

# 1 Einleitung und Zielsetzung

Trotz einer Vielzahl fundierter wissenschaftlicher Arbeiten sind Stofftransportprozesse an bzw. in biologischen Aggregaten in weiten Bereichen ungeklärt. Viele für den Einzelfall sehr gut beschriebene Phänomene sind nicht auf andere biologische Systeme übertragbar. Bei allen durch Mikroorganismen katalysierten Stoffumsatzprozessen muss der Mikroorganismus mit den dazu notwendigen Substraten in unmittelbaren Kontakt kommen. Um den katalytischen Prozess bei hohen Umsatzraten aufrecht zu erhalten, wie es insbesondere in der biotechnologischen Produktion angestrebt wird, müssen die am Ort verbrauchten Substrate kontinuierlich nachgeliefert werden. Diese Transportprozesse zum Ort des Umsatzes entscheiden in vielen Fällen über die maximal erreichbaren Umsatzraten.

In der vorliegenden Arbeit, die als Bestandteil des Teilprojekts B2 „Transport- und Reaktionsvorgänge in Biopellets“ im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 578 „Integration gen- und verfahrenstechnischer Methoden zur Entwicklung biotechnologischer Prozesse – Vom Gen zum Produkt“ durchgeführt wurde, sollen offene Fragen des Stofftransports (Stoffübergang, Diffusion, Konvektion) am Beispiel filamentöser Pilze untersucht werden. Diese eukaryotischen Organismen werden in der weißen Biotechnologie zunehmend zur Produktion von Wertstoffen für die Lebensmittel- oder Pharmaindustrie eingesetzt. Submers wachsen sie in Abhängigkeit der Kultivierungsbedingungen entweder als suspendiertes Myzel oder als kompakte, meist kugelförmige Aggregate, so genannte Pellets. Dabei entscheidet das angestrebte Produkt über die bevorzugte Morphologie. Grundsätzlich sind sowohl suspendierte als auch aggregierte Systeme mit der Frage des optimalen Stoffübergangs konfrontiert. Beide Kultivierungsstrategien führen zu Stofftransportlimitationen, entweder aufgrund einer ausgeprägten Viskositätserhöhung der Kultivierungsbrühe im Fall des freien Myzels oder aufgrund eines limitierten Stofftransports in die Pilzaggregate. Hier stellen der Stoffübergang aus der voll durchmischten Bulkphase an die Phasengrenze sowie der Transport innerhalb der filamentösen Struktur Engpässe für die biomassespezifische Produktivität dar.

Für die Beschreibung der Stofftransport- und Stoffumsatzprozesse in filamentösen Pilzpellets sind zahlreiche mathematische Modelle entwickelt worden [Grimm et al., 2005a], die in erster Linie auf eine realitätsnahe Beschreibung der Pellettbildung fokussieren. Die Vorhersage der Pellettmorphologie ist dabei zum Teil sehr anspruchsvoll, viele Modelle basieren auf der Betrachtung der Form und Entwicklung einzelner Hyphenelemente. In Modellen, die sich stärker auf die Abbildung von Stoffumsatz und -transport konzentrieren, werden meist mittlere morphologische Parameter wie die Pellettdichte herangezogen, welche die heterogene Pelletstruktur nur unzureichend abbilden. Die für eine Validierung notwendige detaillierte und quantitative Beschreibung der Pelletstruktur fehlt weitestgehend.

Mit der Mikroelektrodenteknik steht seit einigen Jahrzehnten ein wertvolles Werkzeug zur Bestimmung von Substratkonzentrationsverteilungen in biologischen Aggregaten zur Verfügung. Obgleich Konzentrationsprofile mit hoher örtlicher Auflösung gemessen werden können, wird in der Interpretation der gewonnenen Daten oft auf ingenieurstechnische Kennzahlen zurückgegriffen, denen stark vereinfachende Theorien zum Stofftransport zugrunde liegen. Diese sind nicht ohne weiteres auf jedes biologische System zu übertragen, jedoch ist auch hier die mangelhafte quantitative Beschreibung der Aggregatmorphologie der wichtigste einschränkende Faktor für eine Weiterentwicklung der Berechnungen.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es in diesem Zusammenhang, eine Methode für eine detaillierte, quantitative Charakterisierung der Pelletstruktur zu entwickeln. Hierfür wird die konfokale Laser Scanning Mikroskopie (CLSM) eingesetzt. Die auf diese Weise generierten Daten werden mit den aus Mikroelektrodenmessungen bestimmten, örtlich aufgelösten Informationen zur Substratkonzentrationsverteilung in den Aggregaten verknüpft. Der Fokus liegt hierbei auf der Suche nach systematischen Zusammenhängen zwischen Struktur, Stofftransport und Stoffumsatz in filamentösen Pilzpellets und deren mathematischer Modellierung. Neben einer kritischen Auseinandersetzung mit den Möglichkeiten und Grenzen der genannten Techniken wird der bisher nur mangelhaft in der Literatur beschriebene Einfluss der Fluidodynamik auf die Sauerstoffversorgung von Pellets systematisch untersucht. Dabei werden sowohl der externe Stoffübergangswiderstand als auch Stofftransportlimitationen innerhalb der Pellets berücksichtigt.

