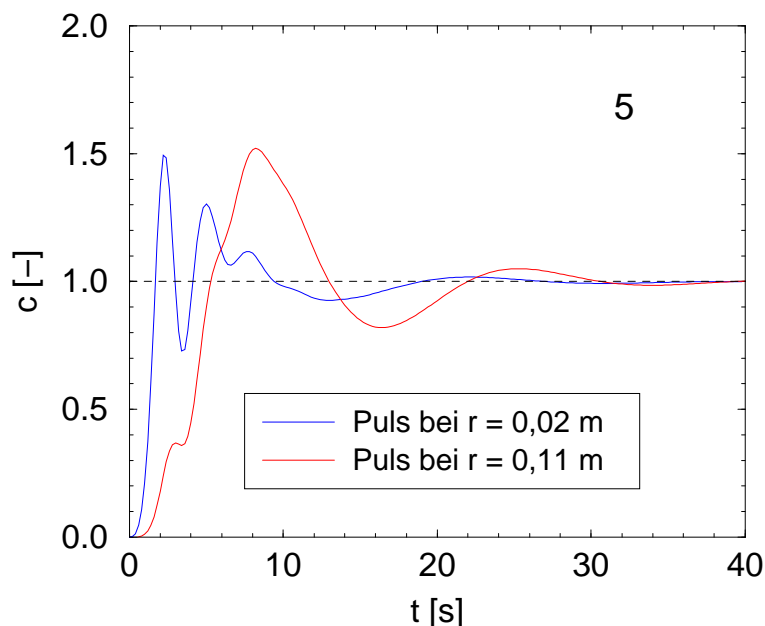


Abbildung 22: Pulsantwort am Messort 5 bei unterschiedlichem Radius des Pulsortes. Puls auf die Oberfläche.

Rand des Spektrums aus den Korrelationen. Den Einfluss der Vorvermischung in Umfangsrichtung aufgrund der Wahl des Pulsortes verdeutlicht die Darstellung in Abb. 22. Gezeigt ist wiederum die Pulsantwort am Messort 5, allerdings zusätzlich zu der Antwortkurve aus Abb. 20 ein Antwortsignal auf einen Puls auf die Oberfläche in unmittelbarer Nähe der Rührerwelle bei $r = 0,02$ m.

Die Aufgabe des Spurstoffs nahe der Rührerwelle führt von vornherein zu einer deutlich besseren Vermischung in Umfangsrichtung. Die Amplituden der Schwingungen in Folge des Stofftransports in Umfangsrichtung sind deutlich reduziert, so dass bereits die Amplitude der Schwingung nach ca. 22 s nicht mehr den für $t_{m,95}$ erforderlichen Bereich verlässt. Die Schwingungen des Antwortsignals mit der Periode der Zirkulationszeit in radial-axialer Richtung treten dafür sehr viel deutlicher hervor. Die Mischzeit aus diesem Antwortsignal liegt mit 17,6 s ($n t_m = 48,4$) im Bereich der oben angegebenen experimentellen Korrelationen.

6.1.1 Gitterabhängigkeit der Lösung

In den Simulation mit dreidimensionaler Ortsdiskretisierung, für die ja eine einfache Upwind-Methode zur Anwendung kommt, stellt sich immer auch die Frage nach der notwendigen Diskretisierungsfeinheit für eine gitterunabhängige Lösung. Abb. 23 zeigt den Verlauf der Pulsantwort am Messort 5 in Abhängigkeit von der Anzahl der für die Ortsdiskretisierung verwendeten finiten Volumen.

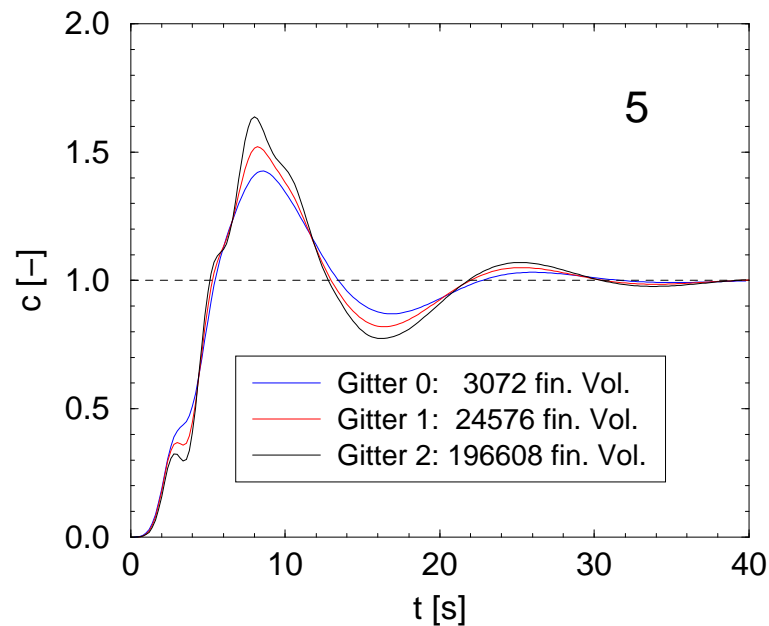


Abbildung 23: Gitterabhängigkeit der simulierten Pulsantwort am Messort 5. Puls auf die Oberfläche.

