



Bernd Ebert

# Systemverfahrenstechnik in der Ingenieurspraxis

Beherrschung von Prozessen, Gefährdungen  
und Reinheitskriterien

EBOOK INSIDE

 Springer Vieweg

---

# Systemverfahrenstechnik in der Ingenieurspraxis

---

Bernd Ebert

# Systemverfahrenstechnik in der Ingenieurspraxis

Beherrschung von Prozessen,  
Gefährdungen und Reinheitskriterien

Bernd Ebert  
Groß-Zimmern, Deutschland

ISBN 978-3-662-64286-3      ISBN 978-3-662-64287-0 (eBook)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-64287-0>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert durch Springer-Verlag GmbH, DE, ein Teil von Springer Nature 2022

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Alexander Grün

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

# Vorwort

Stoffumwandelnde Prozesse sind im 21. Jahrhundert strengen Regularien unterworfen. Diese resultieren nicht nur aus Umwelt- und Sicherheitsanforderungen, sondern naturgemäß auch aus den wirtschaftlichen Anforderungen der Betreiber bzgl. der Produktmengen, ihrer Eigenschaften und Parameter. Allen diesen Kriterien ist eines gemeinsam: Sie sollen vorhersehbar, punktgenau und langfristig zuverlässig erreicht werden. Für einzelne Prozessschritte liegen zahlreiche Modelle und Anwendungslösungen vor, diese ergeben jedoch nicht das Optimum für einen komplexen Gesamtprozess. Hierfür sind systemische Betrachtungen erforderlich; in der Ingenieurs-Praxis haben sich dabei mehrere Herangehensweisen herausgebildet und bewährt.

Das Ziel der vorliegenden Monografie ist, diese Methoden zusammenzutragen, zu bewerten und bzgl. ihrer Anwendbarkeit – auch mittels zahlreicher Beispiele – zu diskutieren, dies mit dem Fokus auf die Beherrschbarkeit von komplexen Abläufen. Dies soll an keine Grenzen gebunden sein – analog einem komplexen Produktionsprozess, der auch zahlreiche Kopplungen zur „Umgebung“ besitzt. In diesem Sinn fließen auch eigene Vorschläge und Methoden ein, die der Verfasser in seiner Berufspraxis nutzbar machen konnte. Eine gute Basis hierfür bilden über 40 Jahre Berufserfahrung des Autors in verschiedenen Ländern, beginnend mit dem Anlagenentwurf bis hin zur Inbetriebnahme und zum Betreiben technischer Systeme.

Groß-Zimmern, Deutschland

Bernd Ebert

---

## Danksagung

Dieses Buch konnte nur entstehen nach intensiven Gesprächen mit vielen Fachkollegen – ihnen ein großes „Dankeschön!“

Ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer.nat. Maximilian Witt für die IT-bezogene Unterstützung und Ausführung der Simulationen sowie Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Daus für die kritische und detailgenaue Durchsicht des Manuskripts!

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b> .....	1
	Literatur .....	3
<b>2</b>	<b>Wesentliche Anforderungen an die Systemverfahrenstechnik</b> .....	5
2.1	Systemverfahrenstechnik im wirtschaftlichen Kontext .....	5
2.2	Möglichkeiten und Grenzen der systemischen Betrachtung .....	6
	Literatur .....	9
<b>3</b>	<b>Systemische Merkmale verfahrenstechnischer Prozesse</b> .....	11
3.1	Abgrenzung von Fachbegriffen .....	11
3.2	Zusammenhang zwischen Prozess und technischem System .....	14
3.3	Prozess – Teilanlage – Prozessschritt – Grundoperation .....	17
3.4	Spezifika von Konti- und Batch-Systemen .....	22
3.5	Triebkräfte in den Prozessschritten .....	29
3.6	Zeit-Charakteristik von Prozessen .....	35
	Literatur .....	40
<b>4</b>	<b>Anforderungen an die Planung von Systemen</b> .....	41
4.1	Realisierung von Prozessen mittels technischer Projekte .....	41
4.2	Präzisierung der Projekt-Anforderungen .....	42
4.3	Nachfolgende Planungsphasen: Studie; Entwurf; Ausführung .....	45
4.4	Kurzer Abriss zu Projektteam, Meilensteinen und Dokumentation .....	56
	Literatur .....	59
<b>5</b>	<b>Systemgestaltung für reale Betriebsabläufe</b> .....	61
5.1	Zusammenhänge zwischen Kernprozess, Peripherie und Gesamt- Sicherheit .....	62
5.1.1	Der Kernprozess als „Anforderer“ und seine Schnittstellen .....	63
5.1.2	Umfang der Peripherie: Ver-/Entsorgung, Energien, TUL .....	69
5.1.3	Komplexität der Sicherheit gemäß GABUS .....	84
5.1.4	Wesentliche Anforderung: Reinheit bei GMP-Prozessen .....	95
5.1.5	Technische Umsetzung der Reinheitsaspekte .....	96