## 2 Stand des Wissens

### 2.1 Filamentöse Pilze

Schimmelpilze wie *Aspergillus* oder *Penicillium* gewinnen als eukaryotische Mikroorganismen zunehmend Bedeutung für die so genannte weiße Biotechnologie [Li et al., 2000; Grimm et al., 2005a]. Diese filamentösen Organismen gehören innerhalb der Klasse der Eumyceten (höhere Pilze) zur Gattung der Ascomyceten, der Schlauchpilze. Sie wachsen im Gegensatz zu prokaryotischen Mikroorganismen (Bakterien) nicht durch Zellteilung und -vermehrung sondern in Form von septierten Hyphen, die durch apikales Wachstum (Längenwachstum der Hyphen) und unterschiedlich starke Verzweigungen ein Pilzmyzel bilden [Nielsen und Krabben, 1995; Trinci, 1970]. Die Reproduktionsmechanismen dieser Gruppe sind sexuell oder asexuell, *Aspergillus niger* ist nur zur asexuellen Vermehrung befähigt. Bei dieser „unvollkommenen Fortpflanzung“, die ihn zu den Fungi imperfecti zählen lässt, bildet sich an der Hyphenspitze ein so genannter Konidiophor (Sporenträger) aus, der die namensgebenden, schwarzen Sporen (Konidien) trägt.

Pilze sind chemoorganoheterotrophe Organismen, sie beziehen also die Energie für ihren Stoffwechsel aus der Oxidation chemischer Verbindungen (chemo), die für die Gewinnung von Reduktionsäquivalenten organisch sein müssen (organo). Auch bezüglich der Kohlenstoffquelle für den Aufbau der eigenen Zellsubstanz sind sie auf organische Moleküle angewiesen (heterotroph). Als Eukaryoten sind sie aerob und erfüllen in den Ökosystemen zusammen mit den prokaryotischen Bakterien in erster Linie die Funktion der mikrobiellen Destruenten. Besonders bedeutend sind sie für die Zersetzung der Makromoleküle pflanzlicher Zellsubstanz wie Cellulose und Lignin. Wie die meisten anderen Nahrungssubstrate sind diese Polymere nicht leicht verfügbar, da sie zu groß sind, um in die Zelle aufgenommen werden zu können. Pilze verfügen daher über ein breites Spektrum extrazellulärer Enzyme, die in das umgebende Medium ausgeschieden werden, um die Makromoleküle zu depolymerisieren.

### 2.1.1 Filamentöse Pilze in der weißen Biotechnologie

In der biotechnologischen Produktion lassen sich mit Schimmelpilzen sowohl Enzyme (wie Proteasen und Amylasen [Li et al., 2000]) als auch Chemikalien (z.B. Zitronensäure [Zidwick, 1991]) und pharmazeutische Wirkstoffe wie Antibiotika (z.B. Penicillin und Cephalosporin [Rambosek, 1991]) mit hoher Effizienz ökonomisch produzieren [Grimm et al., 2005a]. Ein Grund dafür ist das breite Spektrum an preiswerten Substraten, das diese Pilze zu nutzen befähigt sind. Dabei erreichen sie hohe Produktionsraten und Produktausbeuten; dies basiert nicht zuletzt auf den effektiven Sekretionssystemen, die ein Ausschleusen des gewünschten Produktes in die Kultursuspension ermöglichen [Conesa et al., 2001]. Damit wird die intrazelluläre Produktkonzentration gering gehalten und so eine mögliche Feedback-Hemmung des Produktes auf seine Synthese weitgehend verhindert. Auf der Produktgewinnungsseite werden darüber hinaus die Aufarbeitungsschritte des Downstream-Processing deutlich erleichtert. Hier muss im Vergleich zu vielen durch Bakterien intrazellulär gebildeten Metaboliten kein Zellaufschluss erfolgen, da das Produkt aus dem Überstand der Kultursuspension gewonnen werden kann.

