

1 Flux

1.1	Symbole	1
1.2	Einleitung	2
1.3	Kritischer Flux	2
1.4	Limiting Flux LF	3
1.5	Vergleich zwischen Critical Flux und Limiting Flux	4

1.1 Symbole

Symbol	Bedeutung	Einheit
J	Flux (Permeatfluss pro Membranfläche)	L/(m ² h) (lmh) oder m/s
J_{crit}	Critical flux (Grenzfluss für Foulingbeginn)	wie J
J_{lim}	Limiting flux (maximal erreichbarer Flux)	wie J
A	aktive Membranfläche	m ²
V_P	Permeatvolumen	L oder m ³
\dot{V}_P	Permeatvolumenstrom	L/h oder m ³ /h
V	Flüssigkeitsvolumen im Tank / Modul	m ³ oder L
c	Konzentration einer gelösten Komponente	kg/m ³ oder g/L
c_b	Konzentration im Bulk	wie c
c_m	Konzentration an der Membranoberfläche	wie c
ΔP	Transmembrandruck (TMP)	Pa oder bar
η	dynamische Viskosität der Flüssigkeit	Pa s
T	Temperatur	°C oder K
u	Crossflow-Geschwindigkeit / Querströmung	m/s
D	Diffusionskoeffizient	m ² /s
δ	Grenzschichtdicke der Konzentrationspolarisation	m
k	Massenübergangskoeffizient	m/s
R_{tot}	Gesamtwiderstand	1/m oder dimensionslos (modellabhängig)
R_m	Membranwiderstand	wie R_{tot}
R_f	Foulingwiderstand	wie R_{tot}
\dot{m}	Massenstrom einer Komponente	kg/h
ρ	Dichte der Lösung	kg/m ³

Tabelle 1.1 Übersicht der beim Flux verwendeten Symbole und Einheiten

1.2 Einleitung

Der Flux J steht in der Membrantechnik für die Menge an Flüssigkeit, die pro Zeiteinheit durch die Membranfläche strömt.

Üblicherweise wird J in der Einheit $\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}$ angegeben, die in der Praxis als lmh abgekürzt wird.

1.3 Kritischer Flux

Der kritische Flux J_{crit} (engl. critical flux) ist der maximale Membranpermeatfluss, der ohne irreversible Verschmutzung aufrechterhalten werden kann. Der Betrieb eines Membransystems unterhalb dieses Flusswertes minimiert oder verhindert die Ansammlung einer Verschmutzungsschicht, was einen stabilen, langfristigen Betrieb und einen geringeren Reinigungsaufwand ermöglicht.

Sobald der kritische Flux überschritten wird, beginnt sich Material anzulagern, schneller als es abtransportiert werden kann.

Unterhalb des kritischen Flusses bleibt der Permeatstrom über die Zeit stabil, da sich eine Gelschicht oder ein dünner, stabiler Biofilm bildet, der entweder kontrolliert werden kann oder aktiv zur Entfernung von Verschmutzungen beiträgt.

Oberhalb des kritischen Flusses macht sich eine irreversible Verschmutzung bemerkbar, was zu einem kontinuierlichen Anstieg des Membranwiderstands und einem Leistungsabfall führt. Im kritischen Flussmodell ist die Verschmutzungsrate ab diesem signifikant. Dies liegt daran, dass die Kräfte, die zur Ansammlung von Verschmutzungen führen, die Kräfte überwiegen, die die Membran sauber halten.

Dr. R. W. Field (University of Bath) prägte dieses Konzept und zeigte, dass ein Membranprozess oberhalb dieses Grenzwertes in einen Zustand eintritt, in dem Fouling der dominierende Prozess wird. Der Filtrationsvorgang verliert damit seinen linearen Charakter. Drucksteigerungen erhöhen den Flux nicht mehr proportional, sondern beschleunigen lediglich die Bildung einer immer dichten Schicht. Die Kenntnis des kritischen Flux wird so zu einer Art Warnsignal.

Der kritische Flux hängt empfindlich von Temperatur und Viskosität ab. Schon kleine Temperaturänderungen können den Wert deutlich verschieben. Auch die Modulgeometrie beeinflusst den kritischen Punkt.

Modulspezifische Parameter wie Kanalhöhe oder Strömungsführung tragen entscheidend zu seinem Wert bei. Wird eine Membran unterhalb dieses kritischen Punktes betrieben, bleibt die Deckschicht meist dünn und stabil. Die Leistung bleibt dadurch über lange Zeiträume hinweg erstaunlich konstant. Das System wirkt dann, als hätte es einen natürlichen Selbstreinigungsmechanismus.