Auch auf dem groben Gitter mit nur 3072 finiten Volumen wird bereits ein qualitativ richtiges Antwortsignal berechnet. Kleinere Details wie die erste Spitze im ansteigenden Signal nach ca. vier Sekunden können allerdings nicht mehr ausreichend aufgelöst werden, alle Amplituden sind aufgrund numerischer Dispersion verringert. Auf die Berechnung der Mischzeit hat das allerdings keine gravierenden Auswirkungen. Auf dem groben Gitter ergibt sich $t_{m,95} = 28,0$ s im Vergleich zu den 28,6 s auf dem feinen Gitter. Der Abstand zwischen den auf mittlerem und feinem Gitter simulierten Pulsantworten deutet darauf hin, dass auch auf dem feinen Gitter noch keine vollständig gitterunabhängige Lösung berechnet wird. Alle wesentlichen Effekte werden jedoch schon auf dem mittleren Gitter mit ausreichender Auflösung erfasst.

6.2 Pulsexperiment von Khang und Levenspiel

Khang und Levenspiel [66] führen Pulsexperimente mit der Zielsetzung durch, das Mischverhalten eines Rührkesselreaktors mittels einer einzigen dimensionslosen Kennzahl, der sogenannten „mixing rate number“, zu quantifizieren. Sie beschreibt die Geschwindigkeit, mit der sich ein Gemisch dem Zustand idealer Durchmischung annähert. Der Ableitung der „mixing rate number“ liegt ein spezielles Pulsexperiment zugrunde, bei dem Spurstoffpuls und Messung des Antwortsignals direkt in der als ideal durchmischt betrachteten Rührzone einer zentral im Rührkessel eingebauten Rushton-Turbine erfolgen. In der Praxis wird dies mittels vier am Umfang verteilter Injektoren

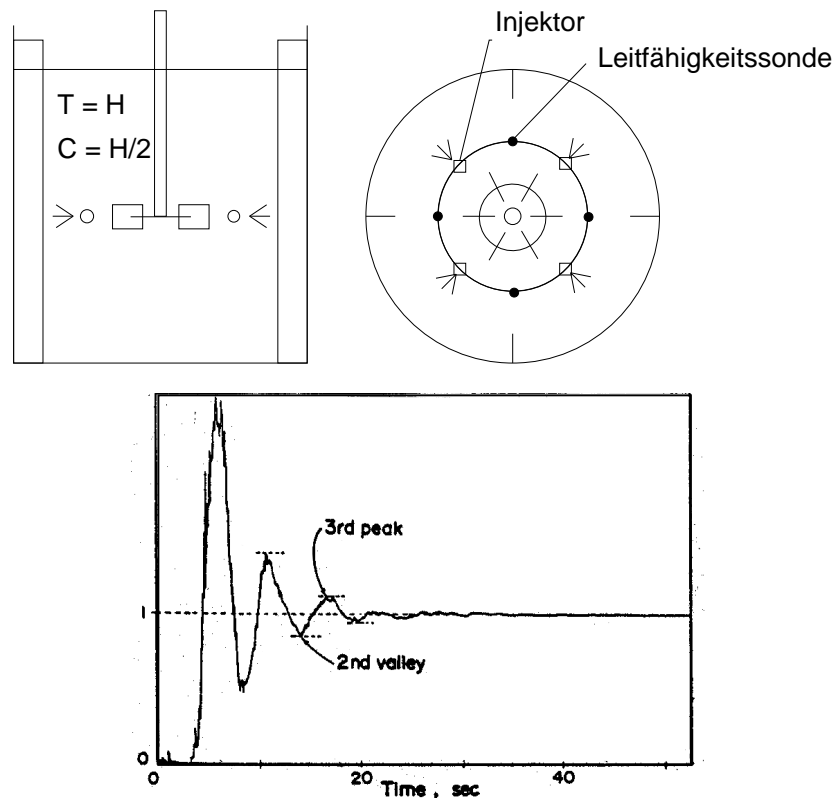


Abbildung 24: Pulsexperiment und gemessene Pulsantwort von Khang und Levenspiel [66].

und vier am selben Radius und auf gleicher Höhe installierter Leitfähigkeitsmesssonden realisiert (Abb. 24). Als Antwortsignal erhält man unter diesen Bedingungen eine gedämpfte Schwingung mit der radial-axialen Zirkulationszeit t_c als Schwingungsdauer und einer die turbulente Vermischung charakterisierenden Abnahme der Amplitude. In Abb. 24 ist zusätzlich ein von Khang und Levenspiel in einem Rührkesselreaktor mit $T = 0,56$ m experimentell ermitteltes Antwortsignal abgebildet.

Die Zirkulationsströmung in den beiden symmetrischen Großwirbeln ober- und unterhalb der Rührerebene kann als ein einfaches rückgekoppeltes System betrachtet werden. Als Ersatzschaltbild schlagen Khang und Levenspiel eine Rührkesselkaskade mit Rückführung vor. Während eine Rührkesselkaskade ohne Rückführung bei ausreichend großer Kesselzahl eine Gaussverteilung als Pulsantwort auf einen Dirac-Impuls liefert, ergibt sich mit Rückführung als Verweilzeitverteilung eine Abfolge von Gausskurven im zeitlichen Abstand der mittleren Verweilzeit in der Kaskade und mit abnehmender Amplitude (Abb. 25). In der Zirkulationsströmung des Rührkesselreaktors entspricht die mittlere Verweilzeit der Zirkulationszeit t_c .

