

Determinismus

1	Determinismus	2
2	Determinismus in technischen Systemen	2
2.1	Mess- und Regeltechnik	2
2.2	Membrananlagen	3
3	Upscaling	3
3.1	Abgrenzung zu probabilistischen Ansätzen	4

1 Determinismus

Determinismus ist die Annahme, dass bei gleichen Anfangsbedingungen und gleichen Einflüssen immer dasselbe Ergebnis entsteht.

2 Determinismus in technischen Systemen

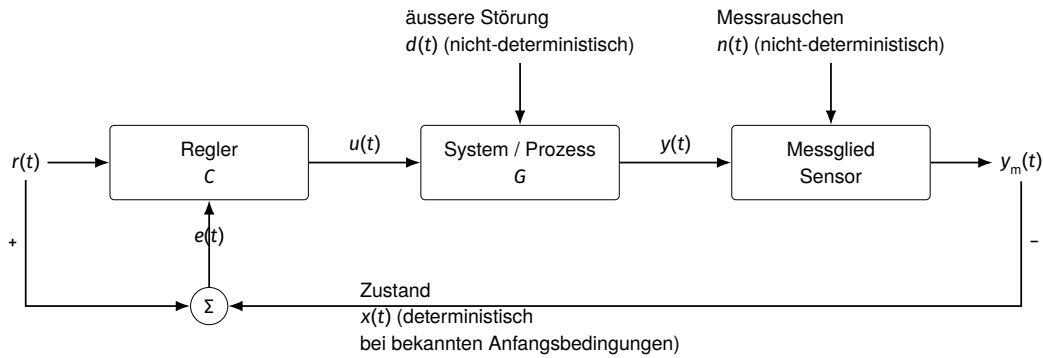
Wenn ein System deterministisch ist, dann gilt: Gleicher Start → gleicher Ablauf → gleiches Resultat. Es gibt keinen Zufall, sondern feste Regeln oder Gesetze. Ein korrekt programmiertes Rechenprogramm liefert bei gleichem Input immer denselben Output.

Deterministisch ist ein System dann, wenn es festen Regeln oder Naturgesetzen folgt und sein Verhalten bei bekannten Anfangsbedingungen mit Sicherheit vorhergesagt werden kann. Das Ergebnis eines deterministischen Prozesses ist eindeutig durch die Eingangsgrößen und den aktuellen Systemzustand bestimmt. Zufällige oder unbestimmte Einflüsse sind in einem ideal deterministischen System nicht enthalten. Demgegenüber stehen nicht-deterministische Systeme, deren Verhalten zumindest teilweise von Zufälligkeit, Unsicherheit oder nicht vollständig bekannten Einflüssen geprägt ist. In solchen Systemen kann das Ergebnis nicht eindeutig vorausgesagt werden, selbst wenn die Anfangsbedingungen bekannt sind. Der Unterschied zwischen deterministischen und nicht-deterministischen Systemen ist grundlegend für das Verständnis vieler naturwissenschaftlicher und technischer Fragestellungen. Insbesondere in der technischen Systemtheorie dient diese Unterscheidung als Basis für Modellbildung und Analyse.

2.1 Mess- und Regeltechnik

In der Mess- und Regeltechnik nimmt der Begriff des Determinismus eine zentrale Rolle ein, da er beschreibt, in welchem Mass das Verhalten eines Systems vorhersehbar ist. Ein deterministisches System reagiert unter identischen Anfangsbedingungen und gleichen Eingangsgrößen stets mit identischen Ausgangsgrößen. Dadurch wird es möglich, mathematische Modelle zu entwickeln, die das Systemverhalten zuverlässig beschreiben. Solche Modelle bilden die Grundlage für den Entwurf von Steuerungs- und Regelungsalgorithmen. Nur wenn das Systemverhalten eindeutig vorhersehbar ist, kann eine Regelung gezielt auf Abweichungen reagieren. Die Stabilität und Leistungsfähigkeit einer Regelung hängen daher wesentlich von der Determiniertheit des zu regelnden Prozesses ab. In der Praxis erlaubt der Determinismus eine präzise Auslegung von Reglern und eine sichere Abschätzung des Systemverhaltens im Betrieb. Ohne diese Eigenschaft wäre eine systematische Regelung kaum möglich. Deshalb wird in vielen Anwendungen angestrebt, Systeme möglichst deterministisch zu gestalten.

Nicht-deterministische Einflüsse stellen in der Mess- und Regeltechnik eine besondere Herausforderung dar. Dazu zählen beispielsweise Messrauschen, äussere Störungen oder zeitlich veränderliche Systemparameter. Solche Einflüsse erschweren die Modellbildung und reduzieren die Vorhersagegenauigkeit. In vielen Fällen müssen diese Effekte durch Filter, robuste Regelungsverfahren oder Sicherheitsreserven berücksichtigt werden. Trotz dieser Massnahmen bleibt eine gewisse Unsicherheit im Systemverhalten bestehen. Aus diesem Grund ist die gezielte Herstellung deterministischer Verhältnisse ein zentrales Ziel in der Entwicklung technischer Regelungen. Je besser nicht-deterministische Einflüsse beherrscht werden, desto zuverlässiger kann ein System betrieben werden.

