

3 Ergebnisse

Die im Folgenden präsentierten Ergebnisse beschreiben die Flüssigkeits- und Massenverteilung in einem Hohlfasermembransystem mit 3-D Perfusion von Zellen zur extrakorporalen Leberunterstützung anhand von Durchmischungsmessungen mit Phenolrot (PSP) als Marker. Sie ermöglichen einen Vergleich der verschiedenen Laufmodi (Perfusion, Diffusion durch ein oder beide Kapillarbündel und Cross Flow) bei unterschiedlichen Flussraten (50 – 300 ml/min), zum besseren Verständnis der Durchmischungsvorgänge im Bioreaktor. Soweit möglich, sollen diese Ergebnisse dazu dienen, eine Empfehlung für eine ideale Einstellung des Laufmodus und der Flussrate im Betrieb zu erarbeiten.

3.1 Allgemeine Beschreibung

Vor der PSP-Bolusgabe in den Reaktorkreislauf erfolgte, wie im vorherigen Kapitel beschrieben, jeweils die Entnahme eines Nullwertes. Dieser wurde von den gemessenen Werten subtrahiert, wodurch sich vereinzelt rechnerisch auftretende negative Werte in den Anfangsphasen der Messungen erklären lassen.

Die gemessenen Werte werden, wie ebenfalls bereits beschrieben, als prozentualer Anteil der Konzentration angegeben, bei welcher eine vollständige Durchmischung erreicht wurde. Es wird angenommen, dass zum Zeitpunkt $t = 60$ Minuten eine vollständige Durchmischung vorliegt. Durch die Angabe in Prozent lässt sich eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse erlangen. In den jeweiligen Kurven wird auf der y-Achse die relative Konzentration in [%] und auf der x-Achse die Zeit in [min] angegeben. Die gestrichelte Linie kennzeichnet 100% der relativen Konzentration. Es werden die einzelnen Kurven beschrieben sowie die Mischzeiten bis zum Erreichen einer Homogenität von $h \leq 0,1$ angegeben. Als Plateauphase wird gewertet, wenn die Kurven scheinbar keinen „größeren“ Schwankungen mehr unterliegen. Es handelt sich hierbei um eine rein subjektive Beschreibung der Kurvenverläufe, wodurch sich die teilweise Diskrepanz zu den ermittelten Mischzeiten ergibt.

Die Mischzeiten werden als Balkendiagramm dargestellt. Die Laufmodi sind farblich voneinander getrennt und die Balken sind nach Flussraten über der x-Achse gruppiert. Auf der y-Achse wird die Zeit in [min:sek] angegeben.

3.2 Vergleich der Laufmodi bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Im Folgenden werden die Laufmodi anhand der Mediane aus den Messungen (relative Konzentrationen) an den Reaktoren H44, J19 und 0117 für die einzelnen Flussraten gegenübergestellt.

50 ml/min

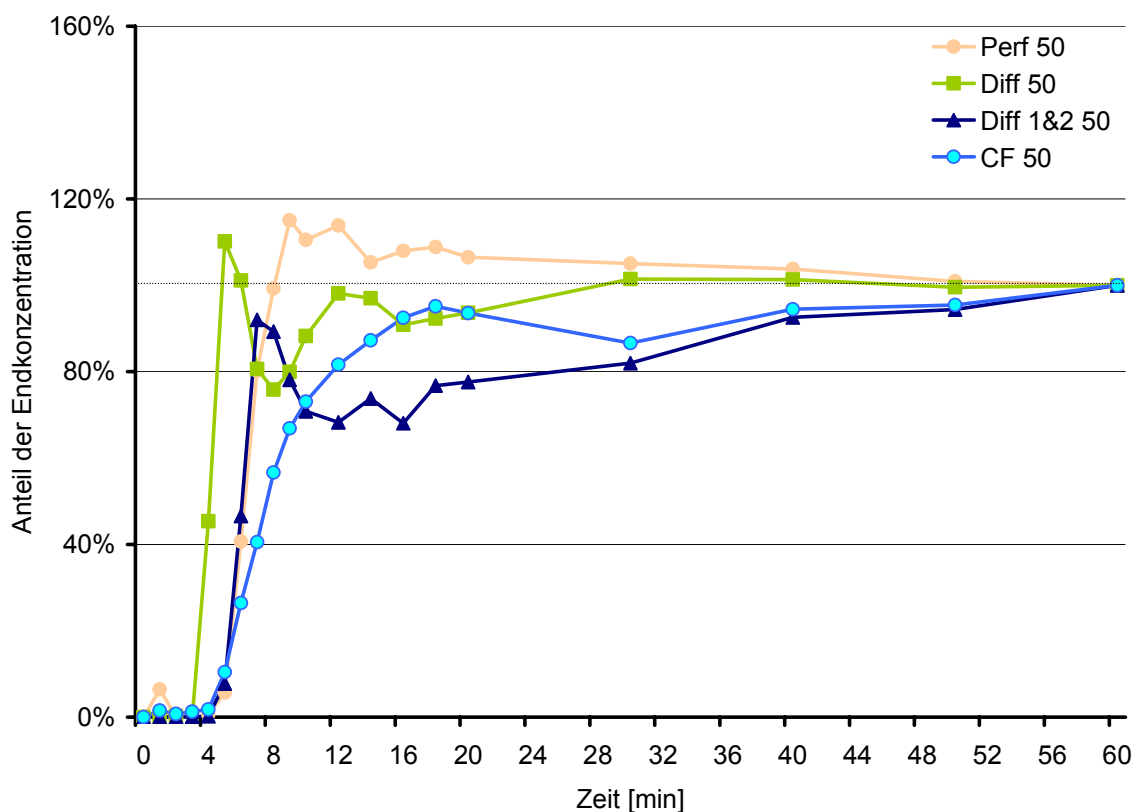


Abb. 11: Durchmischungsdiagramm für die Flussrate 50 ml/min (Mediane, gestrichelte Linie = 100%). Mischzeiten: Perfusion = 12:53 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 10:24 min., Diffusion (beide Kapillarbündel) = 37:16 min., Cross Flow = 34:17 min.

Mischzeiten (Mediane) bei 50 ml/min:

Perfusion 12:53 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 10:24 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 37:16 min.

Cross Flow 34:17 min.