Die Pulsantwort einer Rührkesselkaskade ohne Rückführung (alle Kessel haben das gleiche Volumen) lautet:

$$c_N(t) = \frac{1}{\theta^N} \frac{t^{N-1}}{(N-1)!} e^{-t/\theta} \quad (84)$$

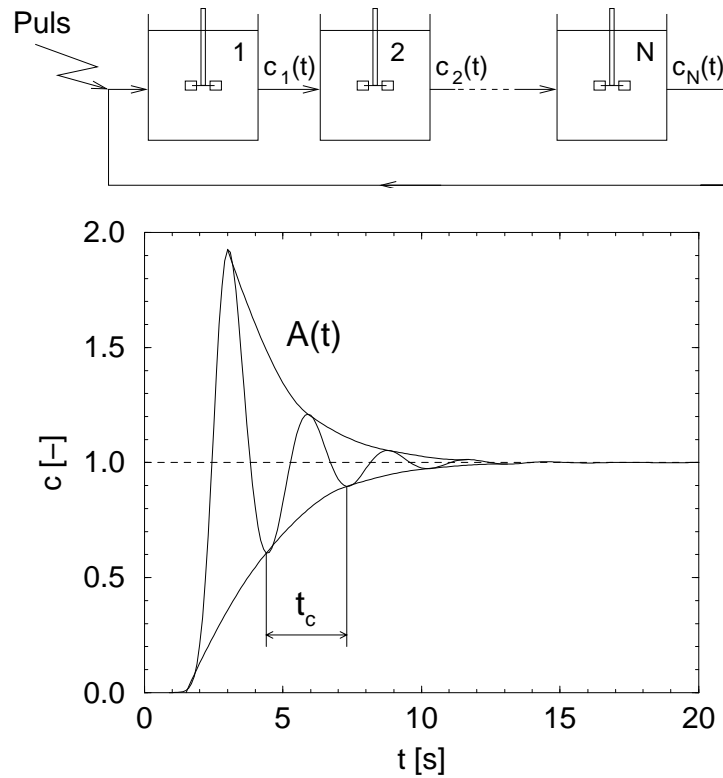


Abbildung 25: Pulsantwort der Rührkesselkaskade mit Rückführung.

$\theta = t_c/N$ ist die mittlere Verweilzeit in einem einzelnen Rührkessel. Für die Rührkesselkaskade mit Rückführung ergibt sich daraus:

$$c_N(t) = t_c \sum_{i=1}^{\infty} \frac{1}{\theta^{iN}} \frac{t^{iN-1}}{(iN-1)!} e^{-t/\theta} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{N(Nt/\theta)^{iN-1}}{(iN-1)!} e^{-Nt/\theta} \quad (85)$$

Khang und Levenspiel geben eine Näherungslösung für die von dieser unendlichen Reihe beschriebene gedämpfte Schwingung an:

$$c_N(t) \approx 1 + \underbrace{2e^{-2\pi^2 t/(Nt_c)}}_{A(t)} \cos\left(\frac{2\pi}{t_c} t + \frac{2\pi}{N}\right) \quad (86)$$

Darin beschreibt $A(t)$ die Abnahme der Schwingung mit der Dämpfungskonstante

$$K = \frac{2\pi^2}{Nt_c} \quad (87)$$

Die Rührkesselkaskade als Ersatzmodell für das Durchmischungsverhalten eines Rührkesselreaktors (Gl. 85) benötigt als Parameter also lediglich die Dämpfungskonstante K und die Schwingungsdauer t_c . Sie können aus einer experimentell ermittelten oder simulierten Pulsantwort bestimmt werden (Abb. 25). Aus K kann mit Gl. 87 die Stufenzahl der Rührkesselkaskade berechnet

werden. Die genaue Vorgehensweise ist in der von Teves angefertigten Diplomarbeit [130] zusammen mit der Anwendung auf die Simulation von Pulsexperimenten und einer biotechnischen Stoffumsetzung ausführlich beschrieben. Abb. 26 zeigt eine simulierte Pulsantwort bei $n = 165$ 1/min sowie Spurstoffverteilungen zu Zeitpunkten, zu denen Minima bzw. Maxima in der Pulsantwort auftreten.

Experiment und Simulation zeigen, dass nach ca. 4 bis 5 Zirkulationen die vollständige Vermischung des Spurstoffs erreicht ist. Die aus der simulierten Pulsantwort abgelesene Zirkulationszeit beträgt $t_c = 2,9$ s, die theoretische Kesselzahl ist $N = 14,3$. Die Mischzeit $t_{m,95}$ beträgt 10,4 s. Daraus ergibt sich als Folge der über den Umfang verteilten Injektion des Spurstoffs mit $n t_m = 28,6$ ein deutlich kleinerer Wert als aus dem im vorigen Kapitel untersuchten Pulsexperiment mit Spurstoffpuls auf die Flüssigkeitsoberfläche.

Khang und Levenspiel führen eine Dimensionsanalyse durch und erhalten den Zusammenhang

$$\frac{n}{K} \left(\frac{D}{T} \right)^\alpha = f(Re) \quad (88)$$

Für den Rührkesselreaktor mit einem im turbulenten Bereich arbeitenden Scheibenrührer ergibt die Anpassung der experimentellen Daten

$$\frac{n}{K} \left(\frac{D}{T} \right)^{2,3} \approx 0,5 \quad (89)$$

Mit den Simulationsergebnissen ergibt Gl. 89 einen Wert von 0,46 und damit eine sehr gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen. Teves [130] zeigt darüber hinaus, dass dieser Zusammenhang auch für weitere Rührerdrehzahlen sehr gut erfüllt ist.