**Deterministisch:**

Gleiche Anfangsbedingungen $x(0)$ und gleiche Eingänge $u(t) \Rightarrow$ gleicher Ausgang $y(t)$.

Nicht-deterministisch:

Zusätzliche Einflüsse $d(t)$ und $n(t)$ führen zu Unsicherheit in $y_m(t)$.

Abbildung 1. Deterministische Einflüsse in einem Regelkreis.

2.2 Membrananlagen

Membranprozesse sind nicht vollständig deterministisch. Auch bei gleichen Betriebsparametern treten Unterschiede im Systemverhalten auf, z.B. durch

- schwankende Feedzusammensetzung
- Upscaling
- Fouling (Auftreten, Fortschreiten, Reversibilität)
- variable Reinigungswirkung (CIP)
- Membranalterung
- Herstellungstoleranzen
- Messunsicherheiten

→ Das reale Systemverhalten ist daher nur näherungsweise vorhersagbar.

Diese Einflüsse führen zu einer Systemdynamik, sodass das Trennverhalten nicht exakt vorhergesagt werden kann. Für die Auslegung und Regelung von Membrananlagen ergibt sich daraus die Notwendigkeit, mit modellbedingten Unsicherheiten umzugehen. In der Praxis werden daher häufig vereinfachende Modelle und Annahmen herangezogen, mit denen der Prozess näherungsweise als deterministisch beschrieben wird.

3 Upscaling

Beim Upscaling von Membranprozessen ist eine exakte Übertragung vom Labor- oder Pilotmassstab auf industrielle Anlagen grundsätzlich nicht möglich. Zwar lassen sich die grundlegenden Trennmechanismen und Transportprozesse anhand deterministischer Modelle beschreiben, im technischen Massstab treten jedoch zusätzliche Einflüsse auf. Dazu zählen veränderte Strömungsverhältnisse, inhomogene Belastung der Membranflächen, skalenabhängige Foulingmechanismen sowie Unterschiede in Reinigungswirkung und Betriebsführung. Diese Effekte führen dazu, dass Kenngrößen wie Permeatfluss, Rückhaltegrad oder Druckverlust nicht proportional mit der Anlagengröße skalieren. Upscaling in Membranprozessen erfolgt daher stets näherungsweise und erfordert empirische Korrekturen, Sicherheitszuschläge und iterative Anpassungen, um einen stabilen und zuverlässigen Betrieb zu gewährleisten.

Membrananlagen weisen in der praktischen Anwendung sowohl deterministische als auch nicht-deterministische Eigenschaften auf. Zwar beruhen ihre grundlegenden physikalischen Wirkmechanismen auf bekannten und reproduzierbaren Gesetzmässigkeiten, die tatsächlich ablaufenden Prozesse sind jedoch nicht vollständig determiniert. Die reale Prozessführung wird von einer Vielzahl zeitlich veränderlicher Einflussgrössen geprägt, insbesondere von der Stoffzusammensetzung, dem Auftreten und Fortschreiten von Fouling.

3.1 Abgrenzung zu probabilistischen Ansätzen

Im Gegensatz zu deterministischen Modellen beschreiben probabilistische Ansätze Systeme mithilfe von Wahrscheinlichkeiten.

Aspekt	Probabilistischer Ansatz
Grundidee	Unsicherheiten in den Trenneigenschaften werden mit Wahrscheinlichkeiten beschrieben. Dabei wird nicht angenommen, dass der Prozess selbst zufällig abläuft.
Warum gibt es Unsicherheiten?	Man kennt nicht alle Materialdaten genau. Membranen altern, und die Zusammensetzung des Feeds kann sich ändern. Auch Modelle sind nie perfekt.
Wie wird die Trennung beschrieben?	Rückhaltegrad und Selektivität werden als Grössen betrachtet, die schwanken können. Diese Schwankungen werden mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben.
Zeitliches Verhalten	Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen bleiben meist konstant oder ändern sich nur langsam mit der Zeit.
Verwendete Modelle	Statistische Modelle, einfache Bayes'sche Methoden sowie Untersuchungen zur Unsicherheit und Empfindlichkeit des Systems.
Bedeutung für die Regelung	Unsicherheiten werden bei der Auslegung von Reglern berücksichtigt, damit der Prozess auch bei Abweichungen stabil bleibt.
Typische Fragestellung	Wie wahrscheinlich ist es, dass ein bestimmter Rückhaltegrad oder eine gewünschte Trennleistung erreicht wird?
Ziel der Betrachtung	Mehr Sicherheit und Zuverlässigkeit im Betrieb sowie bessere Planbarkeit von Membranprozessen.

Tabelle 1. Probabilistische Betrachtung der Trenneigenschaften in Membranprozessen (vereinfachte Darstellung)