Bei einer Flussrate von 50 ml/min zeigen sich über den gesamten Untersuchungszeitraum Unterschiede zwischen den Laufmodi. Im Perfusionsmodus verläuft die Durchmischung zunächst relativ linear und erreicht nach etwa 14 Minuten eine Plateauphase. Eine Homogenität

von $h \leq 0,1$ wird nach 12:53 min. erreicht. Die Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt nach 5 Minuten. einen leichten Peak, gefolgt von einem Abfall zur 8. Minute hin. Die Plateauphase wird ebenfalls nach etwa 14 Minuten erreicht. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ stellt sich nach 10:24 min. ein. Bei der Diffusion durch beide Kapillarbündel steigt die Konzentration zwischen der vierten und siebten Minute auf 92%, fällt dann aber wieder auf etwa 70% ab und steigt ab der 16. Minute erneut stetig bis zum Ende der Untersuchungszeit an. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird erst nach 37:16 min. erreicht. Der Cross Flow zeigt einen noch deutlich gleichmäßigeren Anstieg als die Perfusion, der aber erst nach 4 Minuten beginnt. Eine Plateauphase wird etwa ab der 16. Minute erreicht, jedoch zeigt die Kurve zwischen der 20. und 30. Minute einen Abfall und verläuft anschließend annähernd kongruent zur Diffusion durch beide Kapillarbündel. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird ebenfalls erst relativ spät nach 34:17 min. erreicht.

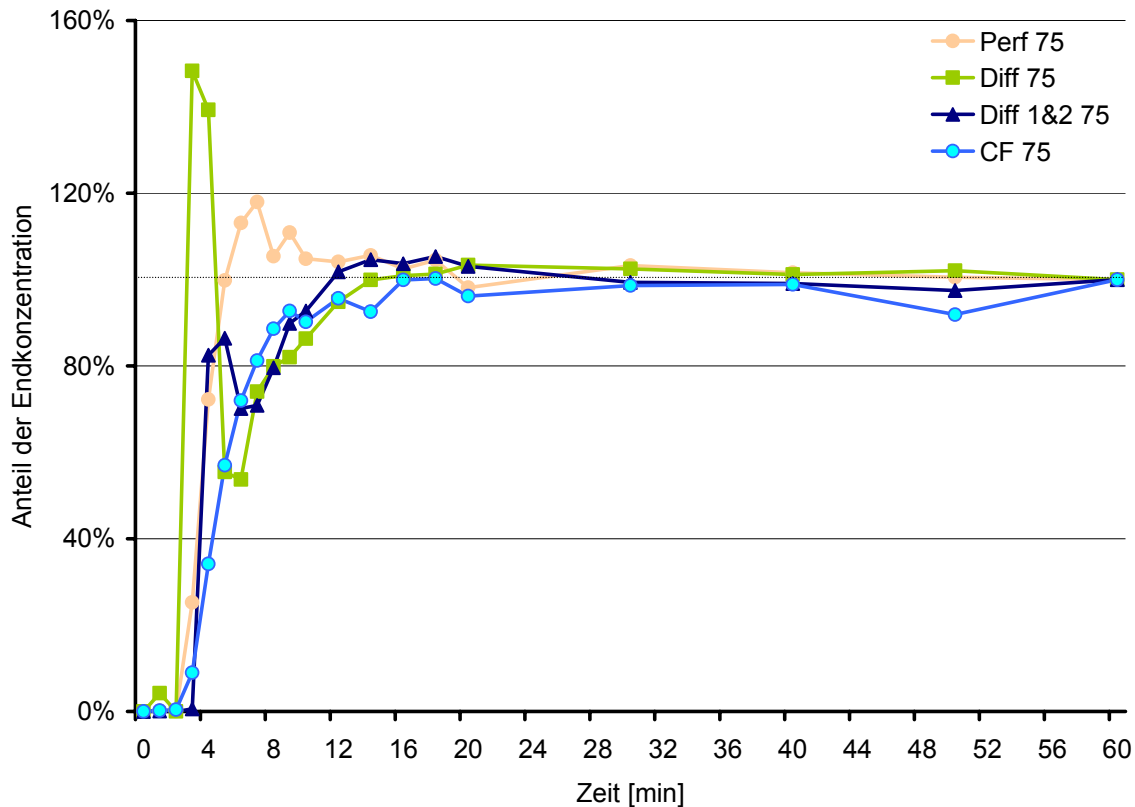
75 ml/min

Abb. 12: Durchmischungsdiagramm für die Flussrate 75 ml/min (Mediane, gestrichelte Linie = 100%). Mischzeiten: Perfusion = 09:10 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 10:53 min., Diffusion (beide Kapillarbündel) = 09:00 min., Cross Flow = 08:14 min.

Mischzeiten (Mediane) bei 75 ml/min:

Perfusion 09:10 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 10:53 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 09:00 min.

Cross Flow 08:14 min.

Bei einer Flussrate von 75 ml/min zeigen die Laufmodi ab der 16. Minute einen relativ gleichförmigen Verlauf. Die Plateauphase wird in allen vier Modi nach etwa 14 Minuten erreicht. Unterschiede zeigen sich aber beim initialen Kurvenverlauf. Die Perfusion zeigt lediglich einen sehr gering ausgeprägten Peak um die 7. Minute. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird bei Perfusion bereits nach 09:10 min. erreicht. Bei Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt sich zwischen der dritten und vierten Minute, noch deutlich stärker als bei einer Flussrate von 50 ml/min, ein ausgeprägter Peak. Nach einem Abfall der Konzentration zwischen der fünften und sechsten Minute steigt diese ohne einen weiteren Peak relativ gleichmäßig an. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird nach 10:53 min. erreicht. Bei der Diffusion durch beide

Kapillarbündel steigt die Konzentration zwischen der vierten und fünften Minute auf etwas über 80%, fällt dann wiederum auf etwa 70% ab. Anschließend steigt sie, annähernd parallel zu Diffusion durch ein Kapillarbündel, bis zum Erreichen der Plateauphase an. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird bereits nach 09:00 min. erreicht. Die Cross Flow Kurve verläuft ebenfalls annähernd parallel zu den beiden vorherigen Modi, ohne jedoch einen initialen Peak aufzuweisen. Sie zeit wie bereits bei 50 ml/min einen sehr gleichmäßigen Verlauf und erreicht eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird nach 08:14 min.