6.2.1 Einfluss des Turbulenzmodells

Die dargestellten Untersuchungen zeigen, wie auf der Basis der Simulation des Pulsexperiments eine Rührkesselkaskade mit Rückführung als einfaches, das Durchmischungsverhalten im Rührkesselreaktor charakterisierendes Ersatzmodell parametrisiert werden kann. Die gute Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse von Khang und Levenspiel mit den Simulationsergebnissen unterstreichen die Richtigkeit der Modellierung von Strömung und Stofftransport. Dabei weist die gedämpfte Schwingung der Pulsantwort eine sehr hohe Sensitivität bezüglich einer fehlerhaften Strömungssimulation auf. Dies wird deutlich, wenn man den Einfluss des bei der Strömungssimulation verwendeten Turbulenzmodells betrachtet. Das in den im vorigen Abschnitt dargestellten Simulationen verwendete Strömungsfeld (s. Abb. 17) beruht auf dem modifizierten Chen-Kim $k-\epsilon$ -Turbulenzmodell (Kap. 3.1). In Abb. 27 ist zusätzlich die Pulsantwort eingezeichnet, die sich basierend auf einem mit dem nicht modifizierten Chen-Kim $k-\epsilon$ - bzw. Standard- $k-\epsilon$ -Modell simulierten Strömungsfeld ergibt.

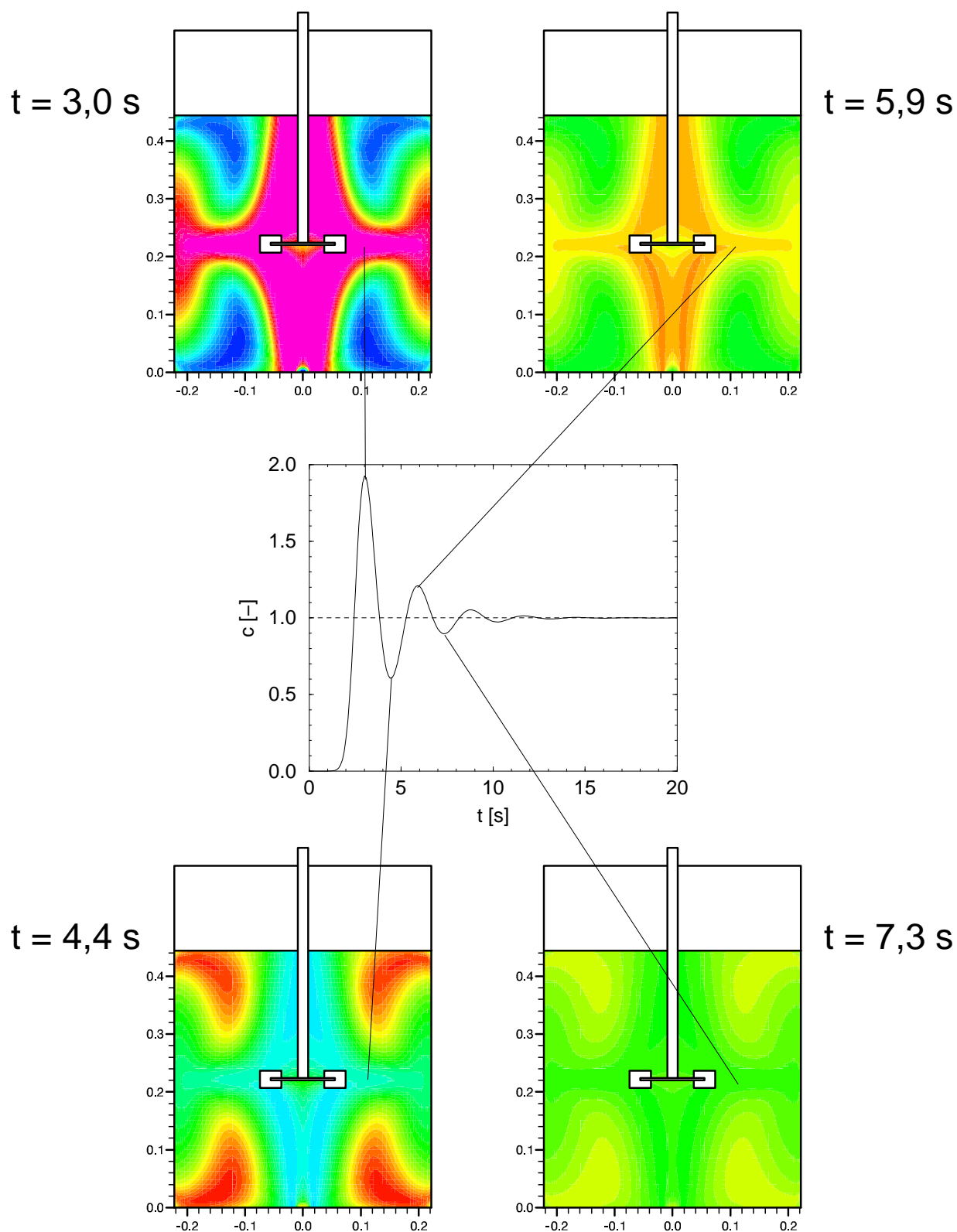


Abbildung 26: Simulierte Pulsantwort und Spurstoffverteilungen im Pulsexperiment nach Khang und Levenspiel bei $n = 165 \text{ 1/min}$.