Mit zunehmender Schichtdicke steigt auch der Widerstand, den die Flüssigkeit überwinden muss. Mit der Zeit sinkt die Permeatleistung merklich und unwiderruflich. Dieser Rückgang wirkt oft harmlos, bis er plötzlich dramatisch wird. Das Überschreiten des kritischen Flux markiert daher den Beginn einer stillen, aber stetig fortschreitenden Instabilität.

Die Konzentrationspolarisation intensiviert sich und verschiebt das System weiter in eine ungünstige Richtung. Der Prozess reagiert dann verzögert, aber umso heftiger auf Belastungsänderungen. Die Kontrolle des Betreibers nimmt spürbar ab. Gleichzeitig wächst das Risiko eines irreversiblen Foulings.

Je länger dieser Zustand anhält, desto schwieriger wird es, die ursprüngliche Leistungsfä-

higkeit wiederherzustellen. Aus diesem Grund gilt der critical flux als eine der zentralen Orientierungsgrößen der modernen Membrantechnik. Er zeigt, wo die Grenze zwischen nachhaltiger Filtration und fortschreitender Verschmutzung verläuft. Darum bildet er den Schlüssel für einen sicheren, stabilen und energieeffizienten Betrieb komplexer Membranprozesse.

1.4 Limitierender Flux

Der Limiting Flux J_{crit} (engl. limiting flux) beschreibt jenen Punkt, an dem die Membran ihre maximale Leistungsfähigkeit erreicht hat und der Prozess in einen Gleichgewichtszustand übergeht. Bis zu diesem Grenzwert steigt der Flux noch spürbar mit dem Druck an.

Doch sobald der limitierende Flux erreicht ist, bleibt die Permeatleistung mehr oder weniger auf gleichem Niveau, egal wie stark der Transmembrandruck weiter erhöht wird. In diesem Zustand dominiert die Konzentrationspolarisation das Geschehen und begrenzt den Nettofluss durch rein physikalische Transportmechanismen.

Versuche, den Transmembrandruck zu erhöhen, verlieren an Wirksamkeit, weil jede zusätzliche Kraft sofort durch stärkere Anreicherung an der Oberfläche kompensiert wird. Die Filtration erreicht eine Art Sättigung, die nur durch veränderte Strömungsbedingungen oder geringere Konzentrationen durchbrochen werden kann. Im Gegensatz zum kritischen Flux J_{crit} handelt es sich beim limitierenden Flux J_{lim} nicht um einen plötzlichen Kippunkt, sondern um einen stabilen, aber hartnäckigen Grenzwert.

Dieser Grenzwert wurde in zahlreichen Studien untersucht und beschreibt den theoretischen Maximalfluss, der allein durch die Gleichgewichte von Diffusion und Anströmung bestimmt wird. Unterhalb des limitierenden Flux bleibt der Prozess kontrollierbar und reagiert berechenbar auf Druckänderungen. Doch sobald dieser Grenzwert erreicht ist, verliert Druck als Stellgröße fast vollständig an Einfluss. Vielmehr entscheidet nun die Diffusionsgeschwindigkeit, wie viel Lösungsmittel die Membran überhaupt noch passieren kann.

Das System verhält sich dann, als wäre eine unsichtbare Mauer vor der Membran errichtet worden. Jede zusätzliche Druckerhöhung verstärkt lediglich die Anlagerung von Stoffen in der Grenzschicht. Dies führt zu einer noch stärkeren Konzentrationspolarisation, ohne dass der Permeatfluss nennenswert steigt. Der limitierende Flux ist damit ein Ausdruck reiner Massentransportbegrenzung.

Die genaue Lage dieses Grenzwertes hängt von den Stoffeigenschaften, Art der Membran, Strömungsbedingungen, Temperatur, Viskosität und anderen Variablen ab. Die effektive Strömungsgeschwindigkeit spielt eine entscheidende Rolle. Eine höhere Strömungsgeschwindigkeit (und dadurch erhöhte Turbulenzen) kann den limitierenden Fluss anheben, indem sie die Grenzschicht dünner hält. Eine niedrige Strömung hingegen führt zu einer rascheren Sättigung direkt an der Oberfläche. Deshalb ist der limitierende Flux auch stark vom hydrodynamischen Design des Moduls abhängig. Schmale Kanäle, hohe Geschwindigkeiten und turbulente Strömung können ihn deutlich erhöhen. Breite Kanäle oder laminare Strömungen dagegen senken ihn spürbar ab.