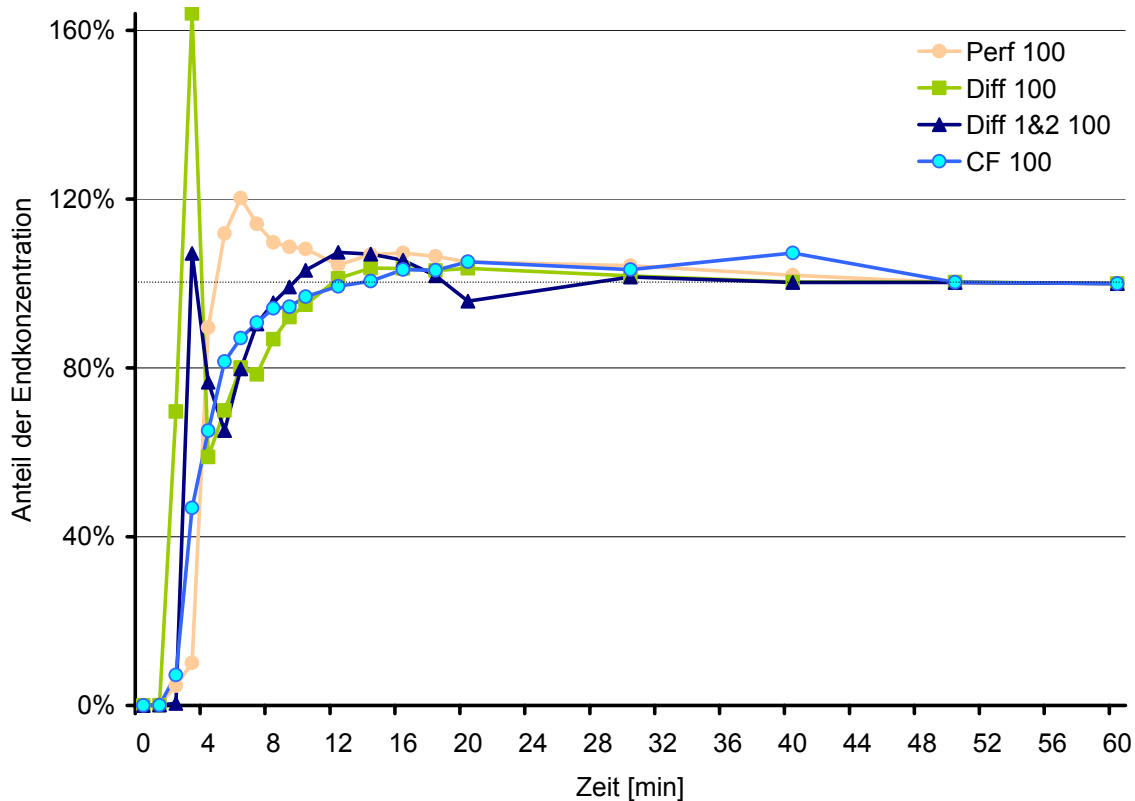
100 ml/min

Abb. 13: Durchmischungsdiagramm für die Flussrate 100 ml/min (Mediane, gestrichelte Linie = 100%). Mischzeiten: Perfusion = 08:00 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 08:36 min., Diffusion (beide Kapillarbündel) = 07:00 min., Cross Flow = 06:45 min.

Mischzeiten (Mediane) bei 100 ml/min:

Perfusion 08:00 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 08:36 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 07:00 min.

Cross Flow 06:45 min.

Bei einer Flussrate von 100 ml/min zeigen die Laufmodi einen sehr ähnlichen Verlauf wie bei 75 ml/min. Auf der Zeitachse sind die Kurven jedoch um etwa eine Minute nach links, bzw. nach vorne, verschoben. Wiederum wird die Plateauphase in den vier Modi etwa gleichzeitig erreicht. Diese Beobachtung wird von den relativ nah beieinander liegenden Mischzeiten bestätigt. Unterschiede zeigen sich erneut während der initialen Phasen der Untersuchungen. Die Schwankungen sind dabei teilweise ausgeprägter im Vergleich zu den Messungen mit 75 ml/min. Bei Perfusion zeigt sich eine insgesamt sehr ähnliche Kurve mit einem leichten Peak zur 6. Minute. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird nach 08:00 min. erreicht. Bei Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt sich nach drei Minuten ein, im Vergleich zu den niedrigeren Flussraten,

noch deutlicher ausgeprägter Peak. Ebenfalls analog zur vorherigen Kurve zeigt sich anschließend ein Abfall der Konzentration, diesmal bereits nach einer Minute, und einem folgenden relativ homogenen Anstieg. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird im Diffusionsmodus durch ein Kapillarbündel nach 08:36 min. erreicht. Bei der Diffusion durch beide Kapillarbündel steigt die Konzentration bis zur dritten Minute auf etwas über 100%, fällt dann aber bis zur 5. Minute wiederum auf etwa 65% ab. Anschließend steigt sie, annähernd parallel zur Diffusion durch ein Kapillarbündel, bis zum Erreichen der Plateauphase an. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird bereits nach 07:00 min. erreicht. Der Cross Flow zeigt auch hier einen sehr gleichmäßigen Verlauf, ohne Konzentrationspeaks. Ab etwa der 6. Minute verläuft die Kurve parallel zur Diffusion durch ein oder beide Kapillarbündel. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird beim Cross Flow bereits nach 06:45 min. erreicht.

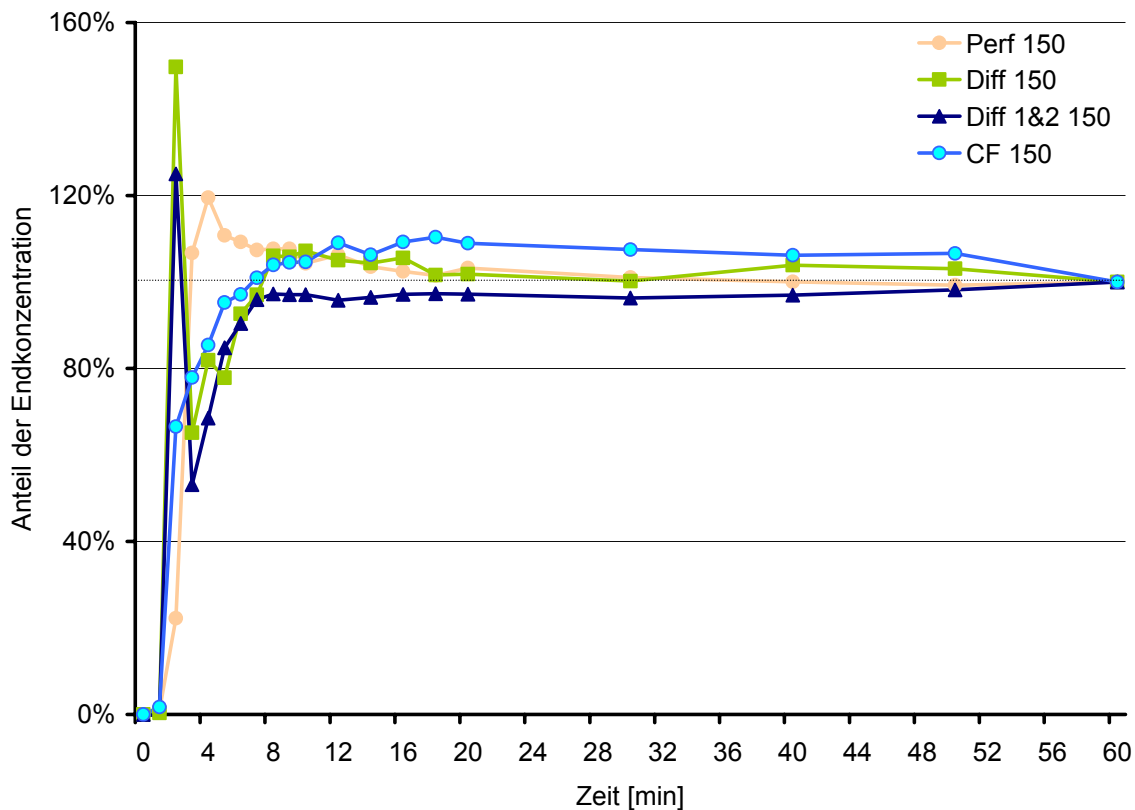
150 ml/min

Abb. 14: Durchmischungsdiagramm für die Flussrate 150 ml/min (Mediane, gestrichelte Linie = 100%). Mischzeiten: Perfusion = 05:30 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 05:48 min., Diffusion (beide Kapillarbündel) = 06:00 min., Cross Flow = 04:30 min.