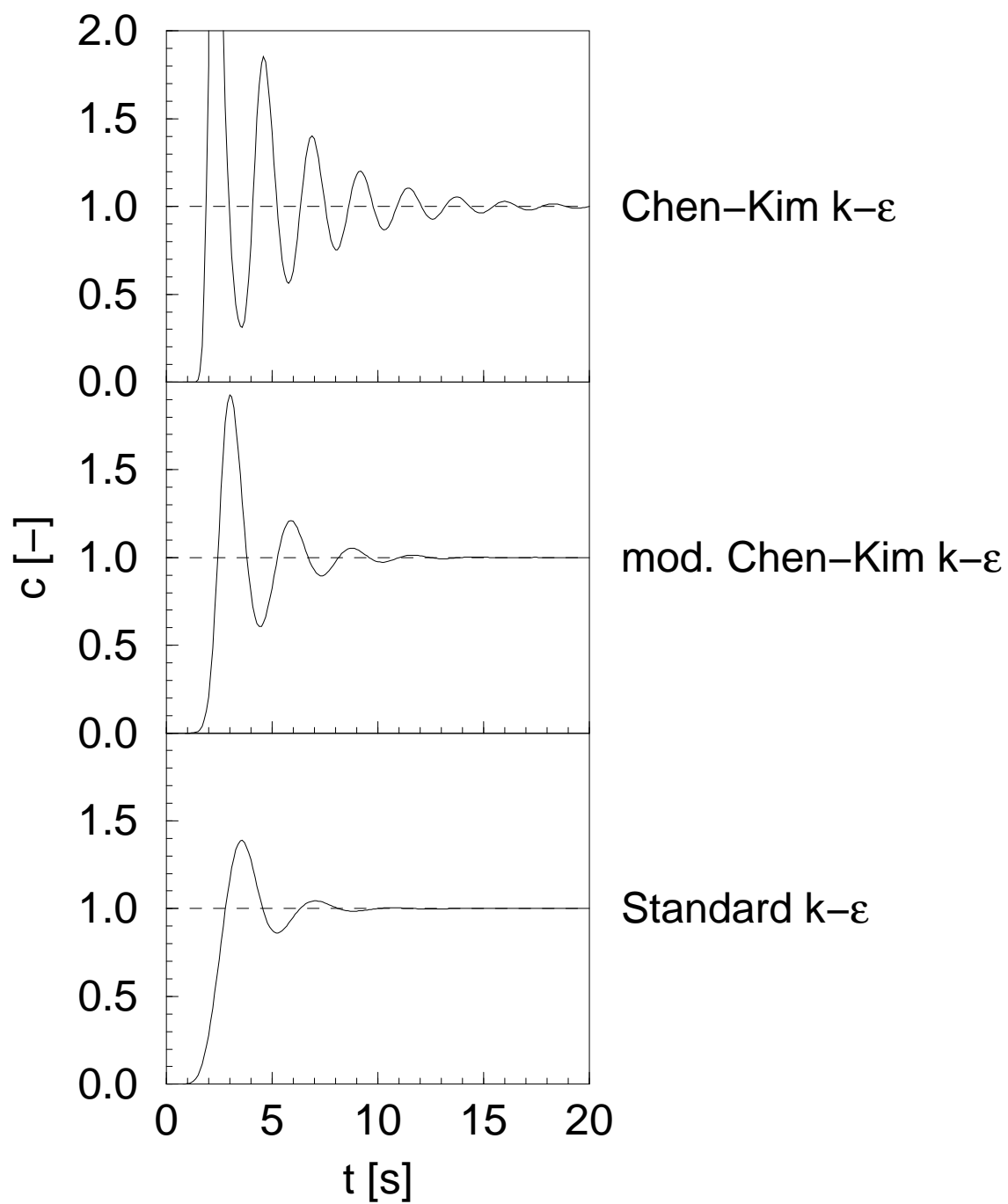


Abbildung 27: Simulierte Pulsantwort bei Verwendung unterschiedlicher Turbulenzmodelle in der Strömungssimulation.

Turbulenzmodell	Chen-Kim k- ϵ	mod. Chen-Kim k- ϵ	Standard k- ϵ
Zirkulationszeit t_c [s]	2,3	2,9	3,5
Dämpfungskonstante K [1/s] (Gl. 87)	0,29	0,48	0,60
Mischzeit $t_{m,95}$ [s]	16,3	10,4	7,7

Tabelle 8: Einfluss der Turbulenzmodellierung auf die Simulation der Pulsantwort.

Das je nach verwendetem Turbulenzmodell stark unterschiedliche Niveau der turbulenten Viskosität bzw. turbulenten Dispersion beeinflusst zunächst das Gesamtniveau der konvektiven Strömungsgeschwindigkeiten. Geringere turbulente Viskosität hat höhere Strömungsgeschwindigkeiten zur Folge, was sich in der Simulation der Pulsantwort in unterschiedlichen Zirkulationszeiten niederschlägt. Während mit dem nicht modifizierten Chen-Kim k- ϵ -Modell die turbulente Viskosität unterschätzt wird, ergeben sich mit dem Standard k- ϵ -Modell deutlich zu große Werte (s. Jenne und Reuss [60]). Die Dämpfung des Antwortsignals kann als direkter Indikator für die richtige Berechnung der turbulenten Dispersion, also die Vermischung während der Zirkulation angesehen werden. Mit dem nicht modifizierten Chen-Kim k- ϵ -Modell ergibt sich im Vergleich zum Experiment eine deutlich zu geringe Dämpfung, mit dem Standard k- ϵ -Modell ist sie zu groß, schon nach zwei Umläufen ist vollständige Vermischung erreicht. Die Zahlenwerte sind in Tab. 8 zusammen gestellt.

Die vorhergehenden Betrachtungen zeigen, dass neben dem Vergleich gemessener und simulierter lokaler Hauptgeschwindigkeiten bzw. Turbulenzgrößen auch das Antwortsignal aus der Simulation eines Pulsexperiments sehr gut zur Überprüfung der Strömungssimulation geeignet ist. In diesem Zusammenhang konnten Jenne und Reuss [60] zeigen, dass insbesondere die richtige Berechnung der Verteilung des Euler'schen Makromaßstabs im Rührerausfluss von entscheidender Bedeutung für die Simulation der Strömungsverhältnisse im gesamten Rührkesselreaktor ist. Nur die Verwendung des modifizierten Chen-Kim k- ϵ -Modells führt zu einer zufriedenstellenden Berechnung dieser Verteilung sowie auch des Antwortsignals im Pulsexperiment nach Khang und Levenspiel.