Wird der limitierende Flux erreicht, wächst die Gefahr, dass sich die Grenzschicht weiter verdichtet und in den Bereich des Fouling übergeht. Der Wert fungiert daher als technischer und physikalischer Orientierungspunkt. Er zeigt, wo die Filtration nicht weiter beschleunigt werden kann, ohne die Prozessbedingungen grundlegend zu verändern.

Kenntnisse über den limitierenden Flux sind eine der zentralen Größen für das Verständ-

nis und die Optimierung von Membranprozessen.

1.5 Vergleich zwischen kritischem Flux (KF) und limitierendem Flux (LF)

Der KF und der LF beschreiben zwei unterschiedliche, aber eng verwandte Grenzzustände der Membranfiltration. Der KF markiert den Übergang von einem weitgehend foulingfreien Betrieb zu einem Bereich, in dem sich Anlagerungen unweigerlich bilden. Er ist damit ein dynamischer Kipppunkt, an dem ein scheinbar stabiles System innerhalb kurzer Zeit in eine Verschmutzungsphase übergeht.

Der LF hingegen beschreibt den maximal erreichbaren Flux, der allein durch Diffusions- und Transportprozesse begrenzt ist.

Während der KF das Verhalten der Membranoberfläche bestimmt, definiert der LF die physikalische Leistungsgrenze des gesamten Systems. Unterhalb des KF bleibt die Membran sauber, oberhalb beginnt Fouling. Unterhalb des LF steigt der Flux mit Druck, oberhalb bleibt er unverändert.

Der KF reagiert stark auf hydrodynamische Bedingungen und Rücktransportmechanismen, weil sie über die Anlagerung von Stoffen entscheiden. Der LF reagiert dagegen primär auf Diffusion, Konzentrationsgradienten und Strömungsverhältnisse in der Grenzschicht.

Der KF kann durch Optimierung der Strömung oder Reinigung deutlich verschoben werden, während der LF oft nur durch grundlegende Prozessänderungen beeinflusst werden kann.

In vielen Anwendungen liegt der KF deutlich unterhalb des LF, was einen sicheren Betriebsbereich schafft. Wird über dem KF filtriert, nähert sich das System mit zunehmender Deckschichtbildung dem LF an.

Der LF wirkt dabei wie ein hartes physikalisches Dach, das selbst durch extreme Drucksteigerungen nicht durchbrochen werden kann. Der KF dient deshalb vor allem als Warnsignal für beginnendes Fouling, während der LF als Leistungsgrenze verstanden wird.

	<i>Critical flux</i>	<i>Limiting flux</i>
Definition	Beginn von Fouling.	Maximal erreichbarer Flux.
Systemverhalten	Unterhalb stabil, oberhalb Anlagerungen.	Unterhalb druckabhängig, oberhalb druckunabhängig.
Charakter	Dynamischer Übergang.	Statischer Sättigungswert.
Mechanismen	Rücktransport, Strömung, Oberflächenprozesse.	Diffusion, Konzentrationspolarisation.
Druckeinfluss	Erhöhter Druck verstärkt Fouling.	Erhöhter Druck erhöht Flux kaum.
Abhängigkeit	Stark strömungs- und temperaturabhängig.	Stark diffusions- und lösungsabhängig.
Betriebsrelevanz	Warnsignal für Foulingbeginn.	Physikalische Leistungsgrenze.
Optimierbarkeit	Gut durch Betriebsführung beeinflussbar.	Nur durch Prozessänderung verschiebbar.
Relative Lage	Oft deutlich darunter.	Oberes Limit der Filtration.

Der Fluxabfall ist daher ein natürlicher, aber dennoch unerwünschter Begleiter jeder

Filtration. Er entsteht, weil zurückgehaltene Stoffe sich unaufhaltsam an oder in der Membran anreichern. Diese Anlagerung erschwert den Transport des Lösungsmittels und bremst den Filtrationsprozess aus. Dennoch muss unterschieden werden zwischen reversiblen Konzentrationspolarisationsschichten und echtem Fouling.

Reversible Schichten lassen sich durch Crossflow und Spülungen meist wieder entfernen. Fouling dagegen kann sich tief in die Poren hineinsetzen und wird so zum hartnäckigen Problem. Der kritische Flux lässt sich experimentell bestimmen, indem man die Membran mit verschiedenen Durchflüssen testet.

Mathematische Modelle können eine Schätzung liefern, doch ihre Genauigkeit bleibt begrenzt. Darum bleibt der experimentelle Nachweis für viele Anwendungen unersetzlich.

Besonders bei Proteinlösungen wird die exakte Kenntnis des kritischen Fluxes zu einem entscheidenden Faktor. Schliesslich bildet diese Kennzahl die Grundlage für die sichere, wirtschaftliche und stabile Auslegung von Membransystemen.