Das große Interesse der biotechnologischen Industrie – insbesondere der pharmazeutischen – an Pilzen wie *Aspergillus niger* beruht auf einer weiteren wichtigen Eigenschaft, die sie deutlich von den prokaryotischen Bakterien unterscheidet. Als eukaryotische Expressionssysteme sind sie zu einer korrekten Glycosylierung und posttranslationalen Modifikation von Enzymen und therapeutischen Proteinen befähigt [Wang et al., 2003]. Aufgrund der genannten Eigenschaften und einer kontinuierlichen Weiterentwicklung von Expressionsvektoren und Wirtszellen werden sie zunehmend als alternative Expressionssysteme gegenüber Bakterienzellen, Hefen oder Zellkulturen für heterologe (artfremde) Proteine genutzt [Punt et al., 2002; Sigoillot et al., 2004].

### 2.1.2 Kultivierungsstrategien und Morphologie

In der Regel werden filamentöse Pilze aufgrund ihres guten Sekretionssystems submers, meist in Rührkesselreaktoren, kultiviert. Die wichtigste verfahrenstechnische Anforderung besteht dabei darin, die Organismen mit allen notwendigen Substraten und Nährstoffen in ausreichendem Maße zu versorgen.

Sowohl Kohlenstoffquellen wie Zucker, Alkohole oder Säuren als auch Nährsalze oder Suppline können dem Pilz in der Kultursuspension in hohen Konzentrationen zur Verfügung gestellt werden. Der für die aeroben Organismen notwendige Sauerstoff ist jedoch nur sehr schlecht wasserlöslich, sodass er in der Regel über weite Teile der Kultivierung das limitierende Substrat darstellt und permanent durch Belüftung des Systems nachgeliefert werden muss.

Je nach Kultivierungsbedingungen treten filamentöse Pilze in den Reaktoren als disperses Myzel oder kompakte, meist kugelförmige Aggregate, so genannte Pellets auf [Metz und Kossen, 1977; Bellgardt, 1998]. Beide Morphologien unterscheiden sich in ihrem rheologischen Verhalten [Metz et al., 1979], aber auch bezüglich der Stoffübergangs- und Stofftransportprozesse im Reaktionssystem grundlegend voneinander. Das Wachstum der Pilze als freies Myzel führt zur Bildung eines verzweigten Netzes von Hyphen, das die Kultursuspension durchzieht und ihr strukturviskose und viskoelastische Eigenschaften verleiht. Folge der hohen Viskosität und des daraus resultierenden pseudoplastischen Fließverhaltens ist, dass der Stoffübergang von der Gasphase der eingetragenen Blasen in die Flüssigphase des Kulturmediums erschwert ist und damit den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt des Stofftransports darstellt [Mattern et al., 1992; McNeil und Harvey, 1993; Olsvik und Kristiansen, 1994; Gibbs et al., 2000]. Eine ausreichende Belüftung wird in derartigen Kultivierungen über große Gasvolumenströme und hohe Leistungseinträge der Rührersysteme gewährleistet. Die daraus resultierende hohe Scherbeanspruchung des Myzels kann zu einer herabgesetzten Produktivität führen [Prosser und Tough, 1991; Makagiansar et al., 1993]. Bezüglich der Konzentrationen anderer Substrate können insbesondere bei Zufütterungsstrategien deutliche Gradienten innerhalb des Systems auftreten [Bylund et al., 1998]. Die Geschwindigkeit des Stoffübergangs von der Bulkphase an die Pilzhyphen ist aufgrund der großen Austauschflächen zwischen Bulkphase und Myzel von untergeordneter Bedeutung für die Produktivität des Gesamtsystems.