6.3 Mischzeitsimulation im „GVC-Rührwerk“

Die große Streuung der mit verschiedenen experimentellen Korrelationen berechneten Mischzeiten in Rührkesselreaktoren (s. Kap. 6.1) unterstreicht die Notwendigkeit einer Standardisierung der Versuchsbedingungen. Der GVC-Fachausschuss *Mischvorgänge* (interne Arbeitssitzung am 26./27. Mai 1997 in Bad Mergentheim) hat zu diesem Zweck das in Abb. 28 gezeigte Rührwerk für niedrigviskose Flüssigkeiten vorgeschlagen. Diese Abbildung sowie die Ergebnisse der Versuchsreihe wurden freundlicherweise von Prof. Dr.-Ing. M. Kraume, Institut für Verfahrenstechnik, TU Berlin, zur Verfügung gestellt.

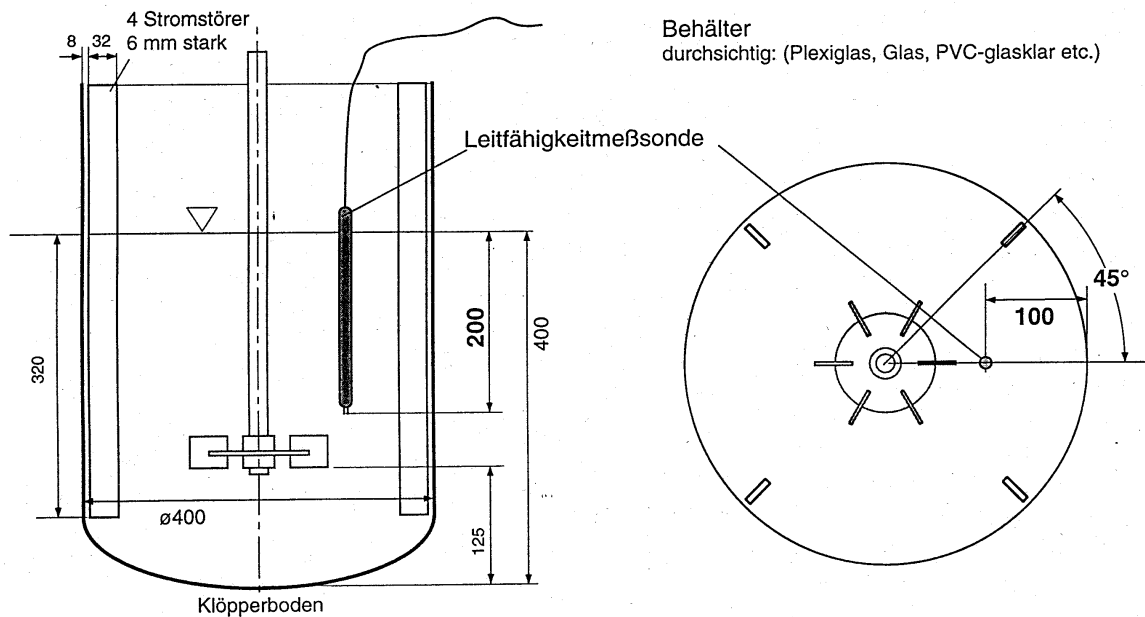


Abbildung 28: Vom GVC-Fachausschuss *Mischvorgänge* vorgeschlagenes Rührwerk für niedrigviskose Flüssigkeiten.

Der Rührkesselreaktor besitzt einen Klöpferboden, der Rührer ist aus der zentralen Position in Richtung Kesselboden versetzt ($C = 0,34$). Das Durchmesser Verhältnis beträgt $D/T = 0,31$. Bei den GVC-Ringversuchen wurde die Mischzeit in der in Abb. 28 gezeigten Anordnung mit Hilfe einer Leitfähigkeitsmessmethode bestimmt. Gleichzeitig wurden am Institut für Bioverfahrenstechnik Simulationen der Fluidodynamik sowie des standardisierten Pulsexperiments durchgeführt (s. auch [61] [59]). Im Pulsexperiment wird der Spurstoff in der Nähe der Rührerwelle zugegeben, so dass er bereits zu Beginn als in Umfangsrichtung vorvermischt betrachtet werden kann. Das Pulsexperiment wird daher nur auf einem von drei auf zwei Raumdimensionen zusammengefasst (s. Kap. 5.2.4) Strömungsfeld simuliert. Abb. 29 zeigt die berechneten Pulsantworten bei $r = 0,1$ m und $z = 0,2$ m für zwei verschiedene Rührerdrehzahlen.

Bei der doppelten Rührerdrehzahl ergibt sich der Theorie entsprechend die halbe Mischzeit. Die dimensionslose Mischzeit beträgt $n t_{m,95} = 27,5$. Ein Grund für diesen, im Vergleich mit den Messergebnissen verschiedener Autoren (Abb. 30, die dimensionslose Mischzeit wird hier als Mischzeitkennzahl bezeichnet) eher kleinen Wert, ist die axialsymmetrische Simulation des Pulsexperiments unter Vernachlässigung der Konzentrationsgradienten in Umfangsrichtung. Trotz der Spurstoffaufgabe in der Nähe der Rührerwelle kann im Experiment von keiner vollständigen Vorvermischung in Umfangsrichtung ausgegangen werden, was zu tendenziell größeren Mischzeiten führt. Die experimentell ermittelten Werte der dimensionslosen Mischzeit streuen trotz des standardisierten Versuchsaufbaus in einem weiten Bereich zwischen ca. 25 und 45. Die Strömungssimulation

