



Zustandsgrößen

1 Einleitung	2
1.1 Einordnung in die Verfahrenstechnik	2
1.2 Zustands- und Prozessgrößen in Membransystemen	4
2 Systemvariablen und Systemgrößen	5
2.1 Systemvariablen	5
3 Klassifikation von Zustandsgrößen	6
3.1 Intensive und extensive Größen	6
3.2 Thermodynamische Zustandsgrößen	6
3.3 Stoffliche und energetische Zustandsgrößen	6
3.4 Lokale und gemittelte Zustandsgrößen	6
4 Zustandsgrößen in verfahrenstechnischen Modellen	6
4.1 Stoffbilanzen	6
4.2 Energiebilanzen	6
4.3 Impulsbilanzen	6
4.4 Zustandsvektor und Systembeschreibung	6
5 Dynamisches Prozessverhalten	6
5.1 Zeitliche Änderung von Zustandsgrößen	6
5.2 Speicher- und Verzögerungseffekte	7
5.3 Kopplung mehrerer Zustandsgrößen	7
6 Messbarkeit und Beobachtbarkeit	7
6.1 Direkt messbare Zustandsgrößen	7
6.2 Abgeleitete und geschätzte Zustandsgrößen	7
6.3 Modellbasierte Zustandsschätzung	7
6.4 Bedeutung für Auslegung und Betrieb	7
6.5 Prozessüberwachung	7
6.5.1 Prozessführung und Regelung	7
6.6 Grenzen zustandsbasierter Beschreibungen	7

1 Einleitung

1.1 Einordnung in die Verfahrenstechnik

Eine Zustandsgröße ist eine makroskopische physikalische Größe, mit der der Zustand eines thermodynamischen Systems beschrieben werden kann. Der Wert einer Zustandsgröße gibt den aktuellen Zustand des Systems an und ist unabhängig davon, auf welchem Weg dieser Zustand erreicht wurde. Zustandsgrößen sind nicht dasselbe wie Prozessgrößen.

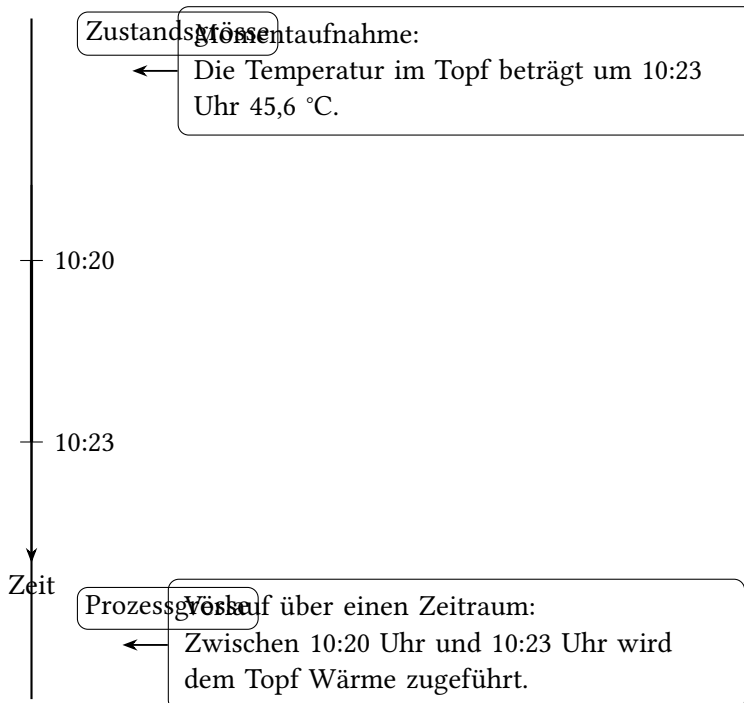
Zustandsgrößen und Prozessgrößen lassen sich gut mit einem Bankkonto vergleichen. Eine Zustandsgröße ist wie der Kontostand: Er zeigt, wie viel Geld gerade auf dem Konto ist, unabhängig davon, wie viele Ein- oder Auszahlungen vorher gemacht wurden. Prozessgrößen sind wie die Ein- und Auszahlungen: Sie beschreiben, was während einer bestimmten Zeit passiert und wie sich der Kontostand dadurch verändert. Entscheidend ist dabei der Ablauf der Transaktionen, nicht nur der Endwert.

