

Messinger Engineering
David-Hess-Weg 34
CH-8038 Zürich

✉ info@membranfiltration.ch

📞 +41 79 390 60 48



Membrantechnik - Konzepte und Anwendungen



Systemtheorie

1 Systemtheorie	3
1.1 Grundgedanken	3
2 Begriff des Systems	3
3 Subsysteme und Modularität	3
4 Interaktionen und Beziehungen	4
5 Rückkopplungsmechanismen	4
6 Systemische Produktivität	4
6.1 Systemische Input-Produktivität	5
6.2 Systemische Output-Produktivität	5

7	Dynamik technischer Systeme	6
8	Regelkreise und Prozessdenken	6
9	Bedeutung für die Membrantechnik	6
9.1	Reinigung	6

1 Systemtheorie

Die Systemtheorie (engl. *Systems Thinking*) ist ein interdisziplinärer Ansatz, der in den Ingenieurwissenschaften, den Naturwissenschaften und im Management verwendet wird.

Ziel der Systemtheorie ist es, komplexe Zusammenhänge verständlich zu machen, indem technische Anlagen nicht als Sammlung einzelner Komponenten, sondern als zusammenhängendes Ganzes betrachtet werden, in dem die einzelnen Systemkomponenten aufeinander einwirken und gemeinsam zur Erfüllung eines übergeordneten Zwecks beitragen.

Die Systemtheorie stellt Werkzeuge zur Verfügung, mit denen Aufbau, Funktionsweise und Wechselwirkungen technischer Anlagen systematisch analysiert werden können.

Insbesondere in der Membrantechnik ist ein solches systemisches Verständnis notwendig, da Membransysteme aus vielen miteinander verknüpften Komponenten bestehen, die erst durch ihr Zusammenwirken ein definiertes, regelbares Trennziel erreichen.

1.1 Grundgedanken

- Ein technisches System ist ein Gebilde mit Eigenheiten, mit inneren Gesetzmässigkeiten, die gefunden, beschrieben, verstanden und kontrolliert werden müssen.
- Systeme bestehen aus einer Vielzahl von Teilen unterschiedlichster Art, die das Ganze realisieren.
- Alle Systemteile sind selbst Systeme (Subsysteme)
- Systemgrössen sind nicht stabil, sondern können sich verändern.
- In Prozessen denken, nicht in Zuständen.
- Regelkreise, Wirkungskreise, Prozesskreisläufe produzieren wiederkehrend bestimmte Eigenschaften.

2 Begriff des Systems

Ein System ist eine Menge von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen. Die Systemelemente sind nicht isoliert zu betrachten. Vielmehr entsteht die Systemfunktion erst durch das Zusammenwirken der Teile. Ein zentrales Merkmal eines Systems ist die Zielorientierung. Technische Systeme werden entwickelt, um definierte Aufgaben zu erfüllen. Eine Membrananlage dient der Trennung von Stoffströmen. Sie erfüllt dieses Ziel durch das Zusammenspiel mehrerer Komponenten. Damit ist eine Membrananlage als Membransystem zu bezeichnen. Das Systemverhalten ergibt sich aus der Struktur und den Wechselwirkungen. Nicht die Einzelkomponenten allein bestimmen die Leistung des Systems.

3 Subsysteme und Modularität

Membransysteme sind in der Regel modular aufgebaut. Die Module sind funktional klar abgegrenzt. Gleichzeitig sind sie nicht unabhängig voneinander. Jedes Modul beeinflusst das Verhalten des Gesamtsystems. Die Module selbst können wiederum als Systeme betrachtet werden. In der Systemtheorie spricht man in diesem Zusammenhang von Subsystemen. Ein

typisches Subsystem ist die CIP-Station. Die CIP-Station dient der Reinigung der Membranmodule. Sie ist funktional notwendig für den stabilen Betrieb. Ohne regelmässige Reinigung verändert sich das Systemverhalten. Damit zeigt sich die Bedeutung von Subsystemen für die Gesamtfunktion.

4 Interaktionen und Beziehungen

Die Systemtheorie legt besonderen Wert auf Beziehungen zwischen Elementen. Diese Beziehungen bestimmen die Dynamik des Systems. In Membransystemen bestehen zahlreiche Wechselwirkungen. Druck, Konzentration und Durchfluss beeinflussen sich gegenseitig. Eine Änderung eines Parameters wirkt sich auf andere Parameter aus. Solche Zusammenhänge sind häufig nicht linear. Sie erschweren eine rein isolierte Betrachtung einzelner Grössen. Die Systemtheorie ermöglicht es, diese Interaktionen strukturiert zu analysieren. Sie fördert ein Verständnis für Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge. Dadurch können unerwartete Effekte besser erklärt werden.