Mischzeiten (Mediane) bei 150 ml/min:

Perfusion 05:30 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 05:48 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 06:00 min.

Cross Flow 04:30 min.

Auch bei einer Flussrate von 150 ml/min zeigen die Laufmodi wiederum einen sehr ähnlichen Verlauf wie bei den vorherigen Messungen. Auf der Zeitachse sind die Kurven diesmal um etwa ein bis zwei Minuten nach links, bzw. nach vorne, verschoben. Auch die Plateauphase wird erneut etwa gleichzeitig erreicht. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird bei Perfusion nach 05:30 min. erreicht. Bei Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt sich nach zwei Minuten, ähnlich wie bei den niedrigeren Flussraten, ein deutlich ausgeprägter Peak. Ebenfalls analog zu den vorherigen Kurven zeigt sich anschließend ein Abfall der Konzentration, diesmal bereits eine Minute später. Es folgt ein relativ homogener Anstieg der Konzentration bis zum Erreichen der Plateauphase um die 7. Minute herum. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird im Diffusionsmodus

durch ein Kapillarbündel allerdings nach 05:48 min. erreicht. Bei der Diffusion durch beide Kapillarbündel steigt die Konzentration nach zwei Minuten auf etwa 125%, fällt dann aber wiederum auf gut 50% ab. Anschließend steigt sie, annähernd parallel zur Diffusion durch ein Kapillarbündel, bis zum Erreichen der Plateauphase nach etwa 7 Minuten an. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird nach 06:00 min. erreicht. Der Cross Flow zeigt auch bei 150 ml/min einen sehr gleichmäßigen Anstieg, ohne Peaks. Ab etwa der 3. Minute ist der Verlauf wiederum annähernd parallel zur Diffusion durch ein oder beide Kapillarbündel. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird im Cross Flow Modus bereits früher als in den anderen Modi nach 04:30 min. erreicht.

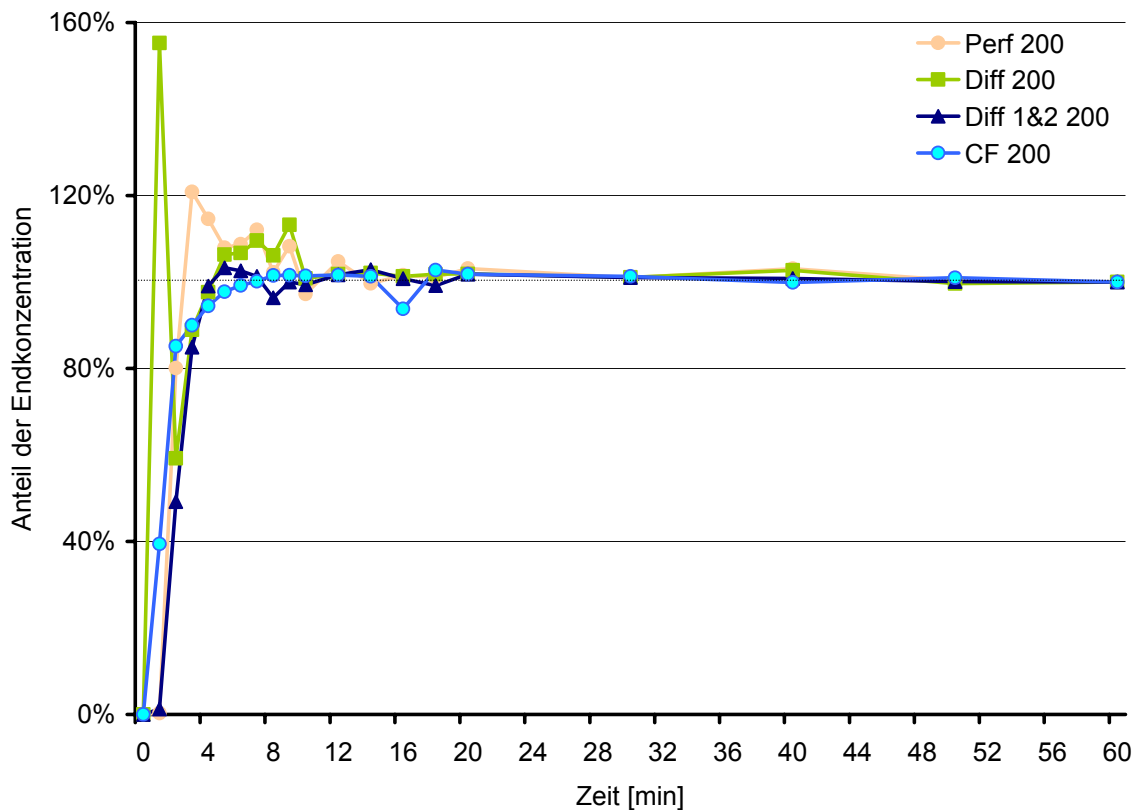
200 ml/min

Abb. 15: Durchmischungsdiagramm für die Flussrate 200 ml/min (Mediane, gestrichelte Linie = 100%).
 Mischzeiten: Perfusion = 07:12 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 09:15 min., Diffusion (beide
 Kapillarbündel) = 03:21 min., Cross Flow = 03:00 min.

Mischzeiten (Mediane) bei 200 ml/min:

Perfusion 07:12 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 09:15 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 03:21 min.

Cross Flow 03:00 min.

Bei einer Flussrate von 200 ml/min verändert sich das Erscheinungsbild der Kurve für Diffusion durch beide Kapillarbündel. Der bisherige initiale Peak verschwindet und die Kurve zeigt einen ähnlich gleichmäßigen Anstieg wie die Cross Flow Kurve. Perfusion und Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigen hingegen weiterhin die bekannten Peaks. Zudem steigt die Mischzeit deutlich um etwa 2 bzw. 4 Minuten gegenüber einer Flussrate 150 ml/min an. Die Plateauphase wird im Perfusions- und im Diffusionsmodus durch ein Kapillarbündel erst nach etwa 11 Minuten erreicht. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ stellt sich bei Perfusion nach 07:12 min. ein und bei Diffusion durch ein Kapillarbündel sogar erst nach 09:15 min. Diffusion durch beide Kapillarbündel und Cross Flow erreichen indes bereits nach etwa 4 bis 5 Minuten die

Plateauphase. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird bei Diffusion durch beide Kapillarbündel nach 03:21 min. und bei Cross Flow nach 03:00 min. erreicht.

