

Systemverfahrenstechnik – Eine philosophische Begriffsanalyse

Michael Kuhn* und Heiko Briesen

DOI: 10.1002/cite.201800220

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

„Systemverfahrenstechnik“ scheint sprachlich und inhaltlich häufig unklar. Basierend auf einer philosophischen Analyse, welche die Begriffe „System“, „Technik“ und „Verfahren“ erschließt, wird daher eine möglichst tragfähige Definition von Systemverfahrenstechnik erarbeitet und zur Diskussion gestellt. Dabei wird betont, dass vor allem die systembasierte Arbeitsweise die betrachtete Disziplin von anderen verfahrenstechnischen Subdisziplinen abgrenzt.

Schlagwörter: Philosophie, Systemtheorie, Technikphilosophie, Verfahrenstechnik, Wissenschaftstheorie

Eingegangen: 20. Dezember 2018; *revidiert:* 01. Juli 2019; *akzeptiert:* 08. Juli 2019

Process Systems Engineering – A Philosophical Analysis of the Concept

The notion of “process systems engineering” seems often vague and unclear. Based on a philosophical analysis of the terms “system”, “engineering”, and “process”, a sound definition of process systems engineering is developed and put forward for discussion. Thereby, it is emphasized that especially the focus on the system level distinguishes the said discipline from other subdisciplines of process engineering.

Keywords: Philosophy, Philosophy of science, Philosophy of technology, Process engineering, Systems theory

1 Einleitung

Der Begriff „Systemverfahrenstechnik“ scheint schwer zugänglich. Dies zeigt sich an den entsprechenden Rückfragen etwa in Lehrveranstaltungen sowie auf Projekttreffen oder Tagungen. Zudem fanden und finden in der Disziplin selbst Reflexionen statt, was das Konzept Systemverfahrenstechnik (engl. *process systems engineering*) genau meint [1–5]. Trotz dieser begrifflichen Unklarheiten kann die Systemverfahrenstechnik als etabliertes Feld gelten, dessen Wurzeln bis in die 1950er Jahre zurückreichen [5–7]. Es existieren internationale Konferenzen, die speziell dieser Disziplin gewidmet sind, und diverse nationale und internationale Lehrstühle mit dem entsprechenden Arbeitsschwerpunkt. Sieht man sich als illustrative und anekdotisch gehaltene Hinführung zur Thematik die Internetauftritte einiger deutscher Lehrstühle an, bietet sich in den Selbstdarstellungen ein heterogenes Bild. Es heißt z. B., die Systemverfahrenstechnik zeichne „sich als Disziplin durch ihre integrierende Herangehensweise aus. Durch die enge Verschränkung von mathematischen und informationstechnologischen Techniken mit aktuellem Prozesswissen versucht sie auf Basis von Modellen Einsicht zu gewinnen“ [8]. Die Systemverfahrenstechnik solle Lösungsansätze entwickeln,

„die in der Lage sind, die inhärent hierarchische Struktur von Produktionssystemen adäquat zu berücksichtigen“; dabei würden „[m]athematische Methoden, neuartige Designansätze und experimentelle Validierungstechniken [...] miteinander kombiniert“ [9]. An anderer Stelle wird die Systemverfahrenstechnik gar nicht definiert, sondern lediglich ihre Arbeitsgebiete als „modellgestützte experimentelle Analyse“, „Prozesssynthese“ sowie „Prozessführung und Optimierungsalgorithmen“ angeführt [10]. Weiterhin wird die Systemverfahrenstechnik in ganz unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt, z. B. Feststoffverfahrenstechnik, Getränketechnologie, Kristallisation [8], Kohlenstoff- und Energiespeicherung [11], Polymerisation, Biomassekonversion sowie Energietechnik [10]. Systemverfahrenstechnik lässt sich also offensichtlich nicht über ihren Anwendungsbereich definieren. Aber auch die sonst gezeigten Ausführungen scheinen problematisch: Schließlich werden in anderen verfahrenstechnischen Subdisziplinen eben-

Dr.-Ing. Michael Kuhn, Prof. Dr.-Ing. Heiko Briesen
michael.kuhn@tum.de
Technische Universität München, Lehrstuhl für Systemverfahrenstechnik, Gregor-Mendel-Straße 4, 85354 Freising, Deutschland.

falls Modelle eingesetzt und es werden neue Prozesse entworfen. Obwohl die erwähnte Vagheit des Begriffs „Systemverfahrenstechnik“ hier etwas plakativ durch die Web-Auftritte einiger Lehrstühle illustriert wurde, stellt sich die Situation in den entsprechenden Fachpublikationen sehr ähnlich dar. Die klassische Definition von Takamatsu scheint tautologisch; er definiert *process systems engineering* als „engineering for process systems“ or ‘systems engineering for processes’ [1], auch wenn seine nachfolgenden Ausführungen diese Definition etwas weiter aufklären. Die Definition von Grossmann dagegen wirkt sehr weit gefasst: „Process Systems Engineering is concerned with the improvement of decision-making processes for the creation and operation of the chemical supply chain. It deals with the discovery, design, manufacture, and distribution of chemical products in the context of many conflicting goals.“ [3]. Andere Veröffentlichungen fokussieren mehr auf die Breite der Anwendungen, die schon zur Sprache kam [4, 5].

Da also die Systemverfahrenstechnik einerseits gut etabliert ist, der Begriff jedoch andererseits unklar und vage scheint, ist die Frage nach der Bedeutung des Begriffs „Systemverfahrenstechnik“ durchaus berechtigt. Ein präziseres Verständnis davon, was mit Systemverfahrenstechnik genau gemeint ist, kann Selbstbild und Profil der Disziplin schärfen, was auch die Außendarstellung bereichert. Zudem können konzeptionelle Ergebnisse dieser Art Eingang in Einführungskapitel von Lehrbüchern und Lehrveranstaltungen finden. Bevor jedoch beantwortet werden kann, was Systemverfahrenstechnik ist, muss geklärt werden, wie man sich dieser Frage sinnvollerweise nähert. Dies geschieht im nächsten Abschnitt, in dem ein philosophisches Vorgehen als geeignete Methode dargestellt und gerechtfertigt wird. Wie bereits eine vorangegangene Publikation [12] hat auch dieser Artikel das Nebenziel, Ingenieur*innen und Techniker*innen mit gewissen Aspekten und Vorzügen der Philosophie bekannt zu machen; denn die Philosophie ist ein viel zu wichtiges Thema, als dass sie innerhalb des Ingenieurwesens komplett vernachlässigt werden könnte. Nachdem im nächsten Teil des Textes das methodische Vorgehen eingeführt wurde, werden in den folgenden Abschnitten die einzelnen Bausteine der Bezeichnung – „System“, „Technik“ und „Verfahren“ – herausgearbeitet und am Ende zu einer Definition von Systemverfahrenstechnik zusammengefügt. Die gewonnene Definition wird anhand von kritischen Rückfragen weiter konkretisiert und zur Diskussion gestellt.

Bevor wie beschrieben fortgefahren wird, sind allerdings noch einige klärende Anmerkungen nötig. Von den genannten zentralen Konzepten wird der Begriff „System“ am umfangreichsten entfaltet, da er nach unserem Dafürhalten die zentrale Rolle beim Verständnis der Systemverfahrenstechnik spielt. „Technik“ und vor allem „Verfahren“ werden etwas kürzer erläutert, da diese bereits präziser in der Literatur verwendet werden. Weiterhin ist es wichtig zu betonen, dass der vorliegende Beitrag den Begriff „Systemverfahrenstechnik“ nicht historisch, sondern systematisch erschließen will. Begriffsgeschichtliche und historische

Anmerkungen dienen allein dem Ziel, einen für die Gegenwart brauchbaren Begriff von Systemverfahrenstechnik zu entwickeln. Leser*innen, die sich für einen geschichtlichen Zugang interessieren, seien auf die entsprechende Literatur zur Systemverfahrenstechnik [6, 7, 13] bzw. zur allgemeinen Technikgeschichte verwiesen [14, 15]. Obwohl zwischen englischen und deutschen Quellen gewechselt wird, zielen die zentralen Überlegungen auf den deutschen Begriff. Für eine detaillierte Erschließung des englischen *process systems engineering* kann analog vorgegangen werden, allerdings müsste die Quellenanalyse und vor allem die begriffsgeschichtliche Arbeit hierfür etwas anders ausgerichtet werden.

2 Methode

Eine zentrale Aufgabe der Philosophie ist die Klärung von Gedanken und Worten [12, 16]. Aus diesem Grund lohnt sich ein Rückgriff auf die Philosophie zur Beantwortung der Frage nach der Bedeutung des Wortes „Systemverfahrenstechnik“. Während Ingenieur*innen und Techniker*innen nämlich primär Spezialisten für technische Artefakte und die zugehörigen Theorien sind, zeichnen sich Philosoph*innen durch ihre Expertise im Bereich der Gedanken und ihrer Versprachlichung aus. Gerade die enge Verbindung von Gedanken und Worten hat in der Philosophie des 20. Jahrhunderts zum sogenannten *linguistic turn* geführt. In dieser weiterhin anhaltenden Bewegung wird thematisiert, dass Gedanken sowie die Bezugnahme auf die Welt nicht losgelöst von Sprache erfasst werden können und eine Klärung der Sprache damit auch eine Präzisierung der entsprechenden Gedanken bedeutet. Paradigmatisch schlug sich dies schon in dem oft zitierten Satz aus dem Frühwerk des Sprachphilosophen Ludwig Wittgenstein (1889 – 1951) nieder: „Die Grenzen meiner Sprache bedeuten die Grenzen meiner Welt.“ [17]

Zur Klärung von Begriffen bieten sich verschiedene Methoden an, wobei man häufig zwischen der Intension und der Extension von Begriffen unterscheidet. Die Intension bezeichnet das, was mit einem Begriff gemeint ist bzw. die Merkmale, aufgrund derer etwas unter einen Begriff fällt. Die Extension meint alle Gegenstände, die unter den Begriff fallen bzw. die durch ihn bezeichnet werden [16]. Um diese beiden unterschiedlichen Vorgehen zu illustrieren, wird die Erklärung der Begriffe „dispers“ und „Partikel“ in zwei verfahrenstechnischen Standardwerken betrachtet.

Stieß [18] schreibt: „Das Wort ‘dispers’ wird im gebräuchlichen Sinn von ‘(fein) verteilt’ und die Bezeichnung ‘Partikel’ auch als Oberbegriff für Körner, Tropfen, Blasen oder Mikroorganismen verwendet.“ Dagegen definiert Müller [19]: „Als dispers bezeichnet man Materie, die kein einheitliches Ganzes bildet, sondern in Elemente zerlegt ist, die voneinander abgrenzbar sind [...] Die Elemente der dispersen Phase werden auch allgemein als Partikeln bezeichnet. Feste Partikeln nennt man alternativ Teilchen oder Körner;

flüssige Partikeln Tropfen und gasförmige Partikeln Blasen“. Während also Stieß den Begriff „dispers“ noch intensional einführt (über ein Merkmal), erklärt er „Partikel“ über die Extension des Begriffs, indem er Beispiele von Gegenständen gibt, die als Partikel bezeichnet werden. Müller führt dagegen alle Begriffe über ihre Intension ein, d. h. er gibt klassische Definitionen unter Rückgriff auf Eigenschaften, z. B. Partikel als „Elemente, die klar voneinander abgrenzbar sind“. Wie zutreffend und umfassend die gezeigten Definitionen sind, soll hier nicht weiter hinterfragt werden; sie wurden lediglich zur Illustration der Intension-Extension-Unterscheidung angeführt.

In der langen Geschichte der Philosophie wurden meist die Intensionen von Begriffen anvisiert. Dies ist damit zu begründen, dass extensionale Begriffsdefinitionen diverse Probleme aufweisen. So lässt sich nie eine vollständige Liste aller Dinge angeben, die unter einen Begriff fallen. Dies ist etwa nicht möglich für alle zukünftigen Dinge, die korrekterweise von dem Begriff bezeichnet werden, z. B. Partikel, die heute noch nicht existieren. Verabschiedet man sich dagegen von einer vollständigen Liste, bleibt unklar, wie man überhaupt erkennen kann, ob es sich bei einem unbekanntem Ding um ein Partikel handelt, wenn es in der beschränkten Liste aller Dinge, die als Partikel gelten, nicht vorkommt. Aufgrund dieser Probleme des extensionalen Vorgehens haben Philosophen meist versucht, die Intension, also die Absicht von Begriffen, herauszuarbeiten. Doch auch diese Methode weißt Probleme auf. In jeder Definition kommen wieder undefinierte Begriffe vor; somit muss man entweder (i) unendlich lange neue Definitionen einführen, (ii) die Definition zirkulär gestalten oder (iii) das Definieren an einem beliebigen Punkt abbrechen. Diese drei unbefriedigenden Alternativen hat Hans Albert (*1921) als Münchhausen-Trilemma bezeichnet [20]. Aus diesen und weiteren Gründen hat der oben bereits erwähnte Philosoph Ludwig Wittgenstein in seinem enorm einflussreichen Spätwerk das Augenmerk auf die Extension von Begriffen gelegt. Dabei führte Wittgenstein ein Konzept ein, das er als „Familienähnlichkeit“ bezeichnet [21]. Wittgenstein meinte, dass nicht *alle* Gegenstände, die korrekterweise durch bestimmte Begriffe bezeichnet werden, notwendigerweise bestimmte Eigenschaften oder Merkmale gemeinsam haben. So wie sich eben verschiedene Familienmitglieder in bestimmten Eigenschaften ähneln, in anderen aber unterscheiden, sei es auch mit Begriffen. Er illustriert dies an einer bekannten Stelle auch am Beispiel des Spiels. Hierzu wird das längere Originalzitat wiedergegeben:

„Betrachte z. B. einmal die Vorgänge, die wir ‘Spiele’ nennen. Ich meine Brettspiele, Kartenspiele, Ballspiel, Kampfspiele, usw. Was ist allen diesen gemeinsam? – Sag nicht: ‘Es muß ihnen etwas gemeinsam sein, sonst hießen sie nicht ‘Spiele’ – sondern schau, ob ihnen allen etwas gemeinsam ist. – Denn wenn du sie anschaust, wirst du zwar nicht etwas sehen, was allen gemeinsam wäre, aber du wirst Ähnlichkeiten, Verwandtschaften, sehen, und zwar eine ganze Reihe. [...] Schau z. B. die Brettspiele an, mit ihren mannigfachen Verwandtschaften. Nun geh zu den Kartenspielen

über: hier findest du viele Entsprechungen mit jener ersten Klasse, aber viele gemeinsame Züge verschwinden, andere treten auf. Wenn wir nun zu den Ballspielen übergehen, so bleibt manches Gemeinsame erhalten, aber vieles geht verloren. – Sind sie alle ‘unterhaltend’. Vergleiche Schach mit dem Mühlfahren. Oder gibt es überall ein Gewinnen und Verlieren, oder eine Konkurrenz der Spielenden? Denk an die Patienzen. In den Ballspielen gibt es Gewinnen und Verlieren; aber wenn ein Kind den Ball an die Wand wirft und wieder auffängt, so ist dieser Zug verschwunden. Schau, welche Rolle Geschick und Glück spielen. Und wie verschieden ist Geschick im Schachspiel und Geschick im Tennisspiel. Denk nun an die Reigenspiele: Hier ist das Element der Unterhaltung, aber wie viele der anderen Charakterzüge sind verschwunden! Und so können wir durch die vielen, vielen anderen Gruppen von Spielen gehen. Ähnlichkeiten auftauchen und verschwinden sehen. Und das Ergebnis dieser Betrachtung lautet nun: Wir sehen ein kompliziertes Netz von Ähnlichkeiten, die einander übergreifen und kreuzen. Ähnlichkeiten im Großen und Kleinen.“ [21]

Der Vollständigkeit halber muss darauf hingewiesen werden, dass sich Wittgenstein nicht allein mit der Extension von Begriffen befasste. Er wollte vielmehr ein einfaches Abbild-Modell von Sprache, das er selbst in seinem Frühwerk vertreten hatte, kritisieren und den Blick für die vielfältigen Praktiken der Sprachverwendung öffnen. Wittgenstein ist damit ein zentraler Vertreter des *linguistic turn*. Hier wird also nur ein Aspekt des späten Wittgenstein hervorgehoben. Nach dieser wichtigen Einschränkung wird der Blick zurück auf Intension-Extension-Unterscheidung gewendet.

Trotz der vorhandenen Schwierigkeiten mit der intensionalen Definition von Begriffen, wird dieses Vorgehen hier gewählt, um den Begriff „Systemverfahrenstechnik“ zu klären. Aufgrund des großen Einflusses, den Wittgensteins Ansatz hat, ist es notwendig, das klassische intensionale Vorgehen zu rechtfertigen und zu begründen, warum nicht einfach eine lange Liste an Gegenständen angelegt wird, die unter „Systemverfahrenstechnik“ fallen, und Familienähnlichkeiten unter ihnen gesucht werden. Was jedoch häufig übersehen wird: Während es, wie Wittgenstein gezeigt hat, nicht für *alle* Begriffe einen Kern an Eigenschaften gibt, die sämtlichen Gegenständen, die unter sie fallen, zukommen, schließt dies nicht aus, dass dies doch zumindest für *einige* Begriffe gilt. Entsprechend wird hier unterstellt, dass es im Falle der Systemverfahrenstechnik eine solche allen Systemverfahrenstechniken gemeinsame inhaltliche Überlappung gibt. Diese zentrale Überlappung bzw. dieser harte Kern soll im Folgenden herausgearbeitet werden. Denn sollte sich tatsächlich ein solcher harter Kern finden lassen, hätte die gewonnene Definition den Vorteil intellektueller Ökonomie, d. h. sie wäre wesentlich leichter zu handhaben und damit nützlicher für Praxis und Lehre als eine (lange) Liste an Gegenständen mit bestimmten Beziehungen zwischen ihnen. Bezüglich des oben erwähnten Münchhausen-Trilemmas ist zu sagen, dass in diesem Artikel Alternative (iii) ge-

wählt wird. Das Definieren wird entsprechend nach einer Definitionsebene bewusst abgebrochen, da damit schon das Wesentliche erreicht ist, nämlich das unbekannte Konzept „Systemverfahrenstechnik“ auf deutlich klarere und bekanntere Begriffe zurückgeführt zu haben. Hierfür wird Systemverfahrenstechnik, wie oben schon angedeutet, zerlegt in die Begriffe „System“, „Technik“ und „Verfahren“.

3 System

Das altgriechische Wort *systema* ist der Ursprung des deutschen System-Begriffs. Es bedeutet so viel wie „das Zusammengestellte“ oder „das Zusammengeschlossene“ [22]. Eine heute sehr einflussreiche Systemdefinition geht auf den Biologen Ludwig von Bertalanffy (1901 – 1972) zurück, der Systeme als „complexes of elements standing in interaction“ [23] verstand. Bertalanffy gilt auch als einer der Gründer der allgemeinen Systemtheorie, die sich über Disziplingrenzen hinweg mit den Eigenschaften und den Beschreibungsmöglichkeiten von Systemen befasst. An Bertalanffys Definition fällt auf, dass dort ebenfalls das Wort „Element“ vorkommt. Unter einem Element versteht man klassisch ein Bestandteil einer Menge [22]; so wird dies etwa in der Mathematik ausbuchstabiert. Wichtig dabei ist, dass dieser Begriff somit schon impliziert, dass es Gegenstände – die Elemente – gibt, die Teil des Systems sind, und welche, die nicht zum System gehören. Systeme zeichnen sich also auch ganz zentral durch ihre Systemgrenzen aus. Weiterhin betont Bertalanffy die Interaktionen zwischen den Elementen. Ein System besteht also aus seinen Elementen und den Verbindungen bzw. Relationen zwischen ihnen [23]. Basierend auf dieser Grundcharakterisierung hat die allgemeine Systemtheorie nun einen vielfältigen Werkzeugkasten zur Beschreibung von Systemen entwickelt. So versteht man unter der Kompliziertheit bzw. Varietät eines Systems die Anzahl seiner Elemente und unter der Systemkomplexität die Anzahl an Verbindungen bzw. Relationen zwischen diesen Elementen [24]. Diese Unterscheidung kann am Beispiel einer feststoffbeladenen Fluidströmung veranschaulicht werden. Die Kompliziertheit oder Varietät des betrachteten Systems steigt mit der Anzahl an eingeschlossenen Partikeln. Die Komplexität ist ein Maß für die Interaktion zwischen den Partikeln, z. B. in Form von Stößen. So kann etwa die Systemkomplexität auch für eine konstante Partikelzahl gesteigert werden, indem ein Übergang von einer laminaren in eine turbulente Strömung realisiert bzw. der Turbulenzgrad erhöht wird. Somit existieren mehr Interaktionen zwischen den Systemelementen, also den Partikeln. Neben der Unterscheidung in Kompliziertheit und Komplexität führte Günter Ropohl (1939 – 2017) die drei grundlegenden Auffassungen von Systemen nach Funktion, Struktur und Hierarchie ein [24]. Diese Unterteilung ist auch Abb. 1 graphisch dargestellt.

Weiterhin lassen sich Systeme nach diversen weiteren Kategorien untergliedern [24], von denen einige zentrale in

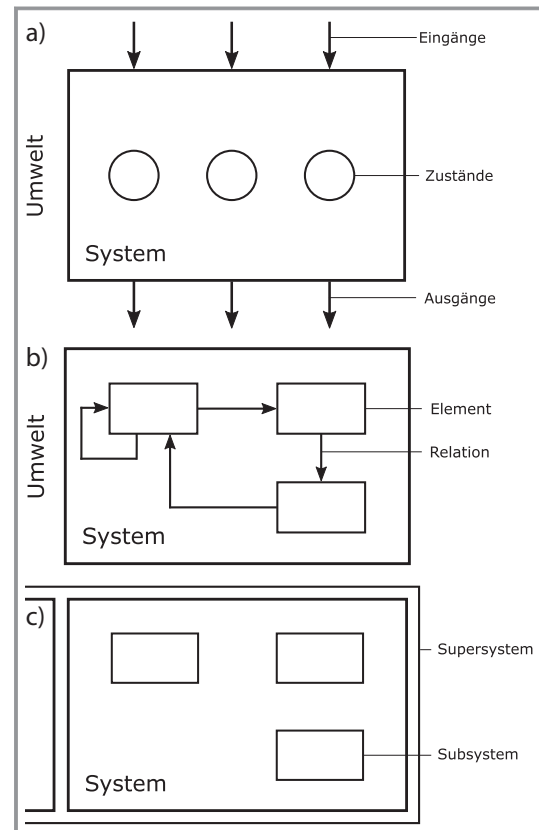


Abbildung 1. a) Funktionales, b) strukturelles und c) hierarchisches Systemkonzept (adaptiert nach [24]).

Tabelle 1. Klassifikation von Systemen (adaptiert nach [24]).

| Merkmal | Merkmalsausprägung | | |
|----------------|-----------------------|----------------------|---------------------|
| Umgebung | Beziehung | geschlossen | offen |
| Struktur | Zeitabhängigkeit | starr | flexibel |
| | Anzahl Subsysteme | einfach | kompliziert |
| | Anzahl Relationen | einfach | komplex |
| Funktion | Strukturform | unspezifische Formen | spezifische Graphen |
| | Zeitabhängigkeit | statisch | dynamisch |
| | Funktionswerte | kontinuierlich | diskret |
| | Funktionsstyp | linear | nicht linear |
| Verhaltensform | Funktionsbestimmtheit | deterministisch | stochastisch |
| | | instabil | stabil |

Tab. 1 wiegegeben sind. Selbstverständlich haben die gezeigten Merkmalsausprägungen in erster Linie qualitativen Charakter, dies gilt vor allem für die Ausprägungspaare einfach/kompliziert und einfach/komplex, die gerade schon diskutiert wurden.

Wichtig ist noch zu betonen, dass es keine Systeme in der Welt „gibt“. Systeme sind immer konstruierte Entitäten. Auch wenn früher teilweise zwischen gedanklichen und gegenständlichen Systemen unterschieden wurde [25], wird diese Trennung heute meist nicht mehr vorgenommen [24]. Denn es beruht immer auf einer aktiven Entscheidung, welche Gegenstände zu einem System gezählt werden und welche nicht, d. h. wie die Systemgrenze gezogen wird. Zudem ergeben sich unter verschiedenen Fragestellungen, verschiedene systemhafte Beschreibungen. Die Verfahrenstechnik lässt sich z. B. je nach Kontext in historische Elemente bzw. Phasen unterteilen (wie beispielhaft für die Filtrationsforschung von Kuhn et al. gezeigt [12]), nach wirksamen Mechanismen (mechanische Verfahrenstechnik, thermische Verfahrenstechnik etc.) oder aufgrund von spezifischen Anwendungen (Lebensmittelverfahrenstechnik, Pharmazeutische Verfahrenstechnik etc.) untergliedern. Dabei sind diese verschiedenen Systemfassungen in keine eindeutige Hierarchie zu bringen, sondern hängen von der jeweils eingenommenen Perspektive und dem entsprechenden Ziel der Systembildung ab.

Nach diesen ergänzenden Ausführungen soll das Wichtigste dieses Abschnitts noch einmal zusammengefasst werden: Unter „System“ wird im Folgenden eine gedanklich abgegrenzte Menge von interagierenden Elementen verstanden. Diese Definition wird später zur Aufschlüsselung von „Systemverfahrenstechnik“ herangezogen.

4 Technik

techné, der griechische Wortursprung des deutschen Wortes Technik, bezeichnet Tätigkeiten des Hervorbringens, Erzeugens und Gestaltens [22]. Während im griechischen Technikbegriff noch sowohl die modern verstandene Technik als auch die Kunst enthalten war, trennen wir heute meist diese beiden Bereiche. Für diesen Artikel ist vor allem der Gegensatz von Wissenschaft und Technik wichtig. Während sich Wissenschaft primär mit der Analyse der bestehenden Welt befasst, geht es der Technik um den aktiven Eingriff und die Veränderung der Welt bzw. das Ausloten von möglichen Eingriffen [12, 26, 27]. In den letzten Jahrzehnten wird dagegen zurecht häufig von einem zunehmend stärkeren Verschmelzen von Wissenschaft und Technik gesprochen. Wissenschaft ist nur möglich mithilfe aufwendiger technischer Versuchsaufbauten; Technik bedient sich vielfältiger wissenschaftlicher Analysemethoden etc. Aufgrund dieser Verschmelzung der beiden Disziplinen wurde immer wieder vorgeschlagen, nur noch von „Technoscience“ [28] zu sprechen. Allerdings muss für diesen Befund klar sein, was hier verschmilzt; und damit werden bereits (wie auch immer geartete) Konzepte von Wissenschaft und Technik zugrunde gelegt. Es wird hier davon ausgegangen, dass die eben präsentierte Wissenschaft-Technik-Unterscheidung einen guten Startpunkt für eine solche Abgrenzung darstellt.

Im gegenwärtigen Zusammenhang ist es wichtig, dass Technik immer als System aufgefasst werden kann, d. h. ver-

schiedene Techniken bestehen jeweils aus interagierenden Elementen [27, 29]. So wurden bereits in der griechischen und römischen Antike mechanische Techniken auf sogenannte „einfache Maschinen“ bzw. Basismechanismen zurückgeführt, z. B. das Seil, den Hebel, die Rolle und den Keil [30, 31]. Es wurde vermutet, dass sich aus diesen Elementen alle weiteren mechanischen Vorrichtungen zusammensetzen lassen. In der Renaissance führte Leonardo da Vinci (1492 – 1519) die Explosionszeichnung ein, die zum ersten Mal eine übersichtliche Darstellung der interagierenden Elemente mechanischer Apparate erlaubte [32]. In gängigen CAD-Systemen (CAD = *computer-aided design*) findet sich heute noch die Unterscheidung in den *parts*- und den *assembly*-Modus, die die Konstruktion von Einzelteilen und den anschließenden Zusammenbau dieser Einzelteile erlauben. Dies reflektiert ebenfalls die systemhafte Natur mechanischer Konstruktionen. Anhand der gleichen Logik analysieren Technikhistoriker [30] und Ökonomen [33], wie technische Innovationen aus gegebenen Elementen zusammengesetzt werden. Als weiteres Beispiel wird die TRIZ-Methode angeführt. Dieses Vorgehen, das „systematisches Erfinden“ verspricht [34], basiert abermals darauf, gegebene elementare Lösungen durch gezielte Zusammenführung zu neuen Techniken bzw. Erfindungen zu kombinieren. Wichtig ist, dass nicht nur mechanische Konstruktionen aus einzelnen Elementen aufgebaut sind, dies gilt z. B. auch für die Elektronik. In diesem Fall sind die Elemente etwa Widerstände, Dioden und Transistoren, die über Leiterbahnen miteinander interagieren. Weiterhin müssen Systemelemente nicht materiell sein; auch Prozessvariablen können als Elemente betrachtet werden. In der Regelungstechnik unterscheidet man z. B. Führungsgrößen, Zustandsgrößen, Regelgrößen und Störgrößen. Diese Elemente stehen in einem gegebenen Regelungssystem in Interaktion. Aufgrund dieses stark systemhaften Charakters der Kybernetik bzw. Regelungstechnik waren die Entwicklungen von Kybernetik und Systemtheorie eng verknüpft [35, 36].

Nachdem gerade der Systemcharakter von Technik unterstrichen wurde, soll noch einmal an den zentralen Aspekt dieses Abschnitts erinnert werden: Technik zeichnet sich durch ihr Ziel aus, aktiv in die materielle Welt einzugreifen bzw. Eingriffsmöglichkeiten auszuloten. Mit diesem Technikbegriff wird im Folgenden weitergearbeitet.

5 Verfahren

Unter einem Verfahren wird, wie üblich, hier ein Stoffumwandlungsprozess verstanden, wobei Stoffumwandlung durch eine Änderung der Zusammensetzung, der Eigenschaften oder der Stoffart geschehen kann. Verfahrenstechnik bezeichnet daher Stoffumwandlungstechnik [37, 38]. In der mechanischen Verfahrenstechnik wären mögliche Systemelemente etwa die Partikel in einer Mühle. Diese Elemente interagieren miteinander, Partikel mit Partikeln und Partikel mit der Mühle, sofern auch die Mühle als Systemele-

ment betrachtet wird. Hierbei handelt es sich um einen technischen Prozess, da der Zustand der Welt – hier die gegebene Partikelgrößenverteilung – gezielt verändert wird, d. h. die Partikelgrößenverteilung verschiebt sich hin zu kleineren Partikeln. Doch nicht nur bzgl. der Vorgänge in einzelnen Apparaten lässt sich hier ein Systemcharakter attestieren. Auch gesamte verfahrenstechnische Prozesse sind aus interagierenden Elementen, den einzelnen Operationen, aufgebaut. Dieser Zusammenhang wird üblicherweise in Fließbildern dargestellt, die somit ein struktureles Systemkonzept nutzen. Weiterhin gibt es, wie bereits im letzten Abschnitt ausgeführt, auch in der Verfahrenstechnik nicht nur materielle Systemelemente, sondern ebenfalls immaterielle. Immaterielle Systemelemente können Zustandsgrößen sein, welche die Zustände in bestimmten Apparaten oder Anlagenteilen beschreiben und wiederum miteinander wechselwirken. Zudem existieren auch hier extern angelegte Regelungsgrößen; die meisten Prozesse sind etwa mit einem Prozessleitsystem verbunden [37]. Das Hardware-System der Anlage interagiert also mit einem Software-System und unter Umständen ist gerade dieses neue System, das sich aus den beiden genannten Subsystemen zusammensetzt, die geeignete Beschreibungsebene für manche Problemstellungen.

6 Zwischenfazit und kritische Rückfragen

Resümiert man die bisherigen Überlegungen und fügt die einzeln eingeführten Begriffe wieder zusammen, so lässt sich unter Systemverfahrenstechnik die systemhafte Beschreibung von technischen Stoffumwandlungsprozessen verstehen. Wobei systemhaft hier nicht als synonym zu systematisch (im Sinne von planvoll oder geordnet) verstanden werden soll, sondern explizit als „aus interagierenden Elementen aufgebaut“.

Jedoch muss man an dieser Stelle kritisch rückfragen: Ist damit nicht jede verfahrenstechnische Tätigkeit der Systemverfahrenstechnik zuzuordnen? Wenn etwa ein Ingenieurbüro einen neuen Prozess aus verschiedenen, interagierenden Grundoperationen (*unit operations*) aufbaut, zählt das dann ebenfalls als Systemverfahrenstechnik? Oder betreiben alle Thermodynamiker*innen, die eine Energiebilanz eines verfahrenstechnischen Apparates aufstellen, Systemverfahrenstechnik? Denn hier wird offensichtlich ein abgegrenztes System gezielt auf der Ebene seiner Funktion analysiert (vgl. Abschn. 3). Dies scheint an dem angestrebten präziseren Begriffsverständnis vorbeizugehen, da der somit gewonnene Begriff von Systemverfahrenstechnik offensichtlich zu weit gefasst ist. Das erzielte Verständnis muss daher weiter präzisiert werden.

7 Lösungsvorschlag

Aufgrund der genannten Probleme wird vorgeschlagen, nur dann von Systemverfahrenstechnik zu sprechen, wenn der

Systemcharakter einer verfahrenstechnischen Aufgabenstellung explizit hervorgekehrt und daran gearbeitet oder dieser allgemein analysiert wird. Bleibt die Frage, was es heißt, den Systemcharakter explizit hervorzukehren und daran zu arbeiten bzw. den Systemcharakter zu analysieren. Typischerweise geschieht das Arbeiten am Systemcharakter durch eine neue Systemformulierung, d. h. indem eine Problemstellung in einer neuen Weise funktional, struktural oder hierarchisch als System erschlossen wird (vgl. Abschn. 3). In diesem Fall wird am Systemcharakter gearbeitet. Von zentraler Bedeutung sind dabei Modelle. Unter einem Modell wird hier eine manipulierbare Repräsentation eines Systems verstanden (wobei es auch eine Vielzahl anderer Modellbegriffe gibt [39]). Ein gedachtes bzw. formuliertes System wird also genau dann zu einem Modell, wenn seine Darstellung oder Verkörperung eine gezielte Beeinflussung erlaubt. Dies gilt z. B. für Watson und Cricks bekanntes Modell der DNS. Watson sagt, sie hätten „tinkertoyle-like models“ [40] zur Entschlüsselung der DNS-Struktur verwendet. Dabei wurde ein „fiddling with the molecular models“ [40] betrieben, um die wahre Struktur zu finden, d. h. die modellhafte Repräsentation wurde gezielt manipuliert bzw. beeinflusst. In ähnlicher Weise erlauben Computermodelle die Manipulation von Parametern, um mehr über das repräsentierte Zielsystem zu lernen. Physikalische Skalenmodelle können ebenfalls genutzt werden, um gezielt bestimmte Parameter zu variieren, man denke z. B. an ein verkleinertes Modell eines Automobils oder eines Gebäudes, das im Windkanal verschiedenen Strömungsbelastungen ausgesetzt wird. Da also Modelle wiederum nur Repräsentationen von Systemen sind, impliziert die Modellbildung immer schon eine Systembildung.

Mit dem gewonnenen Verständnis lässt sich nun klären, warum ein Großteil dessen, was in dem Feld Systemverfahrenstechnik betrieben wird, schon unter Systemformulierung (was häufig in der Form von Modellformulierung geschieht) gefasst werden kann. Wenn etwa eine neues Multiskalen-Modell für einen verfahrenstechnischen Prozess vorgelegt wird, wird der Prozess in einer neuen Weise mithilfe eines hierarchischen Systemkonzeptes beschrieben. Und wenn diese Systemformulierung nun noch in eine manipulierbare Form, also ein Modell gebracht wird, kann damit gezielt etwas über den Prozess gelernt und dieser optimiert werden. Optimierung, ebenfalls ein häufig vorkommendes Thema in der Systemverfahrenstechnik, ist wiederum direkt mit einer neuen Systemformulierung verknüpft. Das ursprüngliche System wird dabei nämlich in eine neue Systemstruktur eingebettet (vgl. struktureles Systemkonzept in Abschn. 3 und Abb. 1), wobei die neu angekoppelten Systemelemente bzw. Subsysteme gerade die Ziel- oder Kostenfunktion und der Optimierer sind. Während der Optimierungsoperation wird dann der Output der Kostenfunktion durch gezielte Variation des Inputs des ursprünglichen Systems minimiert (vgl. funktionales Systemkonzept in Abschn. 3 und Abb. 1). Dieses Vorgehen ist in Abb. 2 exemplarisch dargestellt.

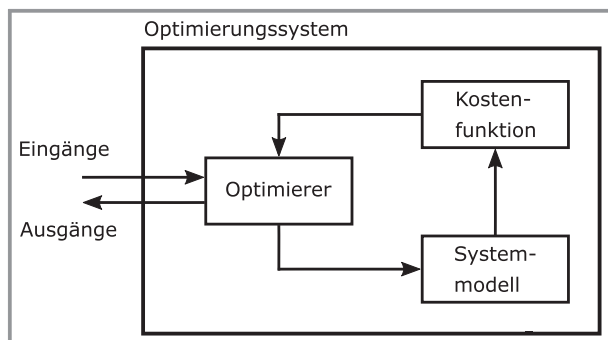


Abbildung 2. Exemplarische Darstellung eines Optimierungssystems in strukturaler Darstellung.

Analoges gilt für die Regelung von Prozessen. Wie bereits erläutert, bedeutet Regelung, dass das ursprüngliche System in eine neue Struktur (vgl. struktureles Systemkonzept in Abschn. 3 und Abb. 1) eingegliedert wird (Abb. 3). Das neue Subsystem „Regler“ manipuliert dabei die Eingangsgrößen des ursprünglichen Systems so, dass die detektierbaren Ausgangsgrößen den gewünschten Wert zeigen.

Um auf bereits genannte Beispiele zurückzukommen: Das Ingenieurbüro, das einen verfahrenstechnischen Prozess aus verschiedenen Operationen zusammensetzt, betreibt damit keine Systemverfahrenstechnik, da es nicht explizit den Systemcharakter der Problemstellung hervorkehrt und daran arbeitet, sondern eine gegebene Systemformulierung (hier die Unterteilung in Grundoperationen) übernimmt. Thermodynamiker*innen, die die thermischen Eingangs- und Ausgangsgrößen einer verfahrenstechnischen Operation analysieren, bedienen sich ebenfalls einer bereits etablierten funktionalen Systemformulierung. Sie führen zwar eine Analyse durch, jedoch nicht bezüglich der allgemeinen Eigenschaften des Systems, wie gleich noch genauer ausgeführt wird. Zudem würde eine reine Analyse nicht als Technik gelten, da damit noch nicht zwangsläufig Möglichkeiten zur gezielten Veränderung der materiellen Welt ausgelotet werden, was oben als Merkmal von Technik genannt wurde. Ebenfalls stellt eine Standardanwendung eines PID-

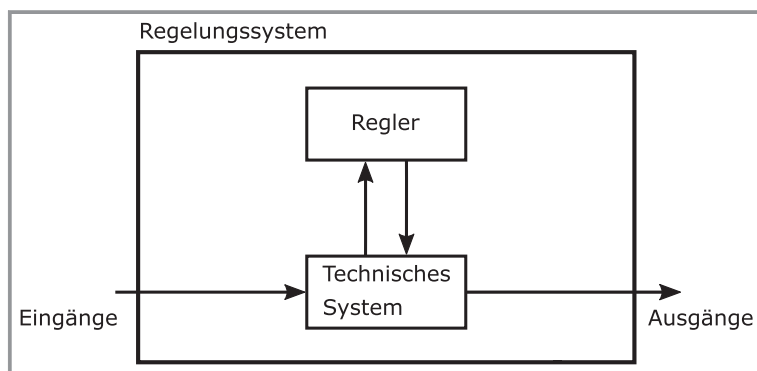


Abbildung 3. Exemplarische Darstellung eines Regelungssystems in strukturaler Darstellung.

Reglers zur Kontrolle eines Rührkesselreaktors noch keine systemverfahrenstechnische Problemstellung dar, da auch hierbei auf eine etablierte Systembildung zurückgegriffen werden kann. Allerdings handelt es sich um eine technische Fragestellung, da mit dem Regler gezielt der Zustand der Welt – hier des geregelten Systems – verändert wird. Systemverfahrenstechnik umfasst im Gegensatz zu den genannten Beispielen jede neue Systemformulierung im Bereich der Verfahrenstechnik, wie sie sich in neuen Modellformulierungen, Optimierungsansätzen oder Regelungskonzepten niederschlägt. Hierzu ist eine einschränkende Anmerkung nötig: Eine vollständige Entfaltung des Begriffs des „Neuen“ würde den Umfang dieses Beitrages sprengen. In der vorliegenden Arbeit wird unter Neuheit vereinfacht die Systembildung mit Elementen oder Relationen verstanden, die in bisher etablierten Systemformulierungen nicht enthalten sind. Weitere Hinweise zur Konzeption des Neuen in Wissenschaft und Technik finden sich in der entsprechenden Literatur [41 – 43].

Mit den bisherigen Überlegungen ist allerdings noch nicht alles bezeichnet, was unter Systemverfahrenstechnik fällt. Es wurde oben gesagt, dass Systemverfahrenstechnik den Systemcharakter verfahrenstechnischer Problemstellungen explizit hervorgekehrt und daran arbeitet oder diesen allgemein analysiert. Bisher wurde das Arbeiten am System bzw. der Systemformulierung betrachtet, jetzt wird das Augenmerk auf die Analyse gelegt. In Tab. 1 sind typische Kriterien gezeigt, die dabei verwendet werden. Bei der systemverfahrenstechnischen Analyse wird der betrachtete Realitätsausschnitt auf seiner Systemebene und bzgl. seiner systemhaften Eigenschaften untersucht. So existieren diverse Studien, die etwa stabile und instabile Betriebsbereiche chemischer Reaktoren untersuchen. Stabilität ist dabei eine solche systemhafte Eigenschaft, die auf ganz unterschiedliche Systeme angewendet werden kann. Exemplarisch ist an den Brüsselator und die dafür durchgeführten Stabilitätsanalysen zu denken [44]. Wenn dabei die Analyse selbst das primäre Ziel ist, würde dies allerdings besser als Systemverfahrenswissenschaft bezeichnet. Wird die Analyse dagegen schon gezielt durchgeführt, um mögliche Änderungen am Prozess auszu-

loten, handelt es sich tatsächlich um Systemverfahrenstechnik, wobei die Grenzen hier sicher fließend sind.

Die in diesem Artikel präsentierte Aufschlüsselung von „Systemverfahrenstechnik“ beinhaltet die aus der Literatur bekannten Beschreibungen, geht aber über sie hinaus, da sie allgemeiner ist und den Anspruch erhebt, alle Formen von Systemverfahrenstechnik adäquat zu beschreiben. Die ausgearbeitete Definition umfasst z. B. das Bild, das von Buchheim und Sonnemann [6] aus geschichtlicher Perspektive von der Systemverfahrenstechnik gezeichnet wurde, ist dabei aber wesentlich knapper und trennschärfer gefasst. Die vorgelegte Definition enthält ebenfalls die zentralen Aspekte, die innerhalb der

systemverfahrenstechnischen Literatur aufgeführt werden [1–5, 7]; sie ist jedoch umfassender als die genannten Einzelanalysen. Es mag auffallen, dass in den disziplininternen Reflexionen häufig auch Prozessentwurf (*process design*) als grundlegende systemverfahrenstechnische Tätigkeit genannt wird, was im Widerspruch zu den Ausführungen dieses Artikels zu stehen scheint. In der Tat wird hier der Prozessentwurf nur dann als systemverfahrenstechnische Tätigkeit aufgefasst, wenn dabei auf eine neue Systemformulierung zurückgegriffen wird, etwa auf einen neuartigen Optimierungsansatz, wie dies bspw. in der Arbeit von Peschel et al. geschehen ist [45]. Dagegen wird alleine das Zusammensetzen eines neuen Prozesses aus bereits vorgegebenen Grundoperationen, wie oben diskutiert, nicht zur Systemverfahrenstechnik gezählt. Diese Einschätzung deckt sich wiederum mit den Befunden der zitierten Literatur, erlaubt es jedoch diese konzeptionell genauer zu fassen. Weiterhin wird wiederholt die zentrale Rolle eines rechnergestützten Vorgehens in der Systemverfahrenstechnik betont. Aus der hier entwickelten Perspektive ist dagegen der Rechneinsatz zur Simulation von Modellen alleine noch nicht als zentraler Bestandteil der Systemverfahrenstechnik zu sehen, denn viele weitere verfahrenstechnische Subdisziplinen greifen, wie zu Beginn schon erwähnt, auf Simulationswerkzeuge zurück. Wird hierfür dagegen ein neues Modell entwickelt, impliziert dies, wie gezeigt wurde, eine neue Systembildung und zählt damit zur Systemverfahrenstechnik, so lange gleichzeitig der technische Aspekt im Blick bleibt.

Zuletzt muss noch ein weiteres mögliches Problem zur Sprache kommen. Selbst wenn mit dieser Analyse ein Konzept von Systemverfahrenstechnik herausgearbeitet wurde, dass die Arbeiten innerhalb der Disziplin Systemverfahrenstechnik umfasst, stellt sich die Frage, ob die Definition nicht zu weit gewählt wurde. Es könnte schließlich sein, dass es Forschungen gibt, die unter diese Definition fallen, aber nicht von Systemverfahrenstechnik-Gruppen durchgeführt wurden. So entwickelten etwa Mathematiker ein neues Multiskalen-Modell der Kaffeeextraktion und zwar auch ausdrücklich, um Möglichkeiten zur gezielten Beeinflussung des Prozesses zu untersuchen [46]. Dies wäre eine prototypisch systemverfahrenstechnische Arbeit. Muss die vorgeschlagene Definition also korrigiert werden? Dies ist nach der hier eingenommenen Perspektive nicht der Fall. Denn genau wie Naturwissenschaftler*innen auch technische Arbeit leisten und Techniker*innen naturwissenschaftliche Analysen durchführen, so können auch Nicht-Systemverfahrenstechniker*innen Systemverfahrenstechnik betreiben. Methoden werden zwar im Kern von Disziplinen entwickelt (wie z. B. die systembasierte Methode innerhalb der Systemverfahrenstechnik), jedoch haben Disziplinen kein Monopol auf ihre Methoden. Wann immer es ein Problem erfordert, können daher auch Disziplinen, in deren Kern andere Methoden stehen, auf bestimmte *fremde* Werkzeuge zurückgreifen. In diesem Sinne stellte auch schon der einflussreiche Wissenschaftstheoretiker Karl Raimund Popper (1902–1994) fest: „We are not students of some subject

matter, but *students of problems*. And problems may cut right across the borders of any subject matter or discipline.“ [47]

8 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wurde das Konzept „Systemverfahrenstechnik“ durch eine sprachphilosophische Begriffsanalyse herausgearbeitet. Nach einer Darlegung der gewählten philosophischen Methode wurden zuerst die Begriffe „System“, „Technik“ und „Verfahren“ eingeführt. Systeme wurden dabei als gedanklich abgegrenzte Mengen von interagierenden Elementen verstanden. Technik wurde von Wissenschaft durch ihr Ziel unterschieden, aktiv in die materielle Welt einzugreifen bzw. Eingriffsmöglichkeiten auszuloten. Ein Verfahren wurde als Stoffumwandlungsprozess beschrieben und Verfahrenstechnik entsprechend als Stoffumwandlungstechnik.

Anschließend an diese Ausführungen wurde Systemverfahrenstechnik definiert als diejenige Tätigkeit, bei der der Systemcharakter von verfahrenstechnischen Prozessen explizit hervorgekehrt und daran gearbeitet oder dieser allgemein analysiert wird. Meist findet dies durch neue System- bzw. Modellformulierungen statt. Es wurde ebenfalls darauf hingewiesen, dass auch Optimierung und Regelung als neue Systemformulierungen verstanden werden können. Weiterhin ist es möglich, verfahrenstechnische Systeme anhand ihrer abstrakten Systemeigenschaften (vgl. Tab. 1) zu analysieren. Diese Analysen fallen ebenfalls unter Systemverfahrenstechnik, so lange sie mit dem Ziel durchgeführt werden, Eingriffsmöglichkeiten auszuloten. Beantworten die durchgeführten Analysen lediglich allgemeine Verständnisfragen, wäre die entsprechende Tätigkeit besser als Systemverfahrenswissenschaft zu beschreiben.

Die westliche Philosophie ist seit ihren Ursprüngen im antiken Griechenland – Stichwort Sokrates – dialogisch orientiert. Thesen werden mit dem Ziel aufgestellt, sie in Auseinandersetzung mit anderen Meinungen zu korrigieren und zu präzisieren. In diesem Sinne ist das herausgearbeitete Systemverfahrenstechnik-Konzept als These zu verstehen, die in zukünftigen Diskussionen weiterentwickelt werden sollte. Es wird dennoch unterstellt, dass mit der vorliegenden Arbeit zumindest eine gute Basis für eine solche Weiterentwicklung vorliegt.

Literatur

- [1] T. Takamatsu, *Comput. Chem. Eng.* **1983**, 7 (4), 203–218. DOI: [https://doi.org/10.1016/0098-1354\(83\)80012-X](https://doi.org/10.1016/0098-1354(83)80012-X)
- [2] R. W. H. Sargent, *Process Systems Engineering – The Way Ahead*, 3rd National Symposium on Process Systems Engineering, Rokko, Japan, July **1988**.
- [3] I. E. Grossmann, A. W. Westerberg, *AIChE J.* **2000**, 46 (9), 1700–1703. DOI: <https://doi.org/10.1002/aic.690460902>
- [4] K.-U. Klatt, W. Marquardt, *Chem. Ing. Tech.* **2005**, 77 (8), 1067–1068. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.200590124>

- [5] K.-U. Klatt, W. Marquardt, *Comput. Chem. Eng.* **2009**, 33, 536 – 550. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.09.002>
- [6] *Geschichte der Technikwissenschaften* (Eds: G. Buchheim, R. Sonnemann), Birkhäuser, Basel **1990**.
- [7] G. Stephanopoulos, G. V. Reklaitis, *Chem. Eng. Sci.* **2011**, 66, 4272 – 4306. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.05.049>
- [8] <http://svt.wzw.tum.de/wir-ueber-uns/> (Abruf: 11. Dezember 2018)
- [9] www.svt.ovgu.de/research.html (Abruf: 11. Dezember 2018)
- [10] www.avt.rwth-aachen.de/cms/AVT/Forschung/Forschungsschwerpunkte-der-AVT/~ioaf/Systemverfahrenstechnik/ (Abruf: 11. Dezember 2018)
- [11] www.pse.uni-bremen.de/ (Abruf: 11. Dezember 2018)
- [12] M. Kuhn, W. Pietsch, H. Briesen, *Chem. Ing. Tech.* **2017**, 89 (9), 1126 – 1132. DOI: <https://doi.org/10.1002/cite.201700025>
- [13] K. Hartmann, in *Verfahrenstechnik und Wiedervereinigung* (Eds: W. Fratzscher, K.-P. Meinicke), Akademie-Verlag, Berlin **1997**, 171 – 186.
- [14] *Propyläen Technikgeschichte* (Eds: H.-J. Braun, W. Kaiser), Band 5, Propyläen Verlag, Berlin **1997**.
- [15] J. Radkau, *Technik in Deutschland*, Campus Verlag, Frankfurt a.M. **2008**.
- [16] J. Pfister, *Werkzeuge des Philosophierens*, 2. Auflage, Reclam, Ditzingen **2015**.
- [17] L. Wittgenstein, *Tractatus logico-philosophicus*, Suhrkamp, Frankfurt a.M. **2003**.
- [18] M. Stieß, *Mechanische Verfahrenstechnik – Partikeltechnologie 1*, 3. Auflage, Springer, Berlin **2009**.
- [19] W. Müller, in *Taschenbuch der Verfahrenstechnik* (Ed: K. Schwister), 4. Auflage, Hanser, München **2010**, Abschnitt 5.1.
- [20] H. Albert, *Traktat über kritische Vernunft*, 5. Auflage, Mohr Siebeck, Tübingen **2010**.
- [21] L. Wittgenstein, *Philosophische Untersuchungen*, Suhrkamp, Frankfurt a.M. **2003**.
- [22] *Wörterbuch der philosophischen Begriffe* (Eds: A. Regenbogen, U. Meyer), Meiner, Hamburg **2005**.
- [23] L. v. Bertalanffy, *General System Theory*, George Braziller, New York **1968**.
- [24] G. Ropohl, *Allgemeine Systemtheorie*, edition sigma, Berlin **2012**.
- [25] H. Seiffert, *Einführung in die Wissenschaftstheorie* 3, 2. Auflage, C. H. Beck, München **1992**.
- [26] *Philosophy and Technology* (Eds: C. Mitcham, Robert Mackey), Free Press, New York **1983**.
- [27] M. Kuhn, in *Welt der Artefakte* (Eds: J. H. Franz, K. Berr), Frank & Timme, Berlin, **2017**, 43 – 54.
- [28] R. Häufßling, *Techniksoziologie*, Nomos, Baden-Baden **2014**.
- [29] G. Ropohl, *Allgemeine Technologie*, Universitätsverlag Karlsruhe, Karlsruhe **2009**.
- [30] A. P. Usher, *A History of Mechanical Inventions*, Dover, New York **1982**.
- [31] *Basic Machines and How They Work*, Bureau of Naval Personnel, Dover, New York **1971**.
- [32] E. S. Ferguson, *Science* **1977**, 197 (4306), 827 – 836. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.197.4306.827>
- [33] W. B. Arthur, *The Nature of Technology*, Allen Lane, London **2009**.
- [34] D. Zobel, *Systematisches Erfinden*, 5. Auflage, expert Verlag, Renningen **2009**.
- [35] N. Wiener, *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, MIT Press, Cambridge, MA **1965**.
- [36] W. R. Ashby, *Introduction to Cybernetics*, Chapman & Hall, London **1957**.
- [37] W. Hemming, W. Wagner, *Verfahrenstechnik*, 10. Auflage, Vogel, Würzburg **2008**.
- [38] M. Bohnet, in *Dubbel* (Eds: K.-H. Grote, J. Feldhusen), Springer, Berlin, **2014**, N2 – N3.
- [39] R. Frigg, S. Hartmann, *Models in Science*, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Ed: E. N. Zalta), Summer 2018 Edition, Stanford University **2018**. <https://plato.stanford.edu/archives/sum2018/entries/models-science/> (Abruf: 12. Dezember 2018)
- [40] J. Watson, *The Double Helix*, Touchstone, New York **2001**.
- [41] H. Poser, *Wissenschaftstheorie*, Reclam, Stuttgart **2012**.
- [42] G. Parayil, *Conceptualizing Technological Change*, Rowman & Littlefield, Oxford **2002**.
- [43] *Bedingungen und Triebkräfte technologischer Innovationen* (Ed: K. Kornwachs), Fraunhofer IRB, Stuttgart **2007**.
- [44] D. Kondepudi, I. Prigogine, *Modern Thermodynamics*, Wiley, Chichester **2015**.
- [45] A. Peschel, H. Freund, K. Sundmacher, *Ind. Eng. Chem. Res.* **2010**, 49 (21), 10535 – 10548. DOI: <https://doi.org/10.1021/ie100476q>
- [46] K. M. Moroney, W. T. Lee, S. B. G. O'Brien, F. Suijver, J. Marra, *J. Math. Ind.* **2016**, 7 (3). DOI: <https://doi.org/10.1186/s13362-016-0024-6>
- [47] K. Popper, *Conjectures and Refutations*, Routledge, Abingdon **2002**.