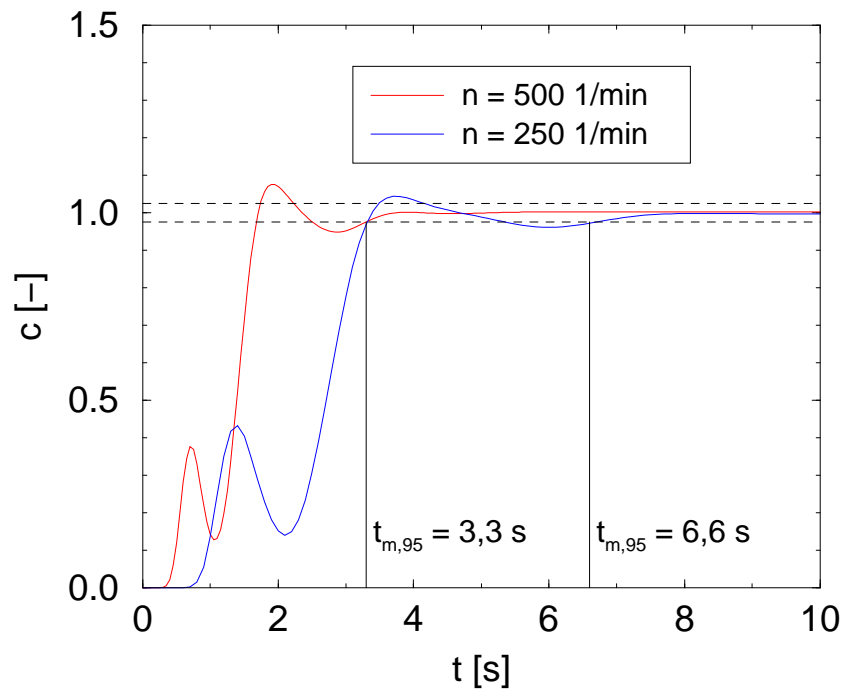


Abbildung 29: Simulierte Pulsantwort in der Versuchsanordnung des GVC-Ringversuchs.

liefert also zusammen mit der Simulation des Pulsexperiments eine Vorhersage der Mischzeit, die mindestens die Genauigkeit einer experimentellen Bestimmung erreicht.

Verglichen mit den in den beiden vorhergehenden Kapiteln dargestellten Pulsexperimenten weist der Verlauf in Abb. 29 nur geringe Amplituden auf. Das dies in der Wahl des Messorts begründet liegt, zeigen die in Abb. 31 dargestellten Spurstoffverteilungen. Der vom Pulsort mit der Strömung nach unten transportierte Spurstoff verfehlt die Messsonde auf der ersten Passage (linkes Bild, $t = 1,3$ s) zum grössten Teil und verursacht dabei nur einen Anstieg des Signals auf ca. 0,4. Erst nach einer vollständigen Zirkulation (rechtes Bild, $t = 3,0$ s) wird die Messsonde vom Spurstoff voll erfasst, was den Anstieg des Antwortsignals auf Werte über 1,0 verursacht. Nach einer weiteren Zirkulation ist die geforderte Homogenität bereits erreicht.

Wie die ermittelte Mischzeit von der Wahl des Messortes beeinflusst wird, verdeutlicht Abb. 32. Dargestellt sind simulierte Pulsantworten an drei verschiedenen Radien auf der Höhe $z = 0,2$ m. Die Antwortsignale münden zu unterschiedlichen Zeitpunkten in den für die Bestimmung der Mischzeit geforderten Konzentrationsbereich ein. Die Antwortkurven zeigen für das Signal am Radius $r = 0,05$ m eine höhere Sensitivität als am Messort der GVC-Ringversuche an.

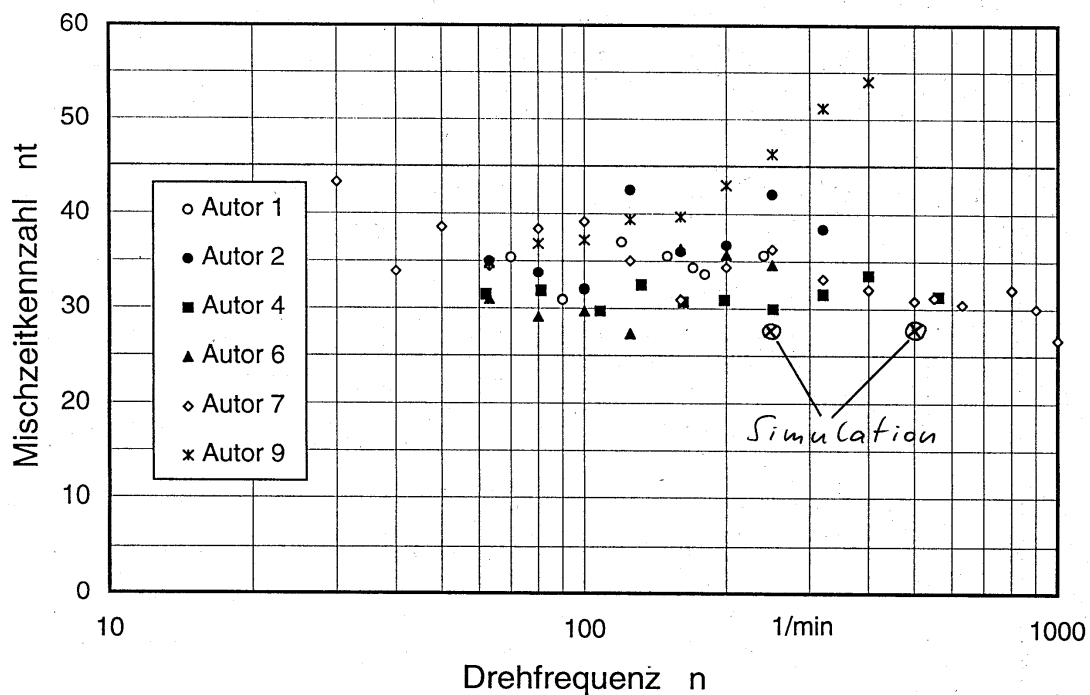


Abbildung 30: Experimentell ermittelte und simulierte dimensionslose Mischzeiten.