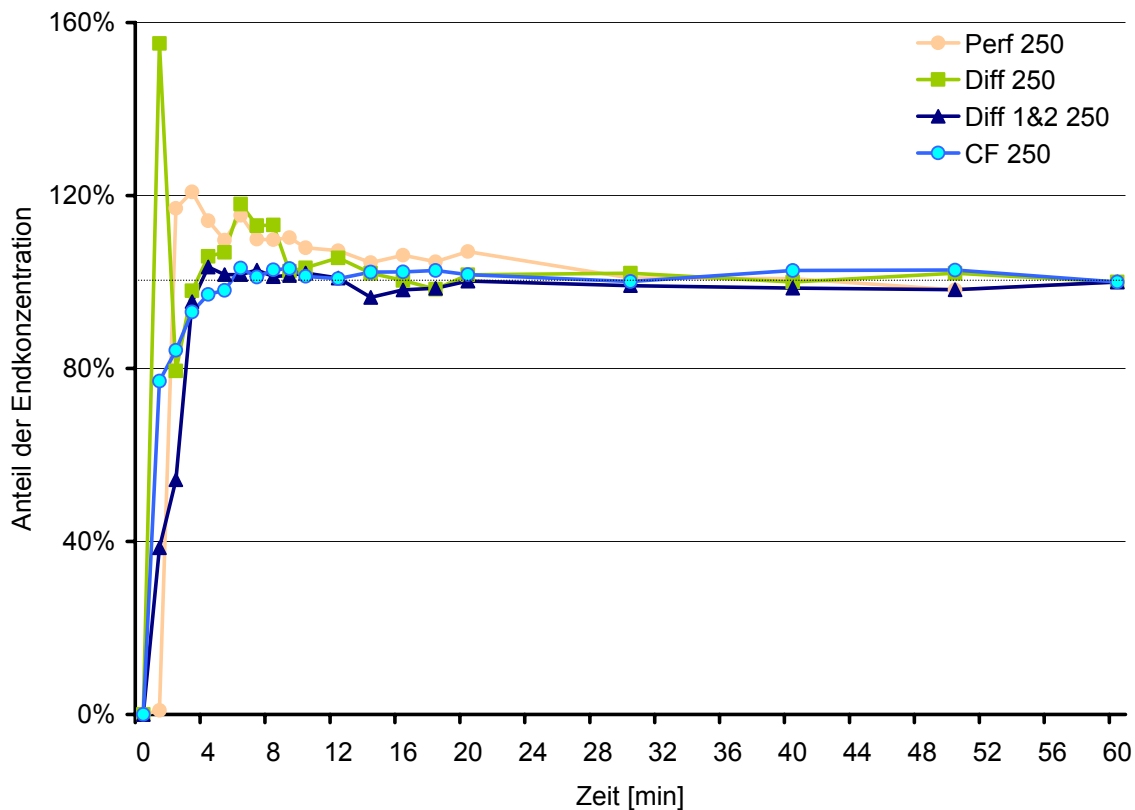
250 ml/min

Abb. 16: Durchmischungsdiagramm für die Flussrate 250 ml/min (Mediane, gestrichelte Linie = 100%). Mischzeiten: Perfusion = 07:00 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 08:16 min., Diffusion (beide Kapillarbündel) = 02:53 min., Cross Flow = 2:40 min.

Mischzeiten (Mediane) bei 250 ml/min:

Perfusion 07:00 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 08:16 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 02:53 min.

Cross Flow 02:40 min.

Bei einer Flussrate von 250 ml/min bestätigt sich der Trend der Messungen mit 200 ml/min. Während Perfusion und Diffusion durch ein Kapillarbündel weiterhin einen Peak zeigen, steigt die Konzentration bei Diffusion durch beide Kapillarbündel und beim Cross Flow wiederum sehr gleichmäßig an. Die Perfusion erreicht, bei dem üblichen sehr moderaten Peak, nach etwa 7 Minuten die Plateauphase und nach 07:00 min. eine Homogenität von $h \leq 0,1$. Die Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt bereits nach einer Minute den typischen deutlichen Peak mit sofortigem Abfall zur 2. Minute hin und einem anschließenden Anstieg mit einem erneuten Peak. Die Plateauphase wird bei Diffusion durch ein Kapillarbündel nach etwa 9 Minuten, und eine Homogenität von $h \leq 0,1$ nach 08:16 min. erreicht. Die Diffusion durch beide Kapillarbündel

zeigt wie schon bei der vorherigen Kurve keinen Peak. Sie erreicht gemeinsam mit dem Cross Flow bereits nach 3 bis 4 Minuten die Plateauphase. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird bei Diffusion durch beide Kapillarbündel nach 02:53 min. und bei Cross Flow nach 02:40 min. erreicht.

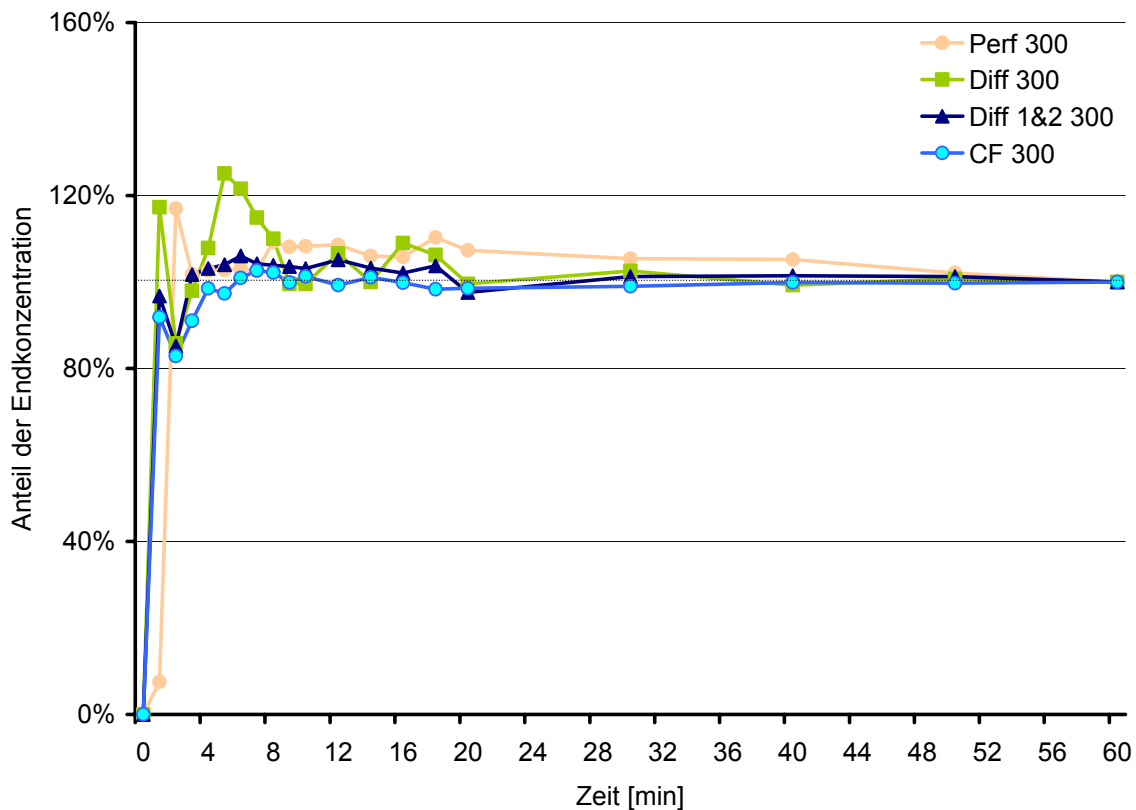
300 ml/min

Abb. 17: Durchmischungsdiagramm für die Flussrate 300 ml/min (Mediane, gestrichelte Linie = 100%). Mischzeiten: Perfusion = 03:40 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 08:00 min., Diffusion (beide Kapillarbündel) = 02:18 min., Cross Flow = 02:53 min.