Pellets entstehen nach heutigem Wissensstand durch drei unterschiedliche Prozesse, die artspezifisch zu sein scheinen [Metz und Kossen, 1977; Nielsen, 1996; Grimm et al., 2004]. Bei der Hyphenaggregation kommt es zu einem Verhaken und Verklumpen von aus einzelnen Sporen entstandenen Hyphen und Myzelbäumen, Beispiel hierfür ist *Penicillium chrysogenum*. Bei einigen Streptomycceten kann durch den so genannten nicht-koagulativen Bildungsprozess ein Pellet aus

einer einzigen Spore entstehen. Bei dem dritten Pelletbildungsprozess, der auch für *Aspergillus niger* charakteristisch ist, erfolgt eine Aggregation bereits auf der Ebene der Sporen (koagulativer Bildungsprozess). Hier kommt es aufgrund von Oberflächeneigenschaften zu einer Zusammenlagerung von Sporen und auskeimenden Hyphen [Grimm et al., 2005b]. Die im weiteren Kultivierungsverlauf unter dem Einfluss von fluiddynamischer Beanspruchung kugelförmig wachsenden Aggregate sind oftmals durch eine hohe Anzahl an nicht ausgekeimten Sporen im Pelletkern charakterisiert.

Eine Kultivierung des Pilzmyzels in Pelletform führt nur zu einer geringfügigen Erhöhung der Suspensionsviskosität, sodass das Fließverhalten wässrig und newtonsch bleibt. Dies bedeutet einen deutlich besseren Stoffübergang von der Gas- in die Flüssigphase, der sogar mit der Zunahme der Biomassekonzentration im Reaktor steigen kann [Galaction et al., 2004]. Jedoch stellt hier der Stoffübergang des gelösten Sauerstoffs sowohl an die Pelletoberfläche als auch der Transport in das Innere der Aggregate eine maßgebliche Limitation dar [Yano et al., 1961; Huang und Bungay, 1973; Cui et al., 1998a; Escamilla Silva et al., 2001]. Im Aggregat treten in der Regel Konzentrationsgradienten von Substraten auf, sodass sich die Hyphen in den verschiedenen Tiefen im Pellet in unterschiedlichen Zuständen der Nährstofflimitation befinden.

Beide Kultivierungsstrategien – Myzel oder Pellet – finden in der industriellen Produktion Anwendung. Welche Morphologie jedoch bevorzugt wird, hängt maßgeblich von dem gewünschten Produkt ab [Papagianni, 2004]. Dabei ist keinesfalls grundlegend verstanden, auf welchen Zusammenhängen dies basiert. Höhere Biomassedichten sind oftmals mit dispersem Myzel erreichbar, darüber hinaus wird insbesondere die in der Regel geringere Sauerstofflimitation als Begründung höherer Produktionsraten angeführt [Carlsen et al., 1996; Paul et al., 1999]. Mögliche Vorteile pelletösen Wachstums sind etwa eine erhöhte Hyphenspitzenanzahl bzw. Anzahl von Verzweigungen, die durch das permanente Abscheren der Aggregate erreicht wird. Bei Produkten, die bevorzugt in diesen physiologisch aktivsten, apikalen oder auch subapikalen Verzweigungsregionen der Hyphe gebildet werden, führt dies zu höheren, biomassespezifischen Ausbeuten [Schügerl, 2005]. Auch die Tatsache, dass die Produktsekretion vorwiegend apikal erfolgt, wird in diesem Zusammenhang diskutiert [Wösten et al., 1991; El-Enshasy, 1998; Wongwicharn et al., 1999]. Des Weiteren fällt die Bildung extrazellulärer Pro-

teasen, die insbesondere bei der Produktion von heterologen Proteinen einen negativen Einfluss auf die Stabilität des Produktes in der Kultursuspension haben, bei Pelletkultivierungen zum Teil geringer aus [Xu et al., 2000]. Auch sauerstoffsensitive Produktbildungsprozesse können aufgrund der in den Pellets auftretenden Konzentrationsgradienten unter Umständen besser realisiert werden als mit dispersem Myzel. Gray et al., 1966, beschrieben, dass eine Sauerstofflimitation den vollständigen Ablauf des Tricarbonsäurezyklus einschränken und damit die Akkumulation von Intermediaten fördern kann. Es wurde postuliert, dass die hohen, mit *Aspergillus niger*-Pellets zu realisierenden Produktionsraten von Zitronensäure auf diesen Effekt zurückzuführen sind [Papagianni et al., 1994]. Auf der anderen Seite gibt es aber auch viele Beispiele dafür, dass gewisse Produkte gerade aufgrund dieser Sauerstofflimitation nur von freiem Myzel gebildet werden, wie etwa Penicillin durch *Aspergillus nidulans* [Moore und Bushell, 1997]. Noch sind die Zusammenhänge zwischen Produktivität und Morphologie nicht bis ins Detail verstanden. Aus verfahrenstechnischer Sicht kann die Morphologie jedoch beispielsweise über den Leistungseintrag in das System gesteuert werden (u.a. Cui et al., 1997, 1998a, Hellendoorn et al., 1998, Casas López et al., 2005 und Kelly, 2006).