5.2	Systemische Kopplungen von Alt- und Neuprozessen beim Anlagen- „Retrofit“ .....	102
5.2.1	Erfassung der Planungsumfänge im Komplex .....	103
5.2.2	Erweiterung des technischen Umfangs bei laufenden Anlagen. ...	106
5.3	Prozess-Zustände abweichend vom Normalbetrieb .....	113
5.3.1	Generelle Aspekte bei Abweichungen .....	113
5.3.2	Abläufe bei Inbetriebnahmen, An- und Abfahren .....	115
5.3.3	Abläufe bei Reinigungen, Wartungen und Parameter-Störungen ...	127
5.4	Zusammenhang von Verfahrenstechnik und Automatisierungstechnik. ...	134
5.4.1	Praktikable Abläufe bei der Verfahrensplanung .....	134
5.4.2	Wesentliche Aspekte der systemischen Automatisierung .....	139
5.4.3	Spezifika bei Anfahrbedingungen, Routinen, Verriegelungen und der Mensch-Maschine-Kommunikation .....	155
5.5	Simulation von Prozessen: statisch oder dynamisch? .....	158
5.5.1	Generelle Methoden zur statischen Simulation .....	158
5.5.2	Von der statischen zur dynamischen Simulation .....	162
5.5.3	Spezifika einer systemverfahrenstechnischen Simulation .....	170
5.6	Modularisierung: Chancen und Risiken. ....	176
5.6.1	Theorie und Praxis der Modularisierung .....	176
5.6.2	Verwaltung und Dokumentation der Module .....	180
	Literatur. ....	182
<b>6</b>	<b>Systemoptimierung im Betriebsablauf</b> .....	<b>185</b>
6.1	Zusammenhänge zwischen Verfahrenstechnik und Betriebswirtschaft. ...	185
6.1.1	Ziel jedes Prozesses: Effiziente Fertigung von Produkten. ....	185
6.1.2	Erkenntnisgewinn aus der Betriebsphase von Prozessen. ....	187
6.1.3	Effizienzsteigerung mittels Verfahrenstechnik. ....	190
6.2	Erhöhung der System-Zuverlässigkeit. ....	192
6.2.1	Historie der Zuverlässigkeitstechnik .....	192
6.2.2	Spezifika komplexer Systeme bzgl. ihres Ausfallverhaltens .....	193
6.2.3	Störungserkennung, -ausbreitung, -kompensierung .....	199
6.2.4	Methodische Hinweise für eine hohe Zuverlässigkeit .....	204
6.3	Systemtechnische Anforderungen gemäß Industrie 4.0. ....	218
6.3.1	Entwicklung und allgemeine Anforderungen von Industrie 4.0 ...	218
6.3.2	Spezifika bei mengenbezogenen Prozessen. ....	219
6.4	Kopplung von Prozess- und System-Aspekten im Betriebsalltag .....	232
	Literatur. ....	233
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>235</b>



---

# Abkürzungsverzeichnis

A	Fläche
CIP	„Cleaning in place“
Del; $\Delta$	delta
GF	Gleichzeitigkeits-Faktor
h	Stunde
IBC	„Intermediate bulk container“
L	Länge
$\dot{m}$	Massenstrom
min	Minute
n	Anzahl
P	Leistung; Kapazität
p	Parameter
Q	Energie
rho; $\rho$	Dichte
s	Sekunde
$\Delta t$	Zeitdauer
T	Zeitpunkt
V	Volumen
w	Geschwindigkeit
x	Laufvariable
y	Prozessparameter
z	Zielparameter
$\Delta$	Differenz

---

## Tief-Indices

1; 2; 3; a...z	Laufindices und Prozessschritt-Index
A	Prozessmasseindex
Abw	Abweichung

Ak	Aktion
aus	Austritt
B	Bedarf
Ba	Batch
Ek	Erkennung
ein	Eintritt
f	final, endgültig
ges	gesamt
Gzw	Grenzwert
int	Inertisierung
K	Kernprozess
Ko	Kontakt
KoS	Kompensationsstart
KoW	Kompens.-Wirkung
Kr	Kreislauf
max	Maximum
min	Minimum
MSR	MSR-Umfang
Norm	Normalzustand
Ns	Nachspeisung
Pa	Parameter
Part	Partikel
Q	Querschnitt
rein	Reinigung
Rohr	Rohrleitung
Rü	Rückführung
S	Störung
St	Start
StG	Stellglied
Sp	Speicher
TA	Teilanlage
TABr	Brems-Schritt
TL	Tanklager
Vb	Verbrauch
Vz	Vorlaufzeit
x;y;z	Laufvariable



# Einleitung

# 1

## Aktuelle Anforderungen an die Systemverfahrenstechnik

### Zusammenfassung

#### **Ohne Systemverfahrenstechnik – keine optimalen stoffumwandelnden Systeme**

Neben der Betrachtung einzelner verfahrenstechnischer Prozessschritte ist für komplexe Prozesse auch eine Gesamtbetrachtung mittels der Systemverfahrenstechnik erforderlich, um das Optimum des Gesamtprozesses zu erreichen. Die aktuellen Anforderungen hierfür haben sich in den letzten Jahren wesentlich erhöht und sind – beginnend mit dem Systementwurf – konsequent einzubeziehen.

Die Systemverfahrenstechnik als selbstständiges Fachgebiet hat eine kurze, aber bewegte Vergangenheit. Der Beginn resultierte aus der Erkenntnis, dass die Optimierung eines Systems nicht durch die Optimierung der einzelnen Bestandteile erfolgen kann, sondern übergeordneten Wirkungsweisen folgen muss. Dem folgte als erster wesentlicher Schritt die Beschreibung komplexer technischer (vorzugsweise stoffumwandelnder) Systeme. Hierfür wurden verschiedene Ansätze vorgeschlagen und erprobt. Deren Prinzipien reichen von Differenzial-Ansätzen bis zu Wahrscheinlichkeits-Netzen, von numerischen Modellen bis zu KANBAN-Systemen (dies als einfache praktische Methodik). Einige Ergebnisse aus den anfänglichen mathematischen Modellierungen waren erfolgreich (siehe auch [1]), dies jedoch nur, wenn der Modell-Aufwand für große Produktmengen ökonomisch vertretbar war; für kleintonnagige Batchprozesse z. B. wären derartige Ansätze übermäßig ausufernd. Die Erkenntnis hieraus war: Es ist ein hoher Aufwand zu betreiben, um Ergebnisse zu erzielen, die mit konventioneller Planung leichter und kostengünstiger vorhersehbar sind. Damit war die anfängliche Euphorie abgeklungen, jedoch mehrere nutzbare Komponenten wurden im Ingenieuralltag etabliert.

Die letzte zusammenfassende Darstellung erfolgte 1997 in der Monografie „Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse“ von E. Blass [2]; hierbei wurden zahlreiche Kenntnisse zur Systemverfahrenstechnik für die Phase der Neuentwicklung technischer Systeme vermittelt. Mittlerweile ist die Verfahrenstechnik mit erweiterten Anforderungen konfrontiert, die an industrielle Prozesse gestellt werden. Ausgehend von einer starken und richtigen Sensibilisierung der Gesellschaft zu Umwelt- und Sicherheitsaspekten haben sich diesbezüglich neue, strengere Regularien ergeben; hierzu zählen z. B. die NAMUR-Vorgaben für Regelungen, neuartige Anforderungen an die Reinheit von Anlagen und Produkten sowie verstärkte Genehmigungsumfänge, die vom Baurecht bis zu Emissionsgrenzwerten führen. Parallel dazu wurde die Ingenieurfähigkeit verbessert mittels CAD/DAM-Techniken und Simulations-Plattformen, die von komplexen Kalkulationen bis zur 3D-Betrachtung reichen, sowie durch aktuelle Methoden zur optimalen Prozessanalyse. Ein weiteres Novum ist – gerade für moderne technische Strukturen – die Anwendung der Modultechnik sowie die Möglichkeiten von Industrie 4.0.

Für aktuelle Betrachtungen scheint es von Vorteil, wenn unter dem Gesamtbegriff „Systemverfahrenstechnik“ nicht nur die Methoden zur Synthese von Systemen aus Komponenten bzw. Systemelementen, sondern auch die Erkenntnisse aus der Zuverlässigkeitstechnik und der Prozessanalyse einbezogen werden. Denn mit Hilfe der letztgenannten sind Zusammenhänge in komplexen Systemen analysierbar, was nachfolgend dargestellt werden soll.

Hauptsächlich in den „täglichen“ ingenieurtechnischen Planungen zeigt sich, welche Herangehensweisen praktisch nutzbar sind und an welchen Stellen das Aufwand-Nutzen-Verhältnis ungünstig ist. An diesem Maßstab sollte ein theoretischer Ansatz gemessen werden: Welche Vorteile ergeben sich für die Gestaltung verfahrenstechnischer Prozesse (von der Entwicklung neuer bis zu Optimierung und Umbau vorhandener Systeme) unter Beachtung von Umwelt, Sicherheit und ggf. Reinheit.

Dabei soll der Schwerpunkt auf verfahrenstechnische Anlagen gelegt werden, die vorzugsweise in der (physikalisch, chemisch oder biologisch) stoffumwandelnden Industrie anzutreffen sind, weniger auf Stückgut-Prozesse (die hauptsächlich maschinenbaulicher Natur sind). In diesem Sinn werden die aktuellen bzw. zukunftssträchtigen Anforderungen (z. B. hohe Reinheit, Modul-Bauweise, Anforderungen gemäß Industrie 4.0) ebenso betrachtet wie die Dynamik und die Zeitabhängigkeit von Prozessen.

Bereits aus den genannten Aspekten wird deutlich, dass systemverfahrenstechnische Betrachtungen komplexen Charakter haben – sie können relativ einfache Prozesse zum Gegenstand haben, jedoch auch bis zu komplexen Fabrik-Planungen wirksam sein; sie sind heranzuziehen sowohl für die Prozesse an sich als auch deren Peripherie, die Sicherheits- sowie ggf. die Reinheits-Anforderungen. Um diesen Umfang zu erfassen, sollen die nachfolgenden Ausführungen schrittweise vom „Einfachen“ zum „Komplexen“ führen:

In diesem Sinn wurden in Kap. 2 die aktuellen Anforderungen an die systemische Betrachtung herausgearbeitet. Zu deren Bewältigung werden in Kap. 3 diejenigen Methoden betrachtet, die in der praktischen Ingenieurarbeit die systemische Herangehensweise unterstützen. Dies erfolgt häufig im Rahmen von technischen Projekten, deshalb wird in

Kap. 4 die Einbettung der Systembetrachtung in die Abwicklung technischer Projekte behandelt. Auf dieser Basis wird die systemverfahrenstechnische Betrachtungsweise dargestellt in Kap. 5 – vorzugsweise für neue Prozesse und beginnend bei der

- Planung von Prozessen und nachfolgend erweitert auf
- die Kopplung mehrerer Prozesse,
- die Prozess-Peripherie,
- die Sicherheits- und Reinheitsanforderungen,
- die Beherrschung verschiedener Betriebszustände sowie
- die Kooperation mit allen beteiligten Ingenieurgewerken.

Da die systemische Betrachtung auch bei etablierten Prozessen relevant ist, wird dies in Kap. 6 vertieft, beginnend bei der Betriebswirtschaft, der Anlagenzuverlässigkeit und bzgl. Industrie 4.0.

---

## Literatur

1. K. Hartmann (1997) Verfahrenstechnik und Wiedervereinigung; Akademie-Verlag
2. E. Blass (1997) Entwicklung verfahrenstechnischer Prozesse; Springer Heidelberg



# Wesentliche Anforderungen an die Systemverfahrenstechnik

# 2

Zuordnung systemverfahrenstechnischer Methoden bzgl. ihrer praktikablen Anwendung

## Zusammenfassung

**Die systemische Betrachtung ist eine Art „Adler-Blick“ auf komplexe Prozesse**

Die Anforderungen, die sich im Rahmen der praktischen Anwendung ergeben, werden analysiert und entsprechende Arbeitsschwerpunkte und Problemfelder abgeleitet.

Die Gestaltung stoffumwandelnder Prozesse basiert auf komplexen Anforderungen, die sich sowohl aus den erforderlichen Schutz-Anforderungen als auch aus der Spezifik der jeweiligen Prozesse ableiten. Ihre optimale Gestaltung ist ohne die systemische Betrachtung der gesamten Prozesskette nicht möglich. Hierfür sind die Anforderungen an diese Sichtweise zu untersuchen, ebenso die zu erwartenden Schwierigkeiten.

## 2.1 Systemverfahrenstechnik im wirtschaftlichen Kontext

Die Etablierung eines verfahrenstechnischen Systems kann aktuell nur bei Beachtung aller gesetzlichen und funktionalen Anforderungen erfolgreich sein. Dies sind hauptsächlich:

- Funktion des Systems für jeden Betriebszustand (ggf. statische und/oder dynamische incl. mehrerer Betriebszustände, An- und Abfahren, Stand by, Reinigung, Störungsbeherrschung);

- Einhaltung aller gesetzlichen Grenzwerte und Auflagen bzgl. Gesundheits-, Arbeits-, Brand/Ex- sowie des Umweltschutzes;
- Sicherung weitergehender Anforderungen wie Mehrprodukt-Fähigkeit eines Systems sowie Prozess- und Produkt-Reinheit bzw. GMP.

Aktuell ist eine Tendenz erkennbar, dass die Systemverfahrenstechnik (ab hier abgekürzt: SVT) wieder einen höheren Stellenwert innehat. Dies zeigt sich daran, dass an mehreren Universitäten/Hochschulen diesbezüglich Lehrstühle eingerichtet sind. Eine Betrachtung zu deren Forschungs-Ausrichtung zeigt, dass zahlreiche technische Systeme untersucht werden, jedoch als Einzelbetrachtung des jeweiligen Systems (siehe [1–3]).

Auf diese Weise kann das konkret betrachtete technische System sehr weit in Richtung Optimum entwickelt werden, jedoch mit wenigen verallgemeinernden Erkenntnissen für andere Typen von Prozessen (siehe auch Kap. 3). Wird eine derartige Verallgemeinerung erreicht, kann dies hilfreich sein als „Fahrplan“ für künftige technische Systeme bzw. die Optimierung vorhandener Systeme (z. B. um Engpässe aufzuweiten oder Ausbeuten zu erhöhen). Dies verdeutlicht die zwei wesentlichen „Startpunkte“ für die systemische Vorgehensweise:

- ▶ *Systemische Methoden zur Prozess-Betrachtung können dazu dienen, ein vorhandenes System zu verändern oder ein neues zu errichten.*

Diese Zielstellungen geben im Allgemeinen eine grobe Arbeitsrichtung vor, sind jedoch häufig zu präzisieren. Auf einer ausreichenden Datenbasis (siehe Kap. 4) kann die Nutzung der SVT-Methoden erfolgen, häufig im Rahmen eines technischen Projekts. Damit ergeben sich als prinzipielle Arbeitsschritte (wie in Abb. 2.1. verdeutlicht):

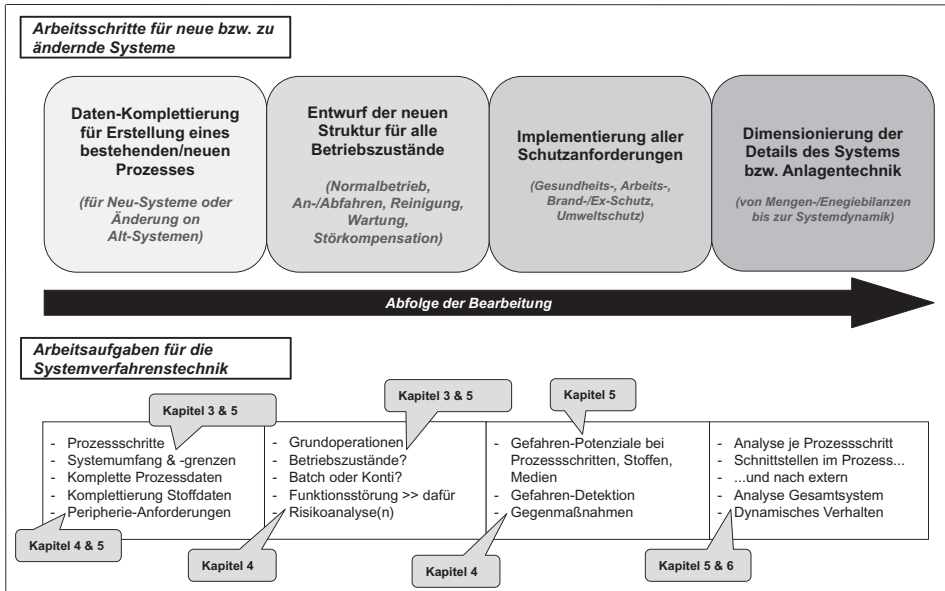
1. Komplettierung der Daten für die Gestaltung des technischen Systems;
2. Entwurf der neuen technologischen Struktur für alle möglichen Betriebszustände;
3. Implementierung der Anforderungen bzgl. aller Schutzfunktionen;
4. Dimensionierung der Details der Anlagentechnik

Die Einbeziehung der SVT ab dem Punkt 2 der o. g. Arbeitsschritte wird beginnend mit Kap. 3 behandelt, jeweils mit Verweisen für die Arbeits-Schwerpunkte.

---

## 2.2 Möglichkeiten und Grenzen der systemischen Betrachtung

Eine Beschreibung der SVT (wie von Kuhn et al. vorgeschlagen in [4, 5]) beinhaltet stets auch eine Darstellung ihrer Aufgaben bzw. Ziele wie von Grossmann et al. in [6]. umrissen. Der wesentliche Aspekt hierbei resultiert aus dem breiten Spektrum der möglichen technischen Systeme, die mehreren, z. T. gegenläufigen Kriterien unterworfen sind:

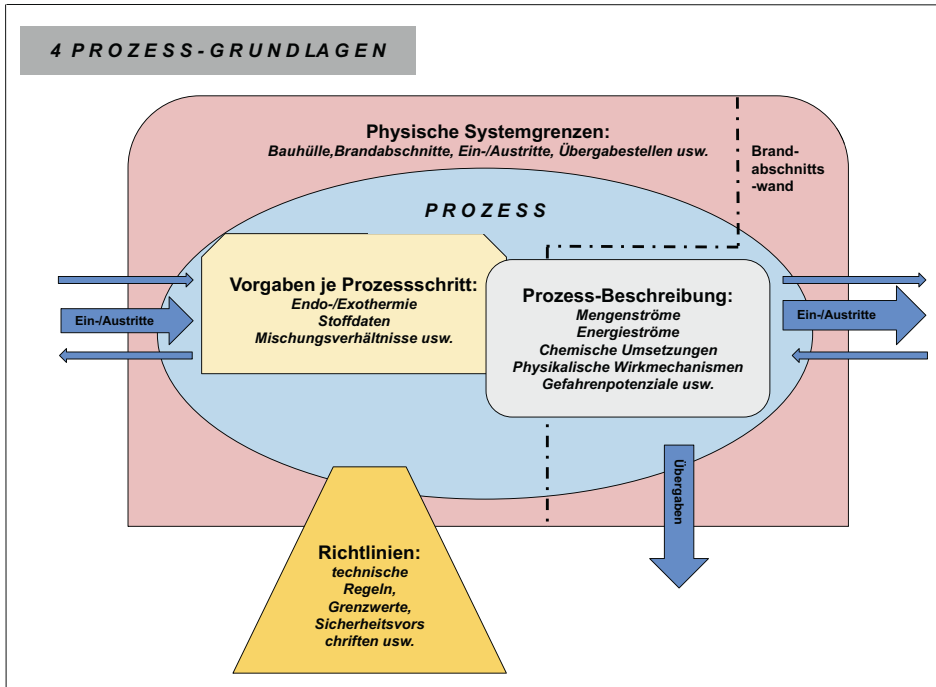


**Abb. 2.1** Zuordnung der systemischen Arbeitsschritte zu den Kapiteln

- Es können eine hohe oder niedrige Komplexität (z. B. Parallelströme, „Schleifen“) auftreten;
- Eine Beschreibung ist stofflich, energetisch, signalbasiert erforderlich;
- Prozess und technisches System sind nicht eineindeutig definierbar (Mehrproduktanlagen);
- Die Kopplungen zur Umgebung können vielfältig sein (z. B. Andienungen, Austritte, Sicherheit);
- Die Darstellung beinhaltet nicht nur den Normalbetrieb, sondern auch An-/Abfahren, Reinigungsabläufe, Störungserkennung/-beherrschung;
- Der Automatisierungs-Umfang ist relevant für alle genannten Funktionen, ebenso die Einflussnahme übergeordneter Steuerungen;
- Die Gestaltung sollte kurzfristige Umbauten ermöglichen (z. B. im Sinn von Industrie 4.0);
- Neben der Funktionalität eines Systems sind steigende Reinheitsanforderungen zu beherrschen (sowohl für Pharma- als auch für Lebensmittel- und Kosmetikverfahren; extrem für die Chipindustrie).

Es wird deutlich, dass dieses Spektrum von Anforderungen eine hohe Komplexität der ingenieurtechnischen Betrachtung erfordert. Dennoch kann jeder Gesamtprozess nur ba-





**Abb. 2.2** Struktur und Verflechtung eines Prozessschritts

sieren auf den Funktionalitäten der einzelnen Prozessschritte sowie ihren Verknüpfungen zueinander und zu externen technischen Systemen. Demnach sind – als erster Schritt – die Prozessschritte einzeln zu entwickeln: nicht nur als Mengen- und Energiebilanz, sondern weiterführend bis zu den Auswirkungen auf die tangierten Gewerke wie z. B. Gebäudetechnik und Brandschutz, wie in Abb. 2.2. dargestellt. Hierfür haben sich verschiedene ingenieurtechnische Kriterien bewährt:

- Die Vorgaben zum Prozessverlauf inklusive der Mengen-/Energie- und anderen Ströme (z. B. Lösungsmittel, Reinigungsstoffe), Gefahrenpotenziale der Stoffe und Umwandlungen usw.;
- Die Vorgaben zum jeweiligen Prozessschritt (z. B. Endo-/Exothermien, Stoffparameter, Mischungsverhältnisse)
- Die physischen Grenzen des betrachteten Systems (z. B. Ein- & Austritte, Bauhülle mit Brandabschnitten, IT-Schnittstellen, Übergabestellen für Abwässer);
- Die Rahmenrichtlinien durch technische Regeln, Grenzwerte, Sicherheitsvorschriften (siehe GABUS ab Kap. 3), auch durch standardisierte Technik für bestimmte Prozessschritte.

Dies wird gelingen, wenn der Prozessentwickler als Verfahrensgeber und der Projektverantwortliche als Designer des Systems gemeinsam jeden Prozessschritt erarbeiten. In Abb. 2.2 wird eine mögliche Struktur vorgeschlagen.

Sind die einzelnen Prozessschritte fixiert, kann eine systemische Gesamtbetrachtung als eine Art „Vogelperspektive“ erfolgen. In diesem Sinn ist es nicht nur von Bedeutung, welche Wärme-, Stoff- oder andere Wirkprinzipien in jedem einzelnen Prozessschritt auftreten, sondern welche Zusammenhänge zwischen den Prozessschritten erkennbar sind. Eine derartige Betrachtung kann – ggf. für einfache Prozesse – intuitiv durchgeführt werden; eine systematische Analyse ist in jedem Fall vorzuziehen, um eine hohe Genauigkeit und eine geringe Fehlerquote zu erzielen. Eine Methodik hierfür ist die Simulation – weniger basierend auf heuristischen Daten, sondern eher als Ursache-Wirkung-Kopplung (siehe Kap. 3, 4, 5 und 6)

Auf der Basis obiger Anforderungen soll die Anwendung der Systemverfahrenstechnik nachfolgend beschrieben werden.

---

## Literatur

1. O.-v.-Guericke-Universität Magdeburg, Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik; wissenschaftliche Arbeitsthemen (Stand 06/2020); Website [www.ovgu.de](http://www.ovgu.de)
2. TU München, Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik; wissenschaftliche Arbeitsthemen, (Stand 06/2020); Website [www.Svt.wzw.tum.de](http://www.Svt.wzw.tum.de)
3. Aachener Verfahrenstechnik (AVT) an RWTH Aachen; wissenschaftliche Arbeitsthemen; (Stand 06/2020); Website [www.avt.rwth-aachen.de](http://www.avt.rwth-aachen.de)
4. Kuhn/Briese (2019) Systemverfahrenstechnik – eine philosophische Begriffsanalyse; Chemie Ingenieur Technik Vol 91, Iss. 9
5. Kuhn/Pietsch/Briese (2017) Clarifying Thoughts About the Clarification of Liquids – Filtration and the Philosophy of Science; Chem. Ing. Tech. Bd. 89; Nr. 9
6. Grossmann/Westerburg (2000) Research Challenges in Process System Engineering; AIChE Journal, Vol. 46; No. 9



# Systemische Merkmale verfahrenstechnischer Prozesse

# 3

Grundlegende und praktikable Zusammenhänge der  
Systemverfahrenstechnik

## Zusammenfassung

**Die systemische Erfassung eines Prozesses erfordert geeignete Betrachtungs-Methoden.**

Ausgehend von vorhandenen Begrifflichkeiten zu technischen Systemen werden diese präzisiert, ergänzt und bei Bedarf eingehender erläutert. Schwerpunkte bilden dabei die Kriterien für Batch- und Konti-Systeme, die Wirksamkeit von Triebkräften und die zeitliche Relevanz von Prozessabläufen.

Zu technischen Systemen sind in der Literatur verschiedene, oft auch unterschiedliche Termini und Definitionen vorhanden. Für eine einheitliche Sprachregelung sollen diese bewertet und ggf. nivelliert werden. Neben der Einführung von geeigneten Abkürzungen werden wesentliche Termini eingehender betrachtet.

## 3.1 Abgrenzung von Fachbegriffen

Die bisher verwendeten Begrifflichkeiten sind in der Literatur nicht immer harmonisiert, sie werden nachfolgend präzisiert. Dies umfasst nicht nur Fachausdrücke aus der Verfahrenstechnik, sondern auch aus tangierenden Disziplinen. Wenn erforderlich, werden weitere Begriffe eingeführt und erläutert, siehe dazu Tab. 3.1. Die Reihenfolge wurde nicht alphabetisch, sondern didaktisch gewählt.

Bereits allgemein gebräuchliche Abkürzungen wie Zeit, Länge bzw. Weg, MSR, DIN, SDB werden hier nicht weiter erläutert. Die Kopplung der in Tab. 3.1 genannten Begriffe ist in Abb. 3.1 visuell verdeutlicht. Die Zusammenhänge zwischen den genannten Begriffen werden in den nachfolgenden Kapiteln diskutiert.

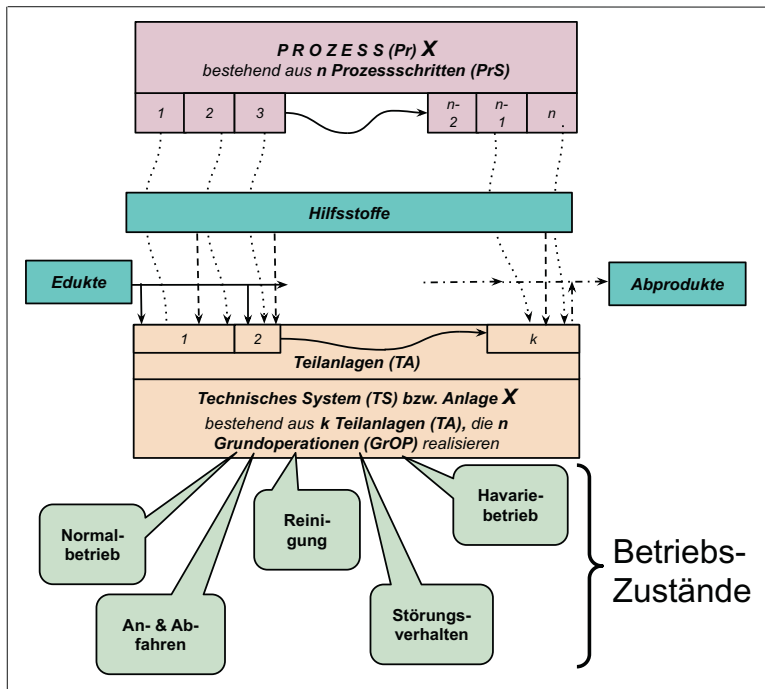
**Tab. 3.1** Erläuterung von Fachbegriffen

Begriff	Bedeutung	Bemerkungen	Abkürzungen
Produkt(e)	Erwartetes Ergebnis einer Herstellung		Pd
Edukt(e)	Eintrittsstoffe für einen Prozess		Ed
Prozess	Verfahren bzw. Herstellvorschrift für Produkt(e)	Möglich als F/E-Dokument; wird in einem technischen System realisiert	Pr
Prozessschritt	Einzelschritt im Prozess	Teilschritt eines Gesamtprozesses	PrS
Technisches System	Hardware für die Realisierung eines Prozesses	Für Gesamtprozess oder Prozessschritte; Synonym für „Anlage“	TS
Grundoperation	Hardware für einen Prozessschritt	Mehrere GrOP können ggf. zeitgleich ablaufen	GrOP
Teilanlage	Hardware für einen oder mehrere PrS	1 TA kann mindestens 1 PrS komplett realisieren	TA
Betriebszustand	Funktionalität, die das TS realisieren muss	Umfasst mindestens jeden Normalbetrieb, An-/Abfahren, Reinigung	BZ
Normalbetrieb	Prozessverlauf für alle Produkte, parameterbezogen	Beinhaltet alle geplanten Funktionen für geplante Edukt-Verarbeitungen	NB
Batch-System	TA zur Bearbeitung einer stationär diskreten Prozessmasse	Je TA können mehrere PrS realisiert werden (siehe unten)	BaS
Konti-System	TA zur „durchlaufenden“ Bearbeitung von Prozessmasse	Je TA kann mindestens 1 PrS realisiert werden (siehe unten)	KoS
Triebkraft	Parameter-Differenzen zur Prozess-Forcierung	Kann Konzentrationen, Drücke, Temperaturen usw. betreffen (siehe unten)	TrK
Hilfsstoffe	Nicht produkt-, aber prozessrelevante Eintrittsstoffe	Treten aus dem Prozess „sauber“ oder verunreinigt wieder aus (siehe „Abprodukte“).	Hs
Abprodukte	Austretende Hilfsstoffe und aus Edukten bzw. Prozess entweichende Stoffanteile	Aufbereitung meist in separaten Systemen; siehe „Infrastruktur“	Ap
Prozessmasse	Menge an Stoffen in einem Prozess	z. B. Edukte, Produkt, Hilfsstoffe, Abprodukte	PrM
Schnittstelle	Übergang zwischen Prozessen bzw. Prozessschritten	Charakterisierung für Übergänge bzgl. Mengen, Energien usw.	SS

(Fortsetzung)

**Tab. 3.1** (Fortsetzung)

Begriff	Bedeutung	Bemerkungen	Abkürzungen
Infrastruktur	Systeme, die den Prozess ver- bzw. entsorgen; meist periphere Systeme	Ein Typ Infrastruktur ggf. für mehrere Prozesse (z. B. Abgasreinigung); Abgaben aus Infrastruktur sollen harmlos für Umwelt sein.	IS
Logistik	Transport, Umschlag & Lagerung	Incl. Schnittstellen intern & extern	TUL
Sicherheit	Gesundheits-, Arbeits-, Brand- & Umweltschutz	Betrachtung im Komplex erforderlich	GABUS
Risikoanalyse	Methodik zur Gefahrenerkennung		RA
Forschung/Entwicklung	Vorarbeit zum Prozess-Entwurf	Basis für Erstellung eines TS	F&E



**Abb. 3.1** Beziehungen zwischen SVT-Begriffen

### 3.2 Zusammenhang zwischen Prozess und technischem System

Wie bei Grossmann et al. dargestellt (siehe Kap. 2), soll die SVT der Beschreibung von „creation and operation of the chemical supply chain“ dienen. Diese Aussage ist prägnant und erweist sich von den bekannten Begrifflichkeiten als praktikabelste; die Aussagen von Hartmann (siehe Kap. 1; „... grundlegende Gesetze für ... den Betrieb verfahrenstechnischer Systeme ...“ – hier als technische Systeme verstanden) weisen in eine ähnliche Richtung. Deshalb sollen diese Quellen als Basis für nachfolgende Diskussionen dienen. Zu Grossmann et al. sei folgende begriffliche Ergänzung erlaubt:

1. „Creation“ eines Systems setzt voraus, dass dessen Zielstellung und Umfang geklärt sind.
2. Die „supply chain“ kann als technisches System aufgefasst werden.
3. Nicht nur chemische, auch stoffumwandelnde, logistische usw. Systeme im Allgemeinen seien darin beinhaltet.

Gemäß der 1. Bemerkung ist für den Entwurf eines TS nicht nur eine rudimentäre Ziel-Darstellung erforderlich, sondern dessen weitgehend exakte Kenntnis. Generell besteht die Zielstellung eines Systems in einem angestrebten Ergebnis. Dies kann ein Produkt-Portfolio sein, aber auch z. B. die Reinigung definierter Abprodukte. Diese Angaben müssen vorliegen; eine Darstellungsform kann ein Lastenheft sein oder ein Entwicklungsbericht für einen neuen, ggf. einen erweiterten oder adaptierten Prozess.

Dabei kann – bezogen auf die 2. Bemerkung – der Umfang eines TS variieren. Als Beispiele seien genannt ein einzelner Filtrationsprozess und – extrem gegensätzlich dazu – eine komplette neue Fabrik. Hier wird deutlich, dass die Festlegung von

- Systemumfang sowie
- Grenzen und Schnittstellen

eine grundlegende Aufgabe ist, bevor jedwede Arbeit an einem System starten kann. Anders formuliert:

- ▶ Der Entwurf eines technischen Systems auf Basis einer unzureichend definierten Zielstellung (incl. Leistungs- und Betriebsparameter, Mengen-/Energiströme, Gebindearten, Gefahrenpotenzial, Automatisierung, Abproduktbehandlung, Schnittstellen bzw. Abgrenzung zu anderen Systemen) wird misslingen.

Die 3. Bemerkung basiert auf den realen Zusammenhängen, die bei verfahrenstechnischen Aufgabenstellungen wirksam werden:

- Die Verfahrenstechnik beschränkt sich nicht auf chemische Prozesse, sondern impliziert hochgradig z. B. physikalische Wirkprinzipien.

- Der Entwurf chemischer Prozesse kommt nicht umhin, auf viele Wirkmechanismen zurückzugreifen (je nach Prozesscharakter); Transportvorgänge, Lüftungssysteme, Elektronikschaltung seien wenige Beispiele hierfür.

Zielstellung eines Prozesses ist stets ein Ergebnis, das in der nachfolgenden bzw. umgebenden Wertschöpfungskette Verwendung findet. Damit wird der Prozess zur Grundlage für den Entwurf eines entsprechenden technischen Systems. Aus den obigen Darstellungen resultiert, dass eine intensive Korrelation zwischen einem geplanten Prozess und dem zu realisierenden System besteht. Welcher Art diese sind und welche Auswirkungen dies auf Prozess und System hat, soll detailliert herausgearbeitet werden, um deren Schlussfolgerungen für die SVT zu verdeutlichen.

► Der Prozess ist die Vorgabe; das System ist dessen Realisierung.

Hierbei gilt: Je detaillierter die Angaben zum Prozess sind, desto reibungsloser gelingt der System-Entwurf.

#### Beispiel

Ein F&E-Bericht gibt die Menge eines Lösungsmittels an für eine geplante wöchentliche Menge an Endprodukt. Nicht erwähnt wird, dass diese Menge stoßweise benötigt wird, und zwar in kurzer Zeit. Dies erfordert eine absolute höhere Fördermenge ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) als aus dem Wochen-Durchschnitt ersichtlich. Erfolgt die Auslegung des Vorratstanks und der Tankpumpe gemäß Wochenbedarf, wird zumindest die Pumpe zu klein sein, ggf. auch der Tank. ◀

Ein Prozess kann beschrieben werden als fachwissenschaftliche Ausarbeitung (z. B. für neue Prozesse als Ergebnis von F&E-Arbeiten) oder durch empirische Ermittlungen (z. B. als Erfahrungsbericht zu vorhandenen Prozessen), siehe dazu Lindemann [1] sowie Pahl und Beitz [2]. Beide Darstellungs-Typen haben verschiedene Charakteristiken: Während ein F&E-Bericht vorrangig auf den Prozessablauf inclusive aller Schritte, Mengen und Prozessdaten orientiert, beinhalten empirische Angaben im Wesentlichen die angestrebten Produktmengen bzw. zusätzlichen Anlagenteile. Damit ergeben sich für die systemische Betrachtung aus beiden Darstellungsarten verschiedene Aufgaben:

– F&E-Bericht:	ist zu ergänzen bis zum technischen System
– Erfahrungsbericht:	ist zu ergänzen bzgl. Prozessdarstellung

Es wird sichtbar, dass für die systemische Betrachtung eine kritische Analyse aller vorhandenen Daten sowie deren Validierung erforderlich ist (siehe [3]). Dies impliziert sowohl die Vollständigkeit der Daten als auch deren Passfähigkeit zueinander.

### Beispiel

In einem Erfahrungsbericht wird eine Erhöhung des Produktausstoßes untersucht. Hierbei ist ein zusätzlicher Prozessschritt erforderlich; für diesen ist eine neue Teilanlage konzipiert. Die Mengenänderungen edukt- und abproduktseitig sind betrachtet worden, u. a. die erhöhte Abgasmenge. Falls hierin neu auftretende Komponenten enthalten sind, die in der bisherigen Aufreinigung nicht eliminiert werden, ist eine zusätzliche Behandlung erforderlich. Wird dies nicht frühzeitig erkannt, kann diese Aufreinigung später fehlen. ◀

Für die inhaltlich und umfänglich komplette Bearbeitung von Sachverhalten haben sich Checklisten hochgradig bewährt; sie werden von technischen Anfragen bis zur Inbetriebnahme angewandt. Diese Methodik ist auch für die Vorbereitung eines TS nutzbar. Ohne auf Details einzugehen, sind in Tab. 3.2. die Kernpunkte derartiger Prüfpunkte gemäß B. Ebert in [4] aufgeführt.

Jeder der in Tab. 3.2. genannten Punkte beinhaltet umfangreiche Aspekte des Prozesses, die in den nachfolgenden Kapiteln ausführlicher behandelt werden. Dabei ist die geeignete Wahl des Prozess-Umfangs für dessen Beschreibung relevant.

**Tab. 3.2** Kernpunkte für Prozess-Beschreibungen als Entwurfs-Basis von TS

Kernpunkte	Detaillierungen	Bemerkungen
Allgemeine Angaben	Prozess-Ziele	
	Prozess-Umgebung	z. B. Ver- & Entsorgung
	Ex-/Brand- u. a. Risiken	Ggf. gebäudebezogen
	Reinheits-Anforderungen	z. B. Partikel pro m <sup>3</sup> Luft
Prozess-Angaben	Betriebsregime	z. B. Schichtrhythmus
	Prozessschritte & -regime	z. B. Konti oder Batch
	Mengen- & Energiebilanzen	
Prozess-Schnittstellen	Medien- und Werkstoffdaten	
	Übergänge zwischen den PrS	
	Rückführungen, „Schleifen“	
Charakteristik je Prozessschritt	Lager- & Transportabläufe	Incl. Transportzeiten
	Wirkmechanismen; Arbeitsabläufe	u. a. Zerfallsdaten, Vorratshaltung
	Technische Realisierbarkeit	z. B. Grundoperationen
	Schnittstellen zur Umgebung	wie Hilfsstoffe, Abprodukte
	Ggf. Steuerung	
	Separat-Anforderungen	z. B. Kreuzkontamination
Prozess-Auswirkungen	GABUS-Anforderungen	z. B. Grenzwerte
	Steuerung im Pr & in den PrS	Incl. Datentransfers
	Bauliche Konsequenzen	
	Weitere Gewerke	z. B. Lüftung, Gasreinigung



**Beispiel**

Wird eine komplette neue Fabrik als ein Prozess gewählt, kann die Beschreibung der Prozessschritte nur relativ grob erfolgen (z. B. Eduktandienung, Herstellung, Abfallbehandlung, Analytik, Instandhaltung). Eine günstigere Prozess-Aufteilung für eine neue Fabrik wäre hier, wenn diese aufgliedert würde und z. B.

- Die Umschlagstation für mehrere Edukte (z. B. separat für Flüssigkeiten, Feststoffe und Gase);
- Die Tankstationen je Flüssigkeit und Feststoff (incl. der Andienung bis zu den Prozessen);
- Die einzelnen Prozesse zur Herstellung der Produkte;
- Die Abproduktbehandlungen jeweils für Feststoffe, Flüssigkeiten und Gase;
- Die zentralen Hilfsstoff-Stationen jeweils für z. B. Druckluft, Energien, Raum- und Prozessluft usw.;
- Die Inprozess- und Qualitätskontrolle

als separate Prozesse betrachtet würden. Dementsprechend sind die Schnittstellen zwischen ihnen in der Gesamtdarstellung genau zu untersuchen.

Eine gegenteilige Betrachtung wäre der Fall, wenn eine Filtration als Prozess betrachtet wird: Der Umfang wird gering und leicht darstellbar sein, ist jedoch hochgradig abhängig von den Vor-Prozessen, z. B. was Feststoffgehalt, Kornverteilung usw. betrifft. ◀

Ist ein Gesamtprozess auf diese Weise in geeignete Einzelprozesse aufgeteilt, kann auf Basis von Tab. 3.2. die Beschreibung der einzelnen Prozesse (die jeweils mehrere Prozessschritte beinhalten) erfolgen. Deren Aufteilung in die Prozessschritte kann sein

– räumlicher Art	(z. B. wenn ein Tanklager im Hafen mit einem Verarbeitungsprozess in einem entfernten Werk verbunden ist) oder
– fachbezogen	(z. B. wenn ein Kernprozess von Lüftungssystemen, Abwasserbehandlungen und Abgasverbrennungen begleitet wird).

Hierbei sind im „ersten Wurf“ z. T. auch konventionelle Methoden wie Mengen- und Energiebilanzen oder Verfahrensfließbilder nutzbar. Derart vorbereitet, kann planungsseitig das „passende“ technische System entworfen werden.

---

### 3.3 Prozess – Teilanlage – Prozessschritt – Grundoperation

Nach dem beschriebenen Schritt der Prozess-Aufteilungen und der Datenermittlung je Prozess ergibt sich folgender Stand: Jeder Prozess ist als Ganzes beschrieben; die beinhaltenden Prozessschritte sind genannt. Als Pendant muss für den Entwurf des TS eine