Mischzeiten (Mediane) bei 300 ml/min:

Perfusion 03:40 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 08:00 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 02:18 min.

Cross Flow 02:53 min.

Bei einer Flussrate von 300 ml/min zeigt sich ein etwas abgewandeltes Bild im Vergleich zu 200 ml/min und bei 250 ml/min. Alle vier Kurven zeigen einen sehr kleinen bis moderaten Peak während der ersten 2 bis 3 Minuten. Die Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt einen zusätzlichen, etwas stärker ausgeprägten, zweiten Peak nach etwa 5 Minuten. Entsprechend erreicht sie auch erst nach etwa 08:00 min. eine Homogenität von $h \leq 0,1$, zusammen mit dem Eintritt in die Plateauphase. Die Perfusion zeigt im Gegensatz zur Diffusion durch beide Kapillarbündel und zum Cross Flow einen Peak etwas oberhalb der 100%-Linie, ähnlich dem ersten Peak der Diffusion durch ein Kapillarbündel. Dennoch erreichen Perfusion, Diffusion durch beide Kapillarbündel und Cross Flow annähernd zeitgleich nach 3 bis 4 Minuten die

Plateauphase. Der Cross Flow scheint hierbei etwas verzögert. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird bei Perfusion nach 03:40 min., bei Diffusion durch beide Kapillarbündel nach 02:18 min. und beim Cross Flow nach 02:53 min. erreicht.

Mischzeiten bis zum Erreichen einer Homogenität von $h \leq 0,1$

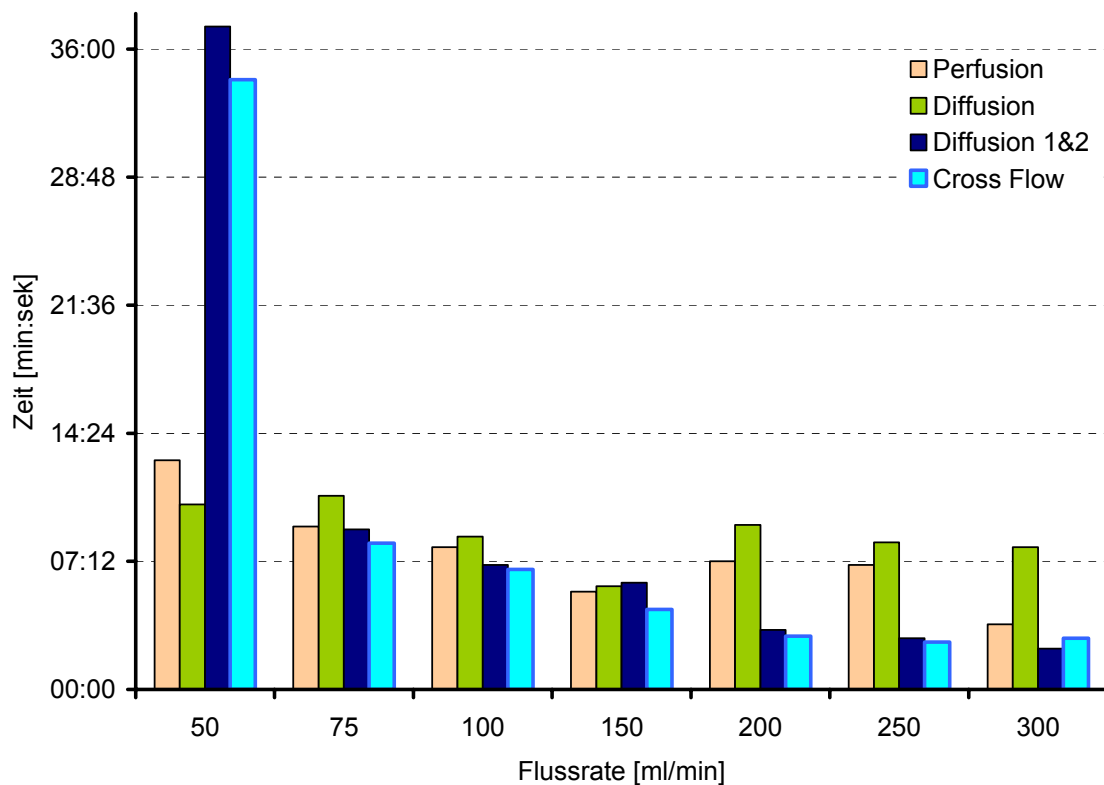


Abb. 18: Mischzeiten der Messungen in den zellfreien Reaktoren

Betrachtet man die Mischzeiten bis zum Erreichen einer Homogenität von $h \leq 0,1$, so lässt sich gut erkennen, dass bei Diffusion durch beide Kapillarbündel und beim Cross Flow die Mischzeiten mit steigender Flussrate kontinuierlich abnehmen. Anders ist dies bei Perfusion und bei Diffusion durch ein Kapillarbündel. Bei Perfusion nehmen die Mischzeiten zunächst ebenfalls mit steigender Flussrate ab. Bei einer Flussrate von 150 ml/min zeigt die Mischzeit einen ersten Tiefstand. Anschließend zeigen sich höhere Werte, welche aber mit zunehmender Flussrate erneut abnehmen. Bei 300 ml/min liegt die Mischzeit deutlich unterhalb dem Wert für 150 ml/min. Die Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt zunächst einen der Perfusion ähnlichen Verlauf. Doch während die Perfusion bei der höchsten Flussrate die kürzeste Mischzeit aufweist kann die Diffusion dies nicht erreichen. Nach dem Anstieg der Mischzeit bei 200 ml/min nehmen die Werte bei 250 ml/min und bei 300 ml/min nur sehr schwach ab und liegen deutlich über der Mischzeit bei 150 ml/min.