## 2.2 Stoffübergang, Stofftransport und Stoffumsatz

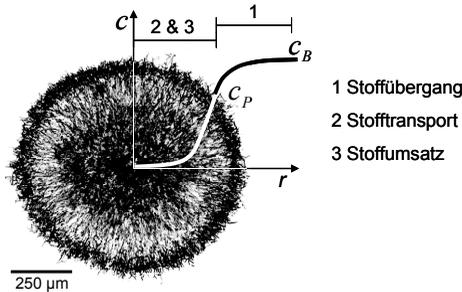
Die Substratversorgung filamentöser Pilzpellets in Submerskultivierungen kann in drei Prozesse aufgegliedert werden:

- Stoffübergang aus der das Pellet umgebenden Bulkphase an die Oberfläche des Pellets
- Stofftransport innerhalb des Aggregats
- Stoffumsatz innerhalb des Aggregats (siehe **Abbildung 2.1**).

Jeder dieser Prozesse hat das Potential, die Geschwindigkeit des Gesamtumsatzes eines Pellets zu bestimmen.

Der Begriff Stoffübertragung beschreibt allgemein den Transport einer oder mehrerer Komponenten eines Gemisches fluider oder fester Stoffe innerhalb einer Phase oder über Phasengrenzflächen hinweg. Als Stoffübergang wird dabei die

Stoffübertragung innerhalb einer Phase bis an die Phasengrenzfläche bezeichnet, der Stoffdurchgang ist definiert durch den Transport eines Stoffes aus dem Kern der einen Phase in den Kern einer anderen Phase. Die treibende Kraft für Stoffübertragungsprozesse sind Konzentrations-, Temperatur- und Druckgradienten [Baehr und Stefan, 2004].



**Abbildung 2.1:** Schematische Darstellung der den Gesamtumsatz eines Pellets limitierenden Größen anhand einer CLSM-Aufnahme eines Pelletschnitts und eines Substratkonzentrationsprofils;  $c_B$ : Konzentration des reaktiven Stoffes in der Bulkphase,  $c_P$ : Konzentration am Pelletrand

Es werden zwei grundlegende Arten der Stoffübertragung unterschieden: diffusive und konvektive Stoffübertragung. Die Stoffübertragung durch Diffusion erfolgt durch eine ungeordnete, zufällige Bewegung von Teilchen aufgrund ihrer kinetischen Energie (BROWNSche Molekularbewegung). Der Nettofluss der Materie findet dabei von hoher zu niedriger Konzentration gegen einen bestehenden Konzentrationsgradienten statt, sodass das Konzentrationsgefälle ausgeglichen wird. Dieser sehr langsame Transportprozess hat nur dann eine entscheidende Bedeutung, wenn keine konvektive Strömung vorliegt [Atkins, 2001]. Der konvektive Stoffübergang ist durch die Stoffübertragung von einem strömenden Fluid an die Oberfläche eines anderen Stoffes gekennzeichnet und abhängig von den Stoffeigenschaften des Fluids und der Art der Strömung. Er tritt nie allein auf, sondern ist immer von einem diffusiven Stoffübergang begleitet.

Für die Beschreibung des Stoffübergangs an die Oberfläche von Pilzpellets sind zwei Theorien bedeutend: die der hydrodynamischen Grenzschicht und die der Konzentrationsgrenzschicht.

### 2.2.1 Fluidynamik und hydrodynamische Grenzschicht

Grundlage der Betrachtung der hydrodynamischen Grenzschicht ist die Haftbedingung, nach welcher die Strömungsgeschwindigkeit eines Fluids unmittelbar an der Wand eines Körpers aufgrund der Reibung zwischen Festkörper und Fluid den Wert „Null“ hat [Kraume, 2004]. Sie ist definiert als der Teil des strömenden Fluids, dessen Geschwindigkeit durch die Reibung an der Grenzfläche beeinflusst wird. Für die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum Stofftransport ist der Strömungszustand an der Partikel von Interesse. Dieser kann in der Theorie durch die Umströmung einer Kugel beschrieben werden. Die Basis dieser Beschreibung bilden dabei die stark vereinfachenden Annahmen der Kugelgestalt von Pellets und einer scharf begrenzten Oberfläche und somit Phasengrenze zur umgebenden Flüssigkeit. Für die Beschreibung des Strömungszustandes an einer Kugel ist eine REYNOLDS-Zahl an der Partikel  $Re_p$  (bzw. REYNOLDS-Zahl am Pellet) definiert, diese dimensionslose Kennzahl beschreibt das Verhältnis der an den Strömungsvolumenelementen angreifenden Trägheitskraft zu der Zähigkeitskraft (inneren Reibungskraft) [Jakubith, 1998]:

$$Re_p \equiv \frac{w_p \cdot d_p}{\nu} \quad (2.1)$$

mit der Strömungsgeschwindigkeit an der Partikel  $w_p$ , dem Kugeldurchmesser (bzw. Pelletdurchmesser)  $d_p$  und der kinematischen Viskosität des Fluids  $\nu$ .  $w_p$  entspricht in dieser Arbeit aufgrund des gewählten Versuchsaufbaus des Strömungsrohrs (vgl. Kapitel 3.3.3) der in der Rohrmitte herrschenden maximalen Geschwindigkeit  $w_{max}$  und kann je nach Strömungsbedingung im Rohr aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit berechnet werden [Christen, 2005]. Das strömende Fluid haftet aufgrund der auftretenden Reibung an der Oberfläche der umströmten Kugel. Innerhalb der PRANDTLschen Grenzschicht steigt die Strömungsgeschwindigkeit auf den Wert der freien Strömung an [Brauer, 1985]. Je nach der REYNOLDS-Zahl an der Partikel kann die Ausprägung der hydrodynamischen Grenzschicht durch charakteristische Merkmale beschrieben werden [Jakubith, 1998]:

1. Bei  $Re_p < 1$  tritt schleichende Strömung um die Partikel auf. Um die gesamte Partikel bildet sich eine geschlossene, laminare Strömung aus, die sich weder

von der Kugeloberfläche löst, noch Wirbel oder Wirbelschleppen im Nachlaufgebiet der Kugel verursacht.

2. Der Bereich zwischen  $1 < Re_p < 1000$  wird als Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung bezeichnet. Durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit und die gleichzeitig ansteigenden Trägheitskräfte der strömenden Fluidteilchen beginnt sich die Strömung auf der strömungsabgewandten Seite der Kugel von der Kugeloberfläche abzulösen. Der Ablösepunkt verschiebt sich dabei mit zunehmender REYNOLDS-Zahl an der Partikel  $Re_p$  in Richtung des Kugeläquators, zugleich wird die durch das Ablösen verursachte Wirbelschleppe im Strömungsschatten der Kugel und mit ihr der Strömungswiderstand vergrößert.

Unter- und überkritische Strömungszustände bei höheren REYNOLDS-Zahlen an der Partikel (vgl. z.B. Bohl, 1991) werden im System Rührreaktor höchstens als Spitzen, jedoch nicht als mittlere Beanspruchung erwartet (vgl. Kapitel 4.2.2.1) und werden hier daher nicht betrachtet.

### **2.2.2 Konzentrationsgrenzschicht und Stoffübergangskoeffizient**

Die treibende Kraft des Stoffübergangs eines reaktiven Substrats aus der Flüssigphase an eine Phasengrenzfläche ist der aufgrund des Verbrauchs des Substrats an der Phasengrenzfläche existierende Konzentrationsunterschied. Hier bildet sich ein Konzentrationsgradient aus, der diesen Konzentrationsunterschied über die Ausdehnung einer so genannten Konzentrationsgrenzschicht  $L_c$  auszugleichen sucht. Als Massestromdichte  $j$  wird die Stoffmenge definiert, die pro Zeiteinheit und Phasengrenzfläche senkrecht durch die Grenzschicht und an die Phasengrenzfläche übertragen wird. Da in klassischen Theorien des Stoffübergangs innerhalb der Konzentrationsgrenzschicht nur Transport, nicht aber Verbrauch stattfindet, ist die Massestromdichte innerhalb der Konzentrationsgrenzschicht unveränderlich. Sie ist ein häufig verwendeter Parameter zur Beschreibung der Umsatzleistung eines katalytischen Systems, da an einer Reaktionsfläche nur soviel Stoff verbraucht werden kann, wie durch Diffusion zur Wand gelangt und nur so viel zur Wand diffundiert, wie durch die Reaktion verbraucht wird. Demnach stimmen die Beträge von Reaktions- und Stoffstromdichte überein [Brauer, 1971, 1985].