Zustandsgröße:

Die Temperatur im Tank betrug um 10:23 Uhr 45,6 °C.

Prozessgröße:

Zwischen 10:20 Uhr und 10:23 Uhr wurde der Tank erwärmt.



Die Unterscheidung zwischen Zustands- und Prozessgrößen ist wichtig für das Verständnis verfahrenstechnischer Prozesse. Zustandsgrößen beschreiben den Zustand eines Systems

zu einem bestimmten Zeitpunkt, während Prozessgrößen den zeitlichen Ablauf einer Zustandsänderung beschreiben.

Bleiben alle Zustandsgrößen eines Systems zeitlich konstant, befindet sich das System entweder im thermodynamischen Gleichgewicht oder in einem stationären Fließgleichgewicht.

Zustandsgrößen können durch Zustandsgleichungen miteinander verknüpft werden und ermöglichen so eine mathematische Beschreibung des Systemzustands.

Wird beispielsweise der Druck betrachtet, handelt es sich um eine Zustandsgröße und damit um ein statisches Merkmal des Systems.

Der Massendurchfluss hingegen ist eine Prozessgröße, da er den zeitlichen Verlauf eines Prozesses beschreibt.

Wärme und Arbeit zählen ebenfalls zu den Prozessgrößen und sind keine Zustandsgrößen. Sie beschreiben nicht den Zustand eines Systems, sondern den Weg, auf dem sich der Systemzustand ändert.

Prozessgrößen werden häufig als integrale Größen erfasst, deren Wert sich aus der zeitlichen Integration über den Prozessverlauf ergibt, beispielsweise bei der Berechnung der geleisteten Arbeit.

Studierende verwechseln häufig: Zustandsgrößen vs. Prozessgrößen Zustandsgrößen vs. Stell- und Messgrößen lokale vs. gemittelte Zustandsgrößen

1.2 Zustands- und Prozessgrößen in Membransystemen

Grösse	S	Einheit	Beschreibung
Transmembrandruck (TMP)	Δp_{TMP}	Pa	Druckunterschied zwischen der Feed-Seite und der Permeat-Seite der Membran. Beschreibt zu jedem Zeitpunkt den aktuellen Zustand des Membransystems und ist unabhängig vom Weg, über den dieser Zustand entstanden ist.
Konzentration	c	mol m^{-3}	Konzentration von Salzen oder Makromolekülen im Feed-, Permeat- oder Retentatstrom. Direkte Zustandsgrösse des Systems.
Temperatur	T	K	Temperatur des Feedstroms, des Retentats oder des Permeats. Thermodynamische Zustandsgrösse.
Membranfläche	A	m^2	Physikalische Eigenschaft der Membran. Konstant, solange keine strukturellen Veränderungen auftreten.
Porengrösse	d_p	m	Charakteristische Porengrösse der Membran. Materialabhängige Systemeigenschaft mit Einfluss auf das Trennverhalten.
Volumen in Behälter	V	m^3	Aktueller Füllstand eines Behälters. Momentane Zustandsgrösse des Systems.
Hydraulischer Widerstand	R_{hyd}	m^{-1}	Zustand der Membran, etwa Fouling oder Belagbildung. Beschreibt den aktuellen hydraulischen Zustand der Membran.

Tabelle 1. Zustandsgrößen in einem Membransystem

Grösse	S	Einheit	Beschreibung
Flux	J	$\text{L m}^{-2} \text{h}^{-1}$	Permeatstrom bezogen auf die Membranfläche. Zeitlich veränderliche Prozessgrösse, beeinflusst durch Fouling und Konzentrationspolarisation.
Durchflussrate	Q	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	Volumenstrom durch die Membran (Feed, Permeat oder Retentat). Zeitabhängige Grösse, geprägt durch Pumpeneinstellungen und Prozessdauer.
Wärmeübertragung	\dot{Q}	W	Wärmemenge pro Zeit, die in das System eingebracht oder entfernt wird. Relevante Grösse bei Erwärmung oder Kühlung des Feedstroms.
Arbeit	W	J	Mechanische Energie, die durch Pumpen in das System übertragen wird. Erforderlich zur Aufrechterhaltung der Druckdifferenz.
Rückhalt	R	–	Anteil der gelösten Stoffe, der durch die Membran zurückgehalten wird. Systemgrösse, beeinflusst durch Konzentration, Druck und Temperatur.
Druckverlust	Δp	Pa	Druckabfall entlang der Feed-Seite infolge von Strömungswiderständen. Beschreibt einen druckabhängigen Verlauf entlang der Strömungsrichtung.