Vergleicht man den Verlauf der unterschiedlichen Laufmodi untereinander, so zeigen die Diffusion durch beide Kapillarbündel und der Cross Flow bei 50 ml/min die deutlich längsten Mischzeiten. Sie „überholen“ die anderen beiden Laufmodi aber mit zunehmenden Flussraten. Ab 75 ml/min ist der Cross Flow durchgehend der Modus mit der kürzesten Mischzeit. Bei 75 -

150 ml/min sind die Mischzeiten aller drei Laufmodi relativ ähnlich. Für Diffusion durch beide Kapillarbündel und Cross Flow bleibt dies auch bei höheren Flussraten so. Die Perfusion und die Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigen hier deutlich höhere Werte als die anderen Laufmodi, aufgrund des beschriebenen Anstiegs der Mischzeiten. Bei 300 ml/min kann sich die Perfusion allerdings den niedrigeren Mischzeiten der Diffusion durch beide Kapillarbündel und des Cross Flows wieder annähern.

Vergleich unterschiedlicher Laufmodi im zellbefüllten Reaktor (H35)

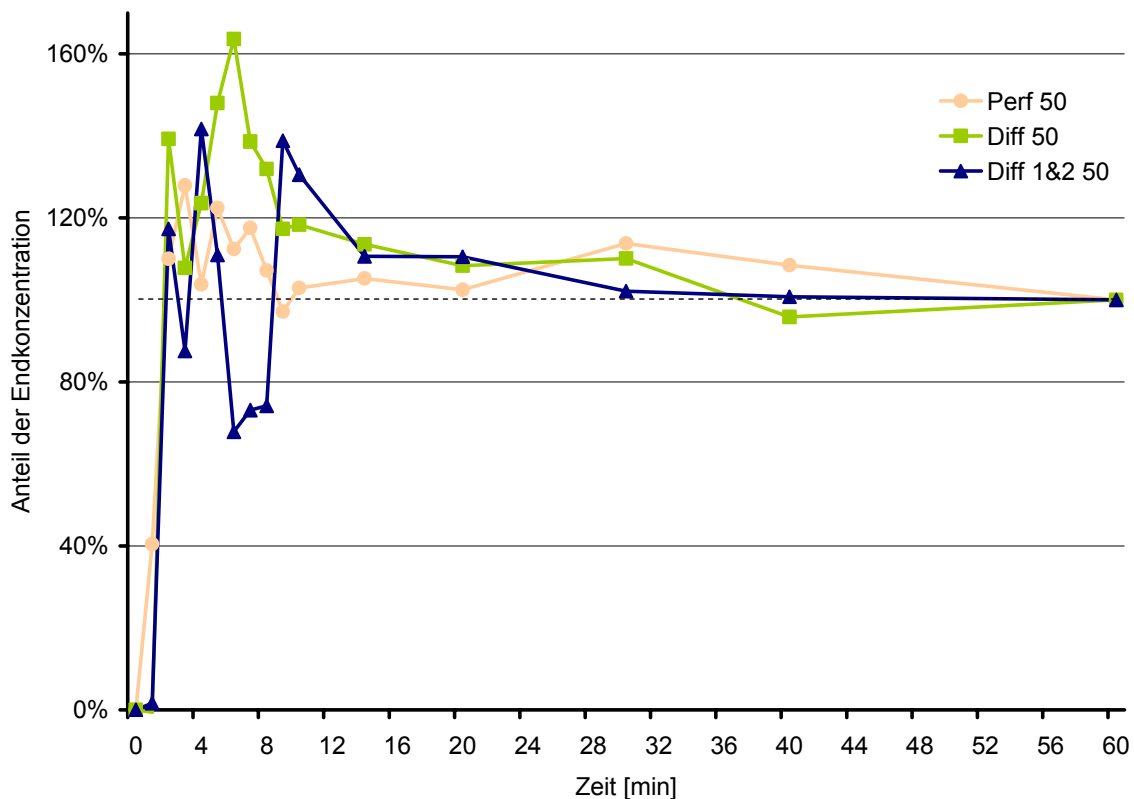
50 ml/min

Abb. 19: Durchmischungsdiagramm „zellbefüllt“ (H35, gestrichelte Linie = 100%) für die Flussrate 50 ml/min. Mischzeiten: Perfusion = 36:40 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 18:00 min., Diffusion (beide Kapillarbündel) = 23:20 min.

Mischzeiten „zellbefüllt“ (H35) bei 50 ml/min:

Perfusion 36:40 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 18:00 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 23:20 min.

Im zellbefüllten Reaktor zeigen alle drei Laufmodi zunächst einen schwankenden Verlauf. Die Ausschläge sind hier bei Perfusion am schwächsten und bei Diffusion durch beide Kapillarbündel am stärksten. Die Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt zwar zwischenzeitlich die höchste relative Konzentration, fällt dann aber gleichmäßig bis zur Endkonzentration ab. Die Plateauphase wird bei Perfusion und Diffusion durch ein Kapillarbündel nach etwa 10 Minuten und bei Diffusion durch beide Kapillarbündel nach etwa 14 Minuten erreicht. Eine Homogenität von $h \leq 0,1$ wird erst nach 36:40 min. bei Perfusion, nach 18:00 min. bei Diffusion durch ein Kapillarbündel und nach 23:20 min. bei Diffusion durch beide Kapillarbündel erreicht. Eine Cross Flow Einstellung war bei diesem Reaktor nicht möglich.

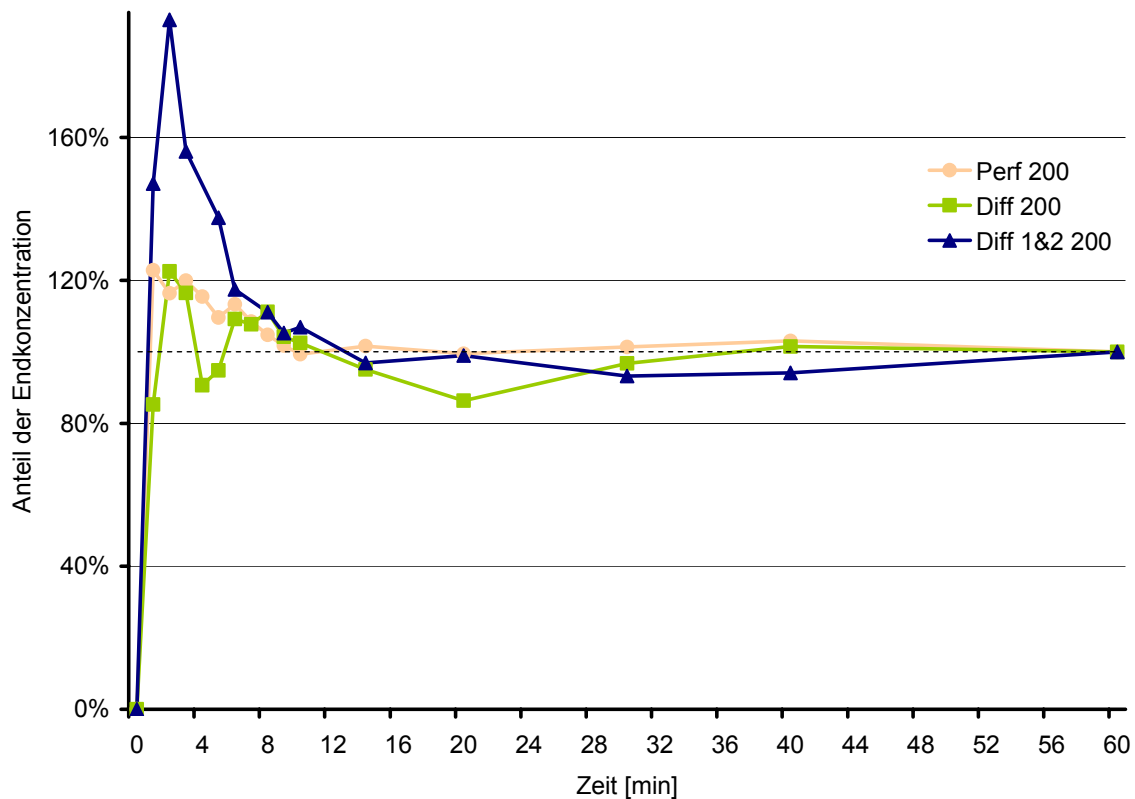
200 ml/min

Abb. 20: Durchmischungsdiagramm „zellbefüllt“ (H35, gestrichelte Linie = 100%) für die Flussrate 200 ml/min. Mischzeiten: Perfusion = 06:36 min., Diffusion (ein Kapillarbündel) = 23:38 min., Diffusion (beide Kapillarbündel) = 08:10 min.

Mischzeiten „zellbefüllt“ (H35) bei 200 ml/min:

Perfusion 06:36 min.

Diffusion durch ein Kapillarbündel 23:38 min.

Diffusion durch beide Kapillarbündel 08:10 min.

Bei einer Flussrate von 200 ml/min sind alle drei Kurven wesentlich gleichmäßiger, ohne die zuvor beobachteten Schwankungen. Lediglich die Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt noch leichte Schwankungen, insbesondere einen Abfall der Konzentration zwischen der 2. und 4. Minute und einen weiteren – leichten – Abfall nach 20 Minuten. Dieser zweite Abfall führt auch dazu, dass eine Homogenität von $h \leq 0,1$ erst nach 23:28 Minuten erreicht wird, obwohl die Plateauphase scheinbar bereits nach etwa 10 Minuten beginnt. Die Perfusion zeigt einen sehr gleichmäßigen Verlauf. Die Plateauphase wird nach etwa 8 Minuten erreicht, und eine Homogenität von $h \leq 0,1$ bereits nach 06:36 min. Anders als bei den Kurven bei höheren Flussraten im zellfreien Reaktor zeigt hier nicht die Diffusion durch ein Kapillarbündel, sondern die durch beide Kapillarbündel einen ausgeprägten Peak (193%) nach 2 Minuten. Anschließend

fällt die Konzentration gleichmäßig ab und erreicht nach etwa 9 Minuten die Plateauphase und nach 08:10 Minuten eine Homogenität von $h \leq 0,1$.

Mischzeiten bis zum Erreichen einer Homogenität von $h \leq 0,1$ im zellbefüllten Reaktor (H35)

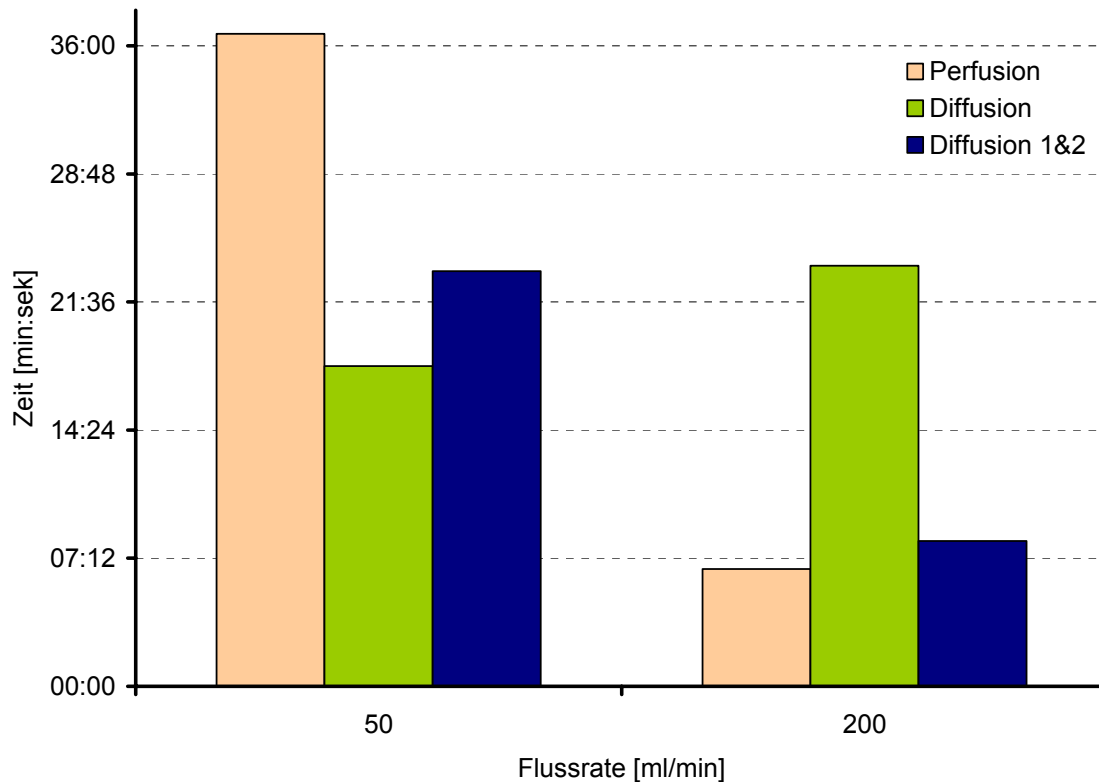


Abb. 21: Mischzeiten im zellbefüllten Reaktor (H35)

Die Mischzeiten bis zum Erreichen einer Homogenität von $h \leq 0,1$ im zellbefüllten Reaktor nehmen für die Perfusion und die Diffusion durch beide Kapillarbündel bei der höheren Flussrate ab. Die Perfusion zeigt bei 50 ml/min die in diesem Messzyklus längste Mischzeit und braucht dabei deutlich länger für das Erreichen der festgelegten Homogenität von $h \leq 0,1$ als die Diffusion durch ein oder beide Kapillarbündel. Bei 200 ml/min zeigen die Perfusion und die Diffusion durch beide Kapillarbündel ähnliche Mischzeiten. Die Diffusion durch ein Kapillarbündel zeigt bei 200 ml/min eine um etwa 5 Minuten längere Mischzeit als bei 50 ml/min. Sie hat hier einen deutlich höheren Wert als die beiden anderen Laufmodi.