5 Rückkopplungsmechanismen

Ein zentrales Konzept der Systemtheorie ist die Rückkopplung. Rückkopplungen können positiv oder negativ sein. In Membransystemen treten Rückkopplungen häufig auf. Der scheinbare Rückhalt einer Membran ist kein fixer Wert. Er hängt von der Konzentration der gelösten Stoffe ab. Auch der transmembrane Druck beeinflusst den Rückhalt. Eine Veränderung des Rückhalts verändert das Trennverhalten. Dieses veränderte Trennverhalten wirkt wiederum auf die Konzentration zurück. Es entsteht ein Rückkoppelungskreis. Solche Mechanismen prägen das Systemverhalten wesentlich.

6 Systemische Produktivität

Unter systemischer Produktivität versteht man die Fähigkeit eines gesamten technischen Systems, Wertschöpfung zu erzeugen, gemessen am Verhältnis zwischen dem erzielten Nutzen und den dafür eingesetzten Ressourcen wie Energie, Rohstoffen oder Arbeitskraft. Im Mittelpunkt steht dabei nicht die Leistung einzelner Prozesse oder Apparate, sondern das Zusammenwirken aller Systembestandteile.

Der Begriff der systemischen Produktivität hat seinen Ursprung in der Systemtheorie und im Systems Engineering. Dort wurde erkannt, dass Wechselwirkungen zwischen Teilprozessen häufig einen grösseren Einfluss auf die Gesamtleistung eines Systems haben als die Optimierung einzelner, isolierter Einheiten. Eine Verbesserung auf Komponentenebene führt daher nicht zwangsläufig zu einer höheren Gesamtleistung des Systems.

Diese Perspektive ist im Engineering verfahrenstechnischer Anlagen besonders relevant, da solche Anlagen aus mehreren Verfahrensteilen wie Reaktoren, Separatoren, Wärmetauschern, Pumpen oder Membranmodulen bestehen. Obwohl diese Einheiten einzeln optimiert werden können, entstehen im Zusammenspiel häufig Flaschenhälse, unerwartete Energieverluste oder Instabilitäten. Erst eine systemische Betrachtung ermöglicht es, solche Effekte frühzeitig zu erkennen, Gesamtwirkungsgrade zu erhöhen und kostenintensive

Nachbesserungen zu vermeiden.

Darüber hinaus fördert der systemische Ansatz die Nachhaltigkeit technischer Anlagen. Durch die ganzheitliche Betrachtung von Stoff- und Energieströmen über den gesamten Produktionsprozess lassen sich nicht nur Kosten senken, sondern auch Emissionen und Abfallmengen reduzieren. Systemische Produktivität stellt damit ein zentrales Konzept dar, um verfahrenstechnische Anlagen sowohl ökonomisch als auch ökologisch effizient zu gestalten.

6.1 Systemische Input-Produktivität

Die systemische Input-Produktivität (SIP) beschreibt das Verhältnis zwischen den minimal erforderlichen Ressourcen und den tatsächlich eingesetzten Ressourcen in einem technischen System. Sie ist ein Mass dafür, wie nahe ein reales System an seinem idealen, verlustfreien Zustand betrieben wird.

Als Beispiel sei das Erwärmen von Wasser betrachtet. Um 1 Tonne Wasser von 20 °C auf 100 °C zu erhitzen, ist theoretisch eine Mindestenergie von 334 400 kJ erforderlich. Dieser Wert stellt den idealen Grenzfall ohne Verluste dar. In einem realen technischen System treten jedoch Wärmeverluste auf, sodass beispielsweise 434 720 kJ aufgewendet werden müssen.

Die systemische Input-Produktivität ergibt sich in diesem Beispiel zu

$$\text{SIP} = \frac{334\,400}{434\,720} \approx 0.77. \quad (1)$$

Ein SIP-Wert von 0.77 bedeutet, dass das System nur 77 % der theoretisch maximal möglichen Effizienz erreicht und etwa 23 % der eingesetzten Energie durch systembedingte Verluste verloren gehen.

Da der tatsächliche Ressourcenverbrauch in realen Systemen immer grösser ist als der theoretische Mindestbedarf, liegt der SIP-Wert stets unter 1. Nur ein ideales, verlustfreies System würde einen SIP-Wert von 1 erreichen.