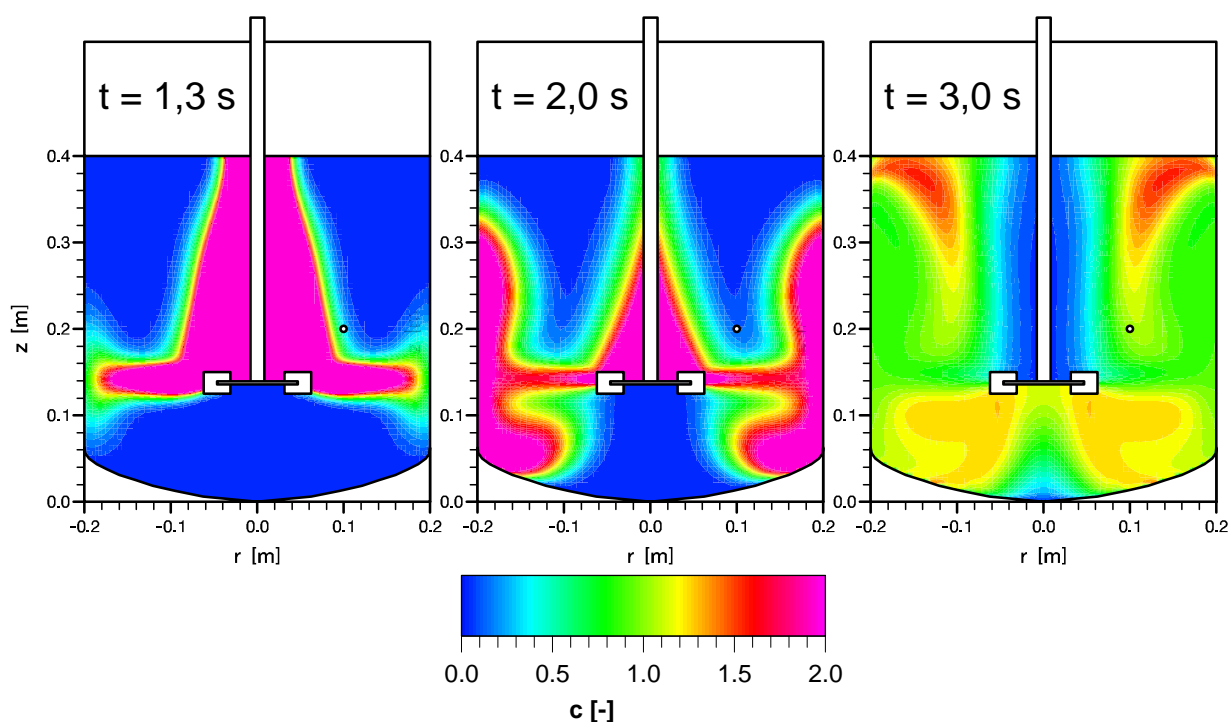


Abbildung 31: Spurstoffverteilung beim Pulsexperiment im „GVC-Rührwerk“. Der Ort der Messung ist mit einem Punkt markiert.

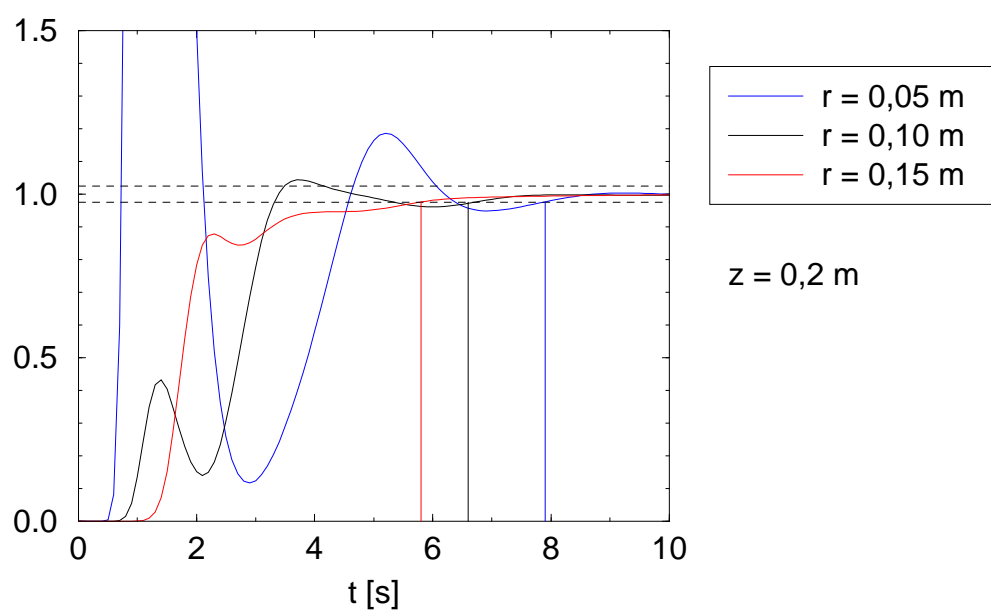


Abbildung 32: Einfluss des Messortes auf die Bestimmung der Mischzeit.