

Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme

Vorlesung: Systemdynamik und Regelungstechnik

Kapitel 1

Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann



Kontakt und Informationen

- **Prof. Dr.-Ing. Sören Hohmann**
Sprechstunde: nach vorheriger Anmeldung
soeren.hohmann@kit.edu
- **Lukas Kölsch, M.Sc.**
Sprechstunde: Do 11:30 - 12:15 (nach vorheriger Anmeldung)
lukas.koelsch@kit.edu
- Vom Allgemeinen zum Speziellen:

Vorlesung

Übung

Tutorium

Anwendung



- Aktuelle Informationen und Materialien zu Vorlesung und Übung:

https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=crs_796850

- Vorlesungsfolien
- Aufgabenblätter
- Kurzlösungen
- Matlab-Demos und sonstige zusätzliche Materialien
- Diskussionsforum
- Semesterübersicht

- Übung:
 - Vertiefung von Vorlesungsinhalten anhand von Beispielen
 - Demonstration der Verfahren „von Hand“ ↔ „MATLAB/SIMULINK“
 - Vorbereitung von Tutoriumsaufgaben, „Komplettaufgaben“ mit Themen bis zum aktuellen Stand (UE)

- Tutorium:
 - Weitere Vertiefung und Rechenttraining durch Aufgaben (TU)
 - Eigenständige Anwendung von MATLAB/SIMULINK in 3 MATLAB-Labs

- Training:
 - Elementare Aufgabenstellungen (TR)
 - Verschiedene Schwierigkeitsgrade: ⊕ bis ⊕⊕⊕(⊕)

Semesterplan

April 2018	Mai 2018	Juni 2018	Juli 2018
01	01 Tag der Arbeit	01 V11*	01
02	02	02	02 Tut 7
03	03 Ü1 Tut 1	03	03 Ü8
04	04 V6	04 Tut 3	04
05	05	05 Ü4	05 V19
06	06	06	06 (V20)
07	07	07 V12	07
08	08 Ü2	08 V13	08
09	09	09	09 Tut 8
10	10 Chr. Himmelfahrt	10	10
11	11 V7	11 Tut 4	11
12	12	12 Ü5	12 Ü9
13	13	13	13
14	14 Tut 2	14 V14	14
15	15	15 V15	15
16	16	16	16 Tut 9
17	17 V8	17	17
18	18	18 Tut 5	18
19 V1	19	19 Ü6	19
20 V2	20 Pfingstsonntag	20	20
21	21 Pfingstmontag	21 V16	21
22	22	22 V17	22
23	23	23	23
24 V3	24 V9	24	24
25	25 V10*	25 Tut 6	25
26 V4	26	26	26
27 V5	27	27	27
28	28	28 Ü7	28
29	29 Ü3	29 V18	29
30	30	30	30
	31 Fronleichnam		31 KLAUSUR

■ Hörsaal:

- Dienstag: Benz-HS
- Donnerstag: Neue Chemie
- Freitag: Neue Chemie

■ Prüfung:

- 31. Juli 2018
- 120 Minuten
- keine Hilfsmittel

- **Der auf ILIAS bereitgestellte Semesterplan ist stets auf dem aktuellsten Stand**

Organisation Tutorium

- Insgesamt 9 Tutorienwochen, davon 3 MATLAB-Labs
- 19 Tutoriengruppen
- MATLAB-Kompendium: Siehe ILIAS
- **Termine:**

	Montag	Dienstag	Mittwoch	Donnerstag	Freitag
08	#7496 Gruppe 01			#7508 Gruppe 13 #7509 Gruppe 14	#7511 Gruppe 16 #7512 Gruppe 17
09	=			=	=
10	#7497 Gruppe 02 #7498 Gruppe 03	#7502 Gruppe 07 #7503 Gruppe 08			
11	=	=			
12					
13					
14	#7499 Gruppe 04		#7505 Gruppe 10		
15	=		=		
16	#7500 Gruppe 05	#7504 Gruppe 09	#7506 Gruppe 11		#7513 Gruppe 18 #7514 Gruppe 19
17	=	=	=		=
18	#7501 Gruppe 06		#7507 Gruppe 12	#7510 Gruppe 15	
19	=		=	=	
20					

Anmeldung über *YouSubscribe*
 ab sofort
 bis 02.05.2018, 12.00 Uhr
<https://portal.wiwi.kit.edu/ys/2086>