Das Konzept der systemischen Input-Produktivität lässt sich auch auf Membranfiltrationssysteme anwenden und dient dort als Mass für die Gesamtleistungsfähigkeit. Reale Membransysteme weisen typischerweise SIP-Werte im Bereich von etwa 0.4 bis 0.7 auf, abhängig von Anlagenkonzept, Betriebsweise, Regelstrategien und Reinigungszyklen.

6.2 Systemische Output-Produktivität

Die systemische Output-Produktivität (SOP) beschreibt das Verhältnis zwischen dem tatsächlich erzielten Output eines Systems und dem maximal möglichen Output unter idealisierten Bedingungen. Sie ist damit ein Mass für das Ausschöpfen des Leistungspotenzials eines Systems.

Da reale Systeme stets durch Verluste, Begrenzungen und Wechselwirkungen eingeschränkt sind, ist der tatsächlich erzielte Output kleiner als der theoretisch mögliche. Der SOP-Wert liegt daher immer unter 1. Nur ein ideales System würde einen SOP-Wert von 1 erreichen.

Die systemische Produktivität bestehender Membransysteme kann durch gezieltes Re-Engineering verbessert werden. Dieses stellt einen zentralen Hebel in der Verfahrenstechnik dar, um so-

wohl Effizienz als auch Nachhaltigkeit technischer Anlagen zu steigern.

7 Dynamik technischer Systeme

Systemgrößen sind nicht grundsätzlich stabil. Sie können sich im Betrieb kontinuierlich verändern. Membransysteme unterliegen zeitabhängigen Effekten. Verschmutzung ist ein typisches dynamisches Phänomen. Sie verändert den hydraulischen Widerstand der Membran. Dadurch ändern sich Druckverluste und Durchflussraten. Das System reagiert auf diese Veränderungen. Steuer- und Regelstrategien greifen korrigierend ein. Die Systemtheorie liefert hierfür den konzeptionellen Rahmen. Sie unterstützt das Denken in Prozessen statt in Zuständen.

8 Regelkreise und Prozessdenken

Technische Membransysteme enthalten zahlreiche Regelkreise. Diese Regelkreise stabilisieren den Betrieb. Beispiele sind Druck-, Durchfluss- oder Leitfähigkeitsregelungen. Regelkreise erzeugen wiederkehrende Systemzustände. Sie tragen zur Reproduzierbarkeit der Prozesse bei. Gleichzeitig können sie neue Dynamiken verursachen. Ein System ist daher mehr als die Summe seiner Teile. Erst durch Regelkreise entsteht geordnetes Verhalten. Das Denken in Wirkungskreisen ist essenziell. Es ist ein Kernelement der Systemtheorie.

9 Bedeutung für die Membrantechnik

Die Anwendung der Systemtheorie verbessert das Verständnis von Membransystemen. Sie hilft, komplexe Phänomene strukturiert zu analysieren. Insbesondere Wechselwirkungen werden sichtbar gemacht. Dies ist für Auslegung und Betrieb entscheidend. Auch die Optimierung von Membrananlagen profitiert davon. Fehlinterpretationen isolierter Messwerte können vermieden werden. Die Systemtheorie unterstützt eine nachhaltige Anlagenentwicklung. Sie fördert robuste und adaptive Systemkonzepte. Damit stellt sie ein unverzichtbares Werkzeug dar. Ihre Bedeutung für das Engineering von Membransystemen ist fundamental.

9.1 Reinigung

Für die Auslegung wirksamer, produktspezifischer Reinigungsstrategien ist ein fundiertes Verständnis der Fouling-Mechanismen entscheidend. Nur wenn bekannt ist, welche Ablagerungstypen dominieren und wie sie sich unter Betriebsbedingungen entwickeln, können CIP-Prozesse gezielt gestaltet und optimiert werden.

Die Reinigungsleistung wird von mehreren Einflussgrößen bestimmt: Reinigungschemie, Konzentration, Temperatur, Einwirkzeit sowie hydraulische Parameter wie Strömung, Druck und Rückspülung. Diese Faktoren bilden einen mehrdimensionalen Parameterraum mit zahlreichen Wechselwirkungen.

Der zentrale Einflussfaktor bleibt jedoch das zu filtrierende Medium selbst. Zusammensetzung und stoffliche Eigenschaften bestimmen Art und Haftmechanismus der Fouling-

Schicht. Besonders im Lebensmittelbereich unterliegt das Medium natürlichen Schwankungen, wodurch sich die Randbedingungen zusätzlich verändern.

Eine vollständige wissenschaftliche Durchdringung aller Parameter wäre mit unverhältnismässigem Aufwand verbunden.