Tabelle 2. Prozessgrössen in einem Membransystem

2 Systemvariablen und Systemgrössen

Zustandsgrössen sind ein wichtiger Teil der Systembeschreibung, sie stellen jedoch nicht alle Grössen dar, die in einem technischen System auftreten.

Um technische Systeme, wie beispielsweise Membransysteme, systematisch zu analysieren und zu modellieren, ist es hilfreich, alle veränderlichen Grössen zunächst unter dem übergeordneten Begriff der **Systemvariablen** zusammenzufassen.

2.1 Systemvariablen

Innerhalb der Systemvariablen ist eine weitere Unterscheidung sinnvoll. Systemgrössen beschreiben, wie sich ein System verhält und wie sich sein Zustand im Betrieb verändert. Dazu gehören unter anderem die Zustandsgrössen und die Prozessgrössen. Systemparameter hingegen beschreiben, was ein System ist. Sie legen den Aufbau und die festen Eigenschaften des Systems fest und ändern sich im Normalfall nicht mit dem Betriebszustand.

Die bewusste Unterscheidung zwischen Systemgrößen und Systemparametern erleichtert das Verständnis technischer Zusammenhänge erheblich. Sie hilft dabei, Messwerte korrekt einzuordnen, Modelle sinnvoll aufzubauen und Ursache-Wirkungs-Beziehungen im System klarer zu erkennen. Insbesondere in der Verfahrenstechnik bildet diese Begriffsordnung die Grundlage für eine strukturierte Beschreibung, Auslegung und Analyse technischer Systeme.

Systemparameter beschreiben, was ein technisches System ist. Sie legen den Aufbau, die Struktur sowie die festen physikalischen und konstruktiven Eigenschaften des Systems fest. Systemparameter ändern sich im Normalfall nicht mit dem Betriebszustand und definieren die Randbedingungen, innerhalb derer sich das Systemverhalten abspielt.

Kategorie	Systemparameter
Membranparameter	Membranfläche; Porengröße bzw. Porengrößenverteilung; Membranmaterial; Dicke der Membran; intrinsischer Membranwiderstand.
Anlagenparameter	Rohrleitungsdurchmesser; Länge der Strömungswege; Volumen von Behältern; Anzahl der Membranmodule.
Stoff- und Medieneigenschaften	Dichte der Flüssigkeit; Viskosität; Diffusionskoeffizienten.

Tabelle 3. Systemparameter in der Membrantechnik

Systemgrößen beschreiben, wie sich ein System verhält. Sie können sich mit dem Betriebszustand ändern und charakterisieren den momentanen Zustand oder den zeitlichen Verlauf eines Prozesses. Zu den Systemgrößen zählen unter anderem die Zustandsgrößen, welche den aktuellen Zustand des Systems zu einem bestimmten Zeitpunkt beschreiben.

3 Klassifikation von Zustandsgrößen

3.1 Intensive und extensive Größen

3.2 Thermodynamische Zustandsgrößen

3.3 Stoffliche und energetische Zustandsgrößen

3.4 Lokale und gemittelte Zustandsgrößen

4 Zustandsgrößen in verfahrenstechnischen Modellen

4.1 Stoffbilanzen

4.2 Energiebilanzen

4.3 Impulsbilanzen

4.4 Zustandsvektor und Systembeschreibung

5 Dynamisches Prozessverhalten

5.1 Zeitliche Änderung von Zustandsgrößen

5.2 Speicher- und Verzögerungseffekte

5.3 Kopplung mehrerer Zustandsgrößen

6 Messbarkeit und Beobachtbarkeit

6.1 Direkt messbare Zustandsgrößen

6.2 Abgeleitete und geschätzte Zustandsgrößen

6.3 Modellbasierte Zustandsschätzung

6.4 Bedeutung für Auslegung und Betrieb

6.5 Prozessüberwachung

6.5.1 Prozessführung und Regelung

6.6 Grenzen zustandsbasierter Beschreibungen