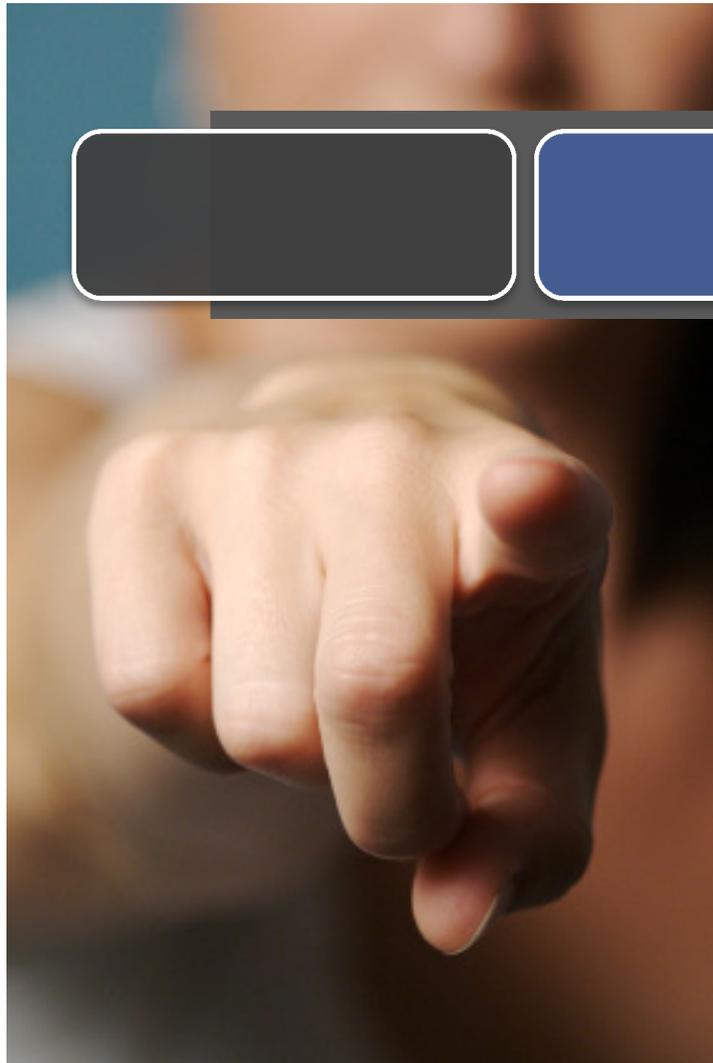
1.1 Motivation

1.1.1 Experiment



1.1 Motivation

1.1.1 Experiment (2)



1.1 Motivation

1.1.1 Experiment (3)

■ Ergebnisse

■ Erkenntnisse aus dem Experiment:

- Experiment 1: Die Zielposition wird aufgrund des Vorwissens über die Position des Sitznachbarn angesteuert. Man spricht von einer **Steuerung**.
- Experiment 2: Es erfolgt eine **Rückkopplung** des aktuellen **Ist**-Abstands der Finger über das Auge und ein Vergleich mit dem **Soll**-Abstand. Ist der Ist-Abstand noch nicht 0 wird ein Signal über das ZNS gegeben, die Hand weiter zu bewegen. Hierbei können **Störungen** „kontrolliert“ werden, z.B. eine „zittrige Hand“ des Sitznachbarn.

1.1 Motivation

1.1.2 Beispiel für eine Regelung

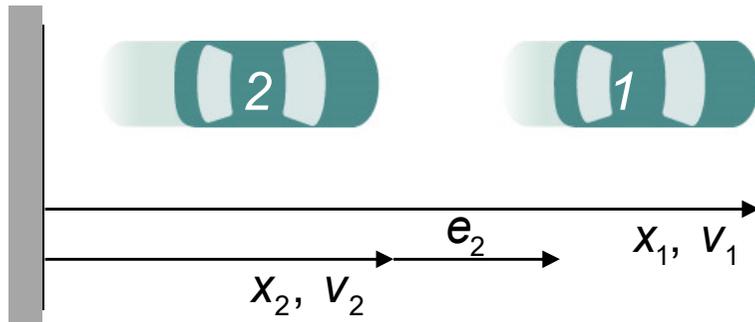
Autofahrt, Abstand halten



1.1 Motivation

1.1.2 Beispiel für eine Regelung (2)

Erkenntnisse aus dem Beispiel:



x_i : Position des Fahrzeugs i in x – Richtung

v_i : Geschwindigkeit des Fahrzeugs i

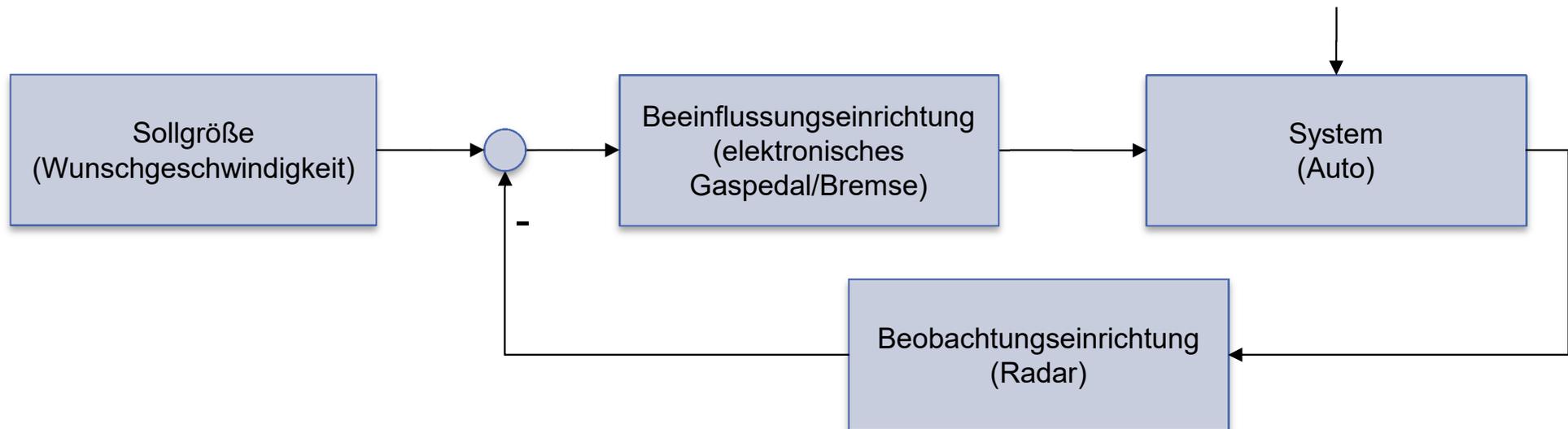
$e_2 = x_1 - x_2$ – Sollabstand

Gaspedalstellung/Bremspedalstellung = $f(e_2, \dots)$

- Die **Rückkopplung** erfolgt über eine „Abstandsmessung“ über das Auge des Fahrers oder bei einem automatischen Abstandsregeltempomaten z.B. durch ein Radar. Dabei wird kontinuierlich der persönliche **Wunsch/Soll**-Abstand mit dem aktuellem **Ist**-Abstand verglichen und eine geeignete Gaspedalstellung und Bremspedalstellung gewählt.
- **Störungen** z.B. Gegenwind oder die Steigung der Fahrbahn können durch die Rückkopplung kontrolliert werden.

1.1 Motivation

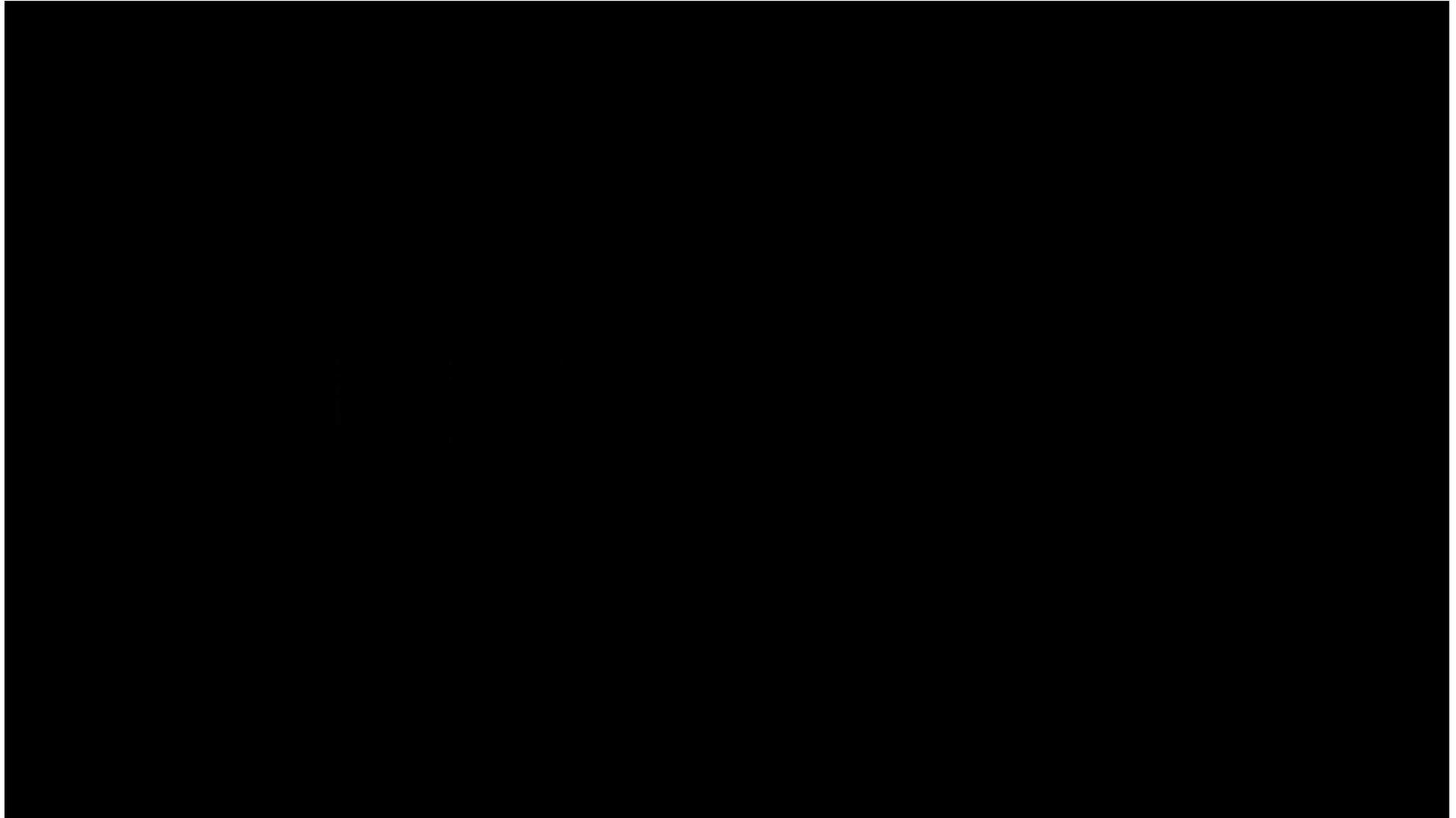
1.1.2 Beispiel für eine Regelung (3)



1.1 Motivation

1.1.2 Beispiel für eine Regelung (4)

Roboterzelle

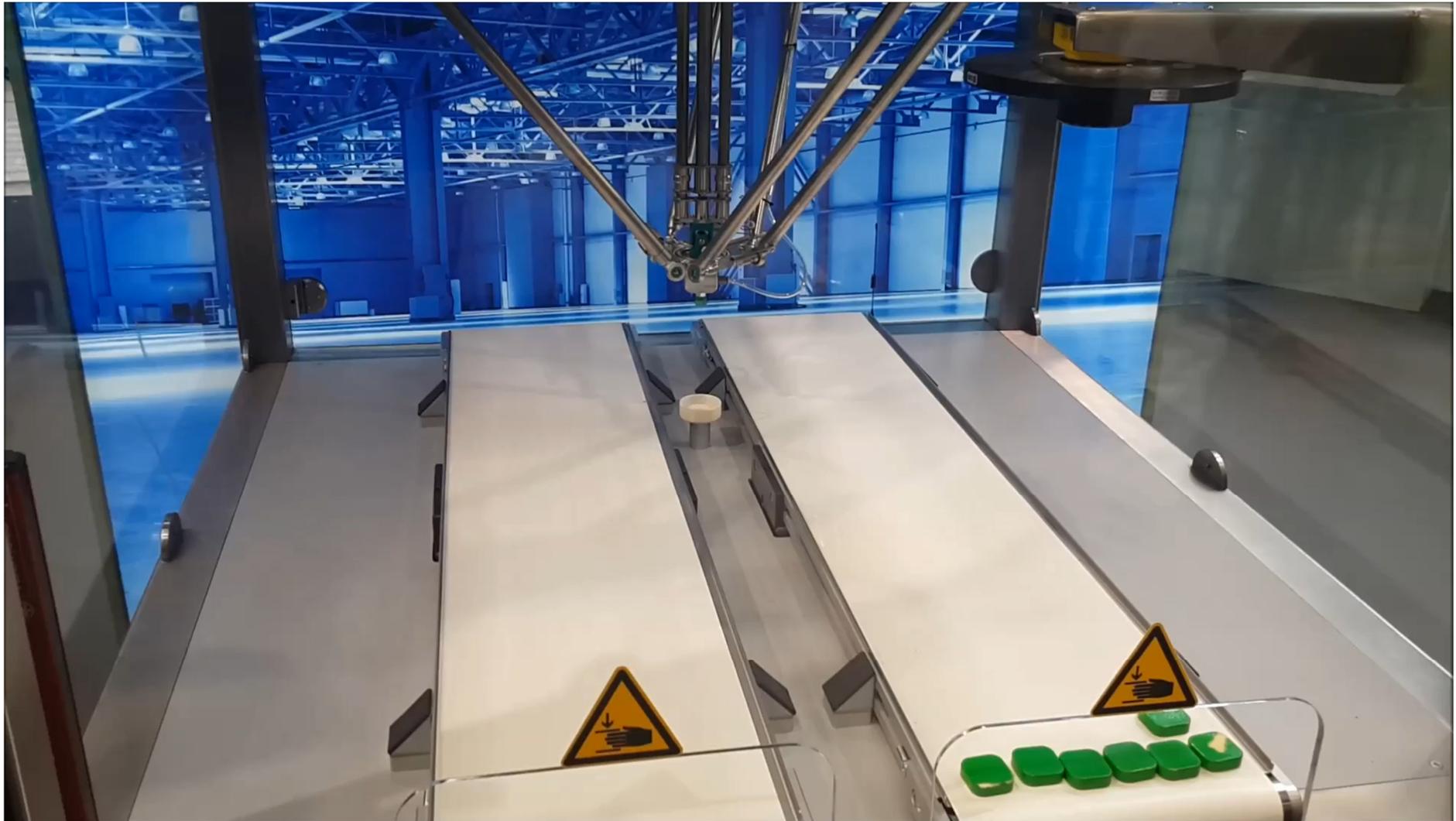


Quelle: KUKA

1.1 Motivation

1.1.2 Beispiel für eine Regelung (5)

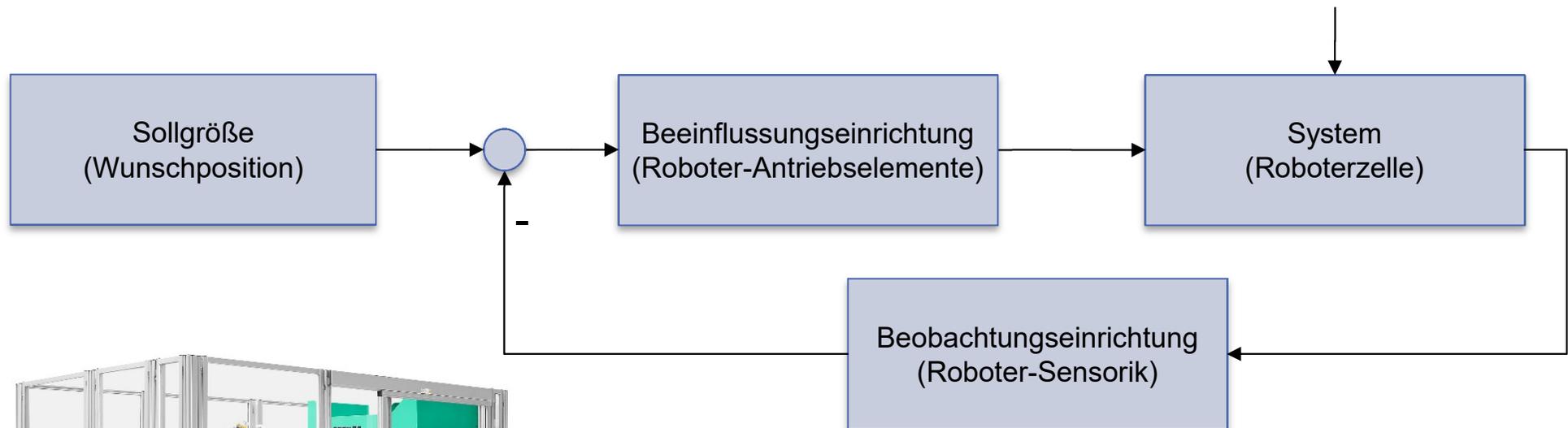
Roboterzelle



1.1 Motivation

1.1.2 Beispiel für eine Regelung (6)

Roboterzelle - Positionsregelung

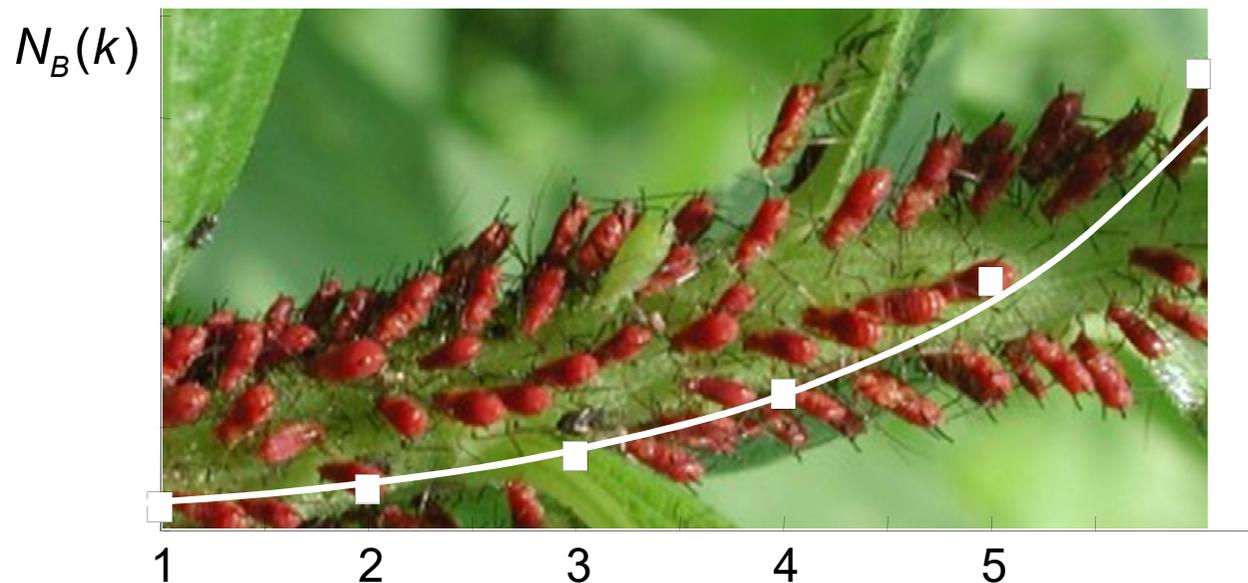


Quelle: Arburg

1.1 Motivation

1.1.2 Beispiel für eine Regelung (7)

Populationsdynamik, vereinfachte Beschreibung nach Lotka-Volterra



Beutepopulation unter „idealen Fressbedingungen“

$$N_B(k + 1) = N_B(k) + \alpha_B N_B(k)$$

$N_B(k)$: Anzahl der Beutelebewesen

α_B : Reproduktionskoeffizient

k : Populationsperiode

1.1 Motivation

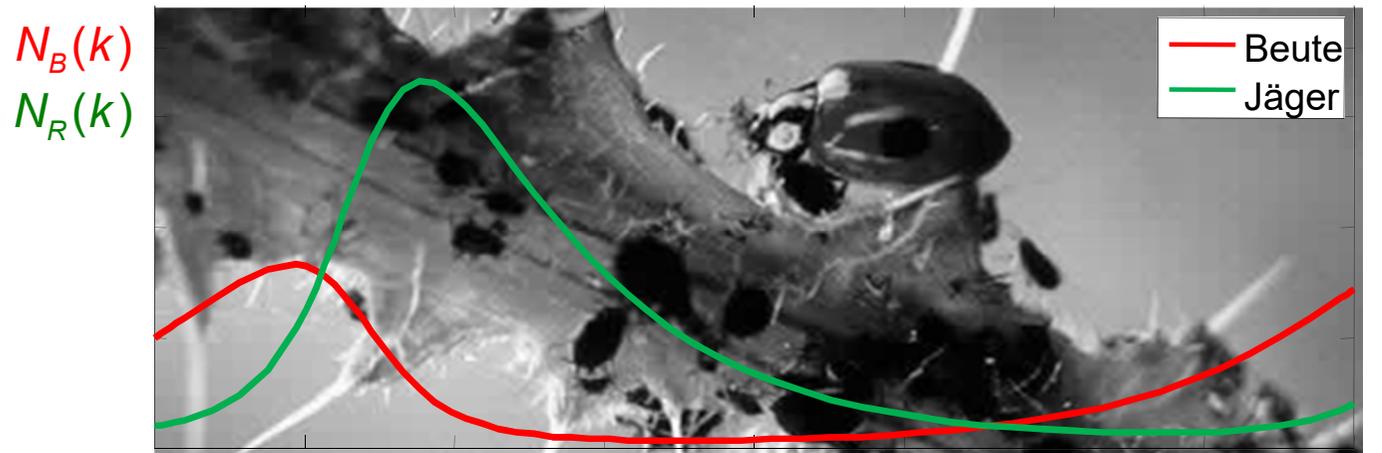
1.1.2 Beispiel für eine Regelung (8)

Beutepopulation wird durch Räuberpopulation „rückgekoppelt“:

$$N_B(k+1) = N_B(k) + \alpha_B N_B(k) - \alpha_R(N_B(k), N_R(k))$$

$N_R(k)$: Anzahl der Räuber

α_R : "Fresskoeffizient" der Räuber pro Beutelebewesen



Räuberpopulation wird durch Anzahl der Beutetiere „rückgekoppelt“:

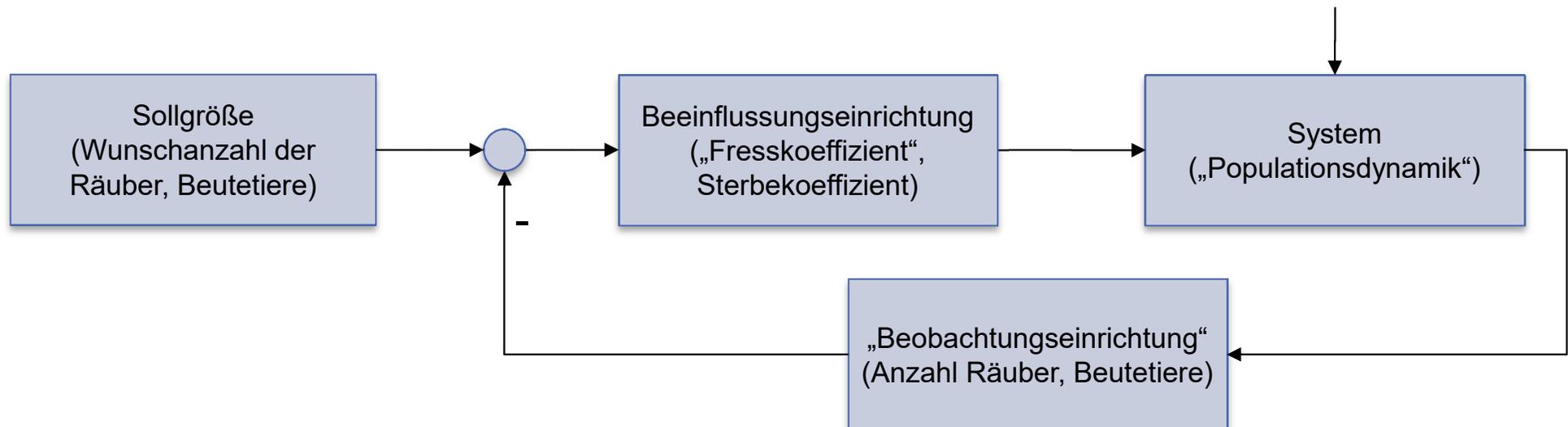
$$N_R(k+1) = N_R(k) + \alpha_R N_R(k) - \alpha_S(N_B(k)N_R(k))$$

α_R : Reproduktionskoeffizient der Räuber

α_S : Sterbekoeffizient aufgrund von Nahrungsunterangebot der Beutelebewesen

1.1 Motivation

1.1.2 Beispiel für eine Regelung (9)



1.1 Motivation

1.1.3 Fazit

- Auf ein System wirken **Störgrößen** ein. Die Störgrößen führen zu einer Abweichung von einem gewünschten Sollverhalten. Die Störgröße ist nur unzureichend bekannt.
- Durch eine **Rückkopplung** kann der Einfluss von Störgröße vermindert werden
- Durch die Rückkopplung kann das System „stabilisiert“ werden.

- Für die Rückkopplung wird das System laufend beobachtet und die Information zur Beeinflussung des Systems verwendet.
- Es gibt für die Beschreibung der Rückkopplung aus unterschiedlichen Domänen einen gleichen Beschreibungsformalismus.

1.1 Motivation

1.1.3 Fazit

Kernfragen dieser Vorlesung:

1. Wie kann ein Regelkreis künstlich mit Mitteln der Technik so entworfen werden, dass das geregelte System sich „wie gewünscht“ verhält?
2. Wie verhalten sich rückgekoppelte Systemstrukturen und gibt es verallgemeinerbare Eigenschaften?

1.2 Übersicht

1.2.1 Vorlesungsinhalt

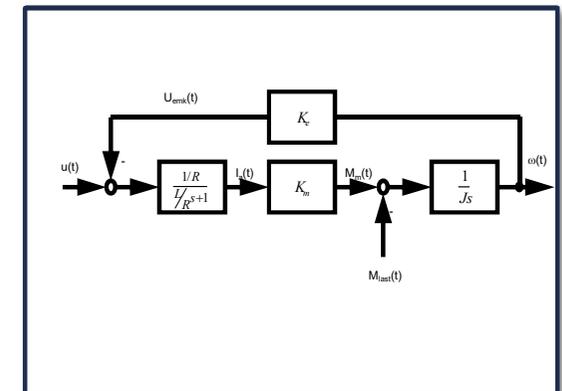
1. Einführung

1. Motivation
2. Übersicht
3. Begriffsbildung und Modellierung
4. Steuerung und Regelung
5. Entwicklungsablauf für Regelungssysteme



2. Klassifizierung und Beschreibung von linearen Regelkreisen

1. Einführung und Grundbegriffe
2. Das Signalflussbild
3. Verhalten elementarer zeitkont. Regelkreisglieder
4. Standardregelkreis und Signalflussbildumformungen
5. Analoge und digitale Regelkreise
6. Beschreibung digitaler Regelkreise

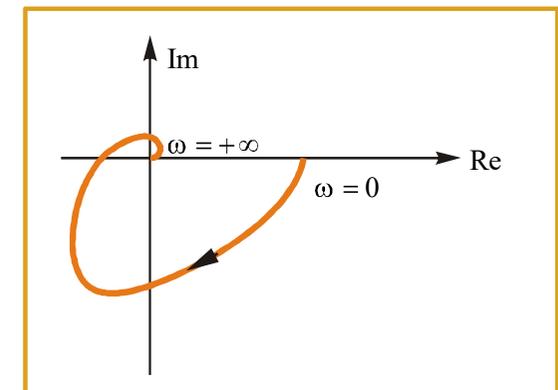


1.2 Übersicht

1.2.1 Vorlesungsinhalt (2)

3. Analyse von linearen zeitkontinuierlichen Regelkreisen

1. Stationäres Verhalten und charakteristische Größen
2. Frequenzgang und Ortskurve
3. Frequenzkennlinie
4. Grundlagen zur Stabilität
5. Algebraische Stabilitätskriterien
6. Graphische Stabilitätskriterien



4. Analyse von linearen zeitdiskreten Regelkreisen

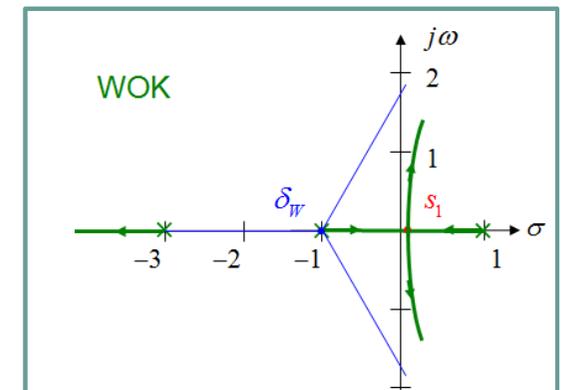
1. Stationäres Verhalten
2. Frequenzgang, Ortskurve und Frequenzkennlinie
3. Grundlagen zur Stabilität
4. Algebraische Stabilitätskriterien
5. Graphische Stabilitätskriterien

1.2 Übersicht

1.2.1 Vorlesungsinhalt (3)

5. Synthese von linearen zeitkontinuierlichen Regelkreisen

1. Forderungen an den Regelkreis
2. Heuristische Verfahren
3. Direkte Verfahren
4. Entwurf mit dem Frequenzkennlinienverfahren
5. Entwurf mit dem Wurzelortskurvenverfahren
6. Parameteroptimierung
7. Vermaschung und Vorsteuerung



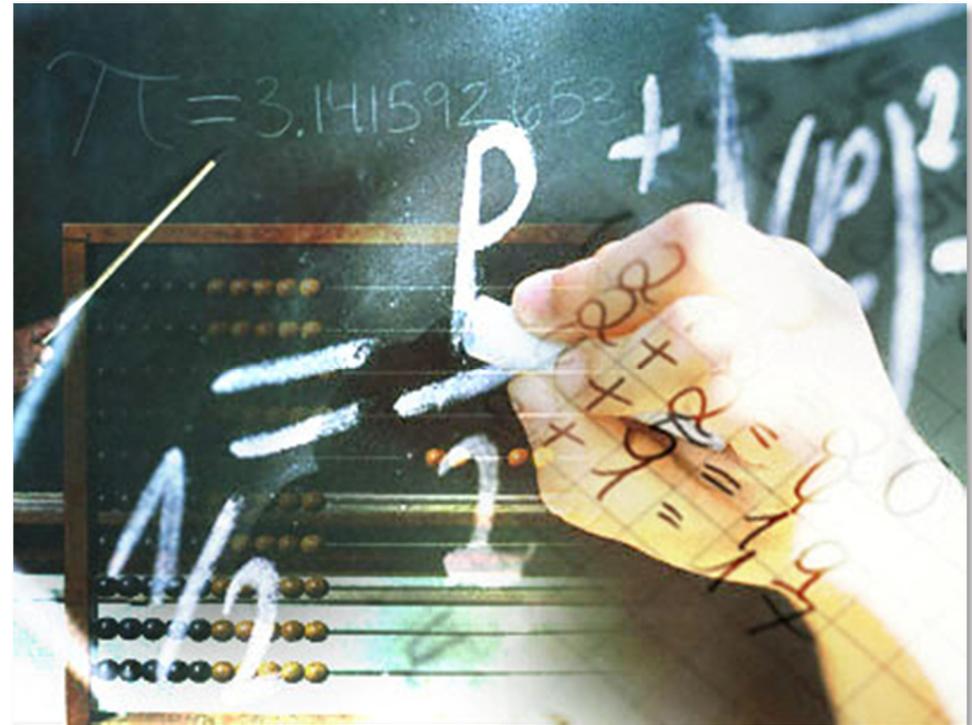
6. Synthese von linearen zeitdiskreten Regelkreisen

1. Fast Sampling Design
2. Direkte Verfahren
3. Frequenzkennlinienverfahren und Wurzelortskurvenverfahren

1.2 Übersicht

1.2.2 Was sollten Sie schon können . . .

- Höhere Mathematik
(Analysis und lineare Algebra)
- Gute Kenntnisse von Signalen und Systemen



1.2 Übersicht

1.2.3 Literatur

1. O. Föllinger, U. Konigorski, B. Lohmann, G. Roppenecker, A. Trächtler
Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung
12. Auflage, VDE VERLAG, 2016.
2. C. Becker, L. Litz, G. Siffling:
Regelungstechnik-Übungsbuch
4. Auflage, Hüthig-Verlag, 1993.
3. J. Lunze:
Regelungstechnik 1
11. Auflage, Springer-Verlag, 2016.
4. H. Unbehauen:
Regelungstechnik I, II, III.
Verlag: F. Vieweg & Sohn
1. Band, 15. Auflage 2008, 2. Band, 9. Auflage 2007, 3. Band, 6. Auflage 2000.

1.2 Übersicht

1.2.3 Literatur (2)

5. R. Dorf - R. Bishop:

Modern Control Systems

11th edition, Pearson Prentice Hall, 2008

6. C. Phillips - R. Harbor:

Feedback Control Systems

4th edition, Prentice Hall, 2000

1.2 Übersicht

1.2.3 Literatur (3)

7. O. Föllinger, M. Kluwe:

Laplace-, Fourier- und z-Transformation

10. Auflage, VDE-Verlag, 2011

8. O. Föllinger:

Lineare Abtastsysteme

5. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, 1993

9. H. Unbehauen:

Regelungstechnik II – Zustandsregelungen, digitale und nichtlineare Regelungssysteme

9. Auflage, Vieweg-Verlag, 2007

1.2 Übersicht

1.2.3 Literatur (4)

10. R. Isermann:

Digitale Regelungssysteme

Bd. I: Grundlagen, Deterministische Regelungen

Bd. II: Stochastische Regelungen, Mehrgrößenregelungen, Adaptive Regelungen, Anwendungen

2. Auflage, Springer-Verlag, 1987

11. J. Ackermann:

Abtastregelung

3. Auflage, Springer-Verlag, 1988

12. K. Ogata:

Discrete-Time control systems

2. Auflage, Prentice Hall, 1995

1.2 Übersicht

1.2.3 Literatur (5)

13. A.V. Oppenheim, R.W. Schafer, J. Buck:

Zeitdiskrete Signalverarbeitung

2. Auflage, Pearson Studium, 2004

14. G.C. Goodwin:

Control System Design

Prentice Hall, 2001

15. A. Angermann:

MATLAB – Simulink – Stateflow : Grundlagen, Toolboxen, Beispiele

8. Auflage, deGruyter Oldenbourg, 2014

16. J. Paschedag

Einführung in Simulink

https://www.uni-ulm.de/fileadmin/website_uni_ulm/iui.inst.050/vorlesungen/sose15/err/simulink_einfuehrung.pdf

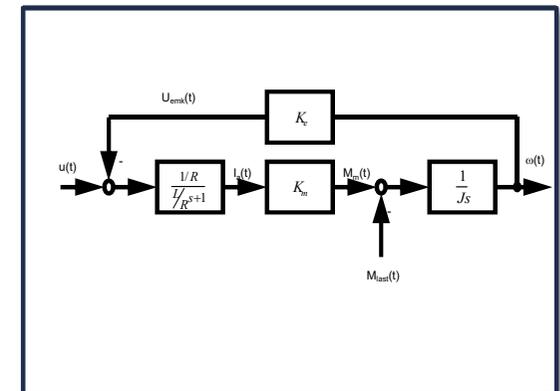
1. Einführung

1. Motivation
2. Übersicht
3. **Begriffsbildung und Modellierung**
4. Steuerung und Regelung
5. Entwicklungsablauf für Regelungssysteme



2. Klassifizierung und Beschreibung von linearen Regelkreisen

1. Einführung und Grundbegriffe
2. Das Signalflussbild
3. Verhalten elementarer zeitkont. Regelkreisglieder
4. Standardregelkreis und Signalflussbildumformungen
5. Analoge und digitale Regelkreise
6. Beschreibung digitaler Regelkreise



1.3 Begriffsbildung und Modellierung

1.3.1 Prozess

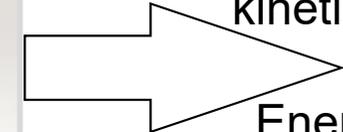
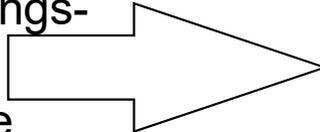
Def.: **Prozess:**

Ein Prozess ist eine Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Information umgeformt, transportiert oder gespeichert wird.

Ein technischer Prozess ist ein solcher, dessen physikalische Größen mit technischen Mitteln erfasst und beeinflusst werden [DIN IEC 60050-351].

Beispiel: Prozess Automobil

Verbrennungs-
energie



kinetische
Energie

1.3 Begriffsbildung und Modellierung

1.3.1 Prozess (2)

Anfangszustand	Technischer Prozess in einem technischen System	Endzustand
niedrige Raum-Temperatur	Wärmevorgänge bei der Beheizung eines Wohnhauses mit einer Ölheizungsanlage	erhöhte Raum-Temperatur
verschmutzte Wäsche	Waschvorgang in einer Waschmaschine	saubere Wäsche
unsortierte Pakete	Transport- und Verteilvorgänge bei einer Paketverteilanlage	nach Zielorten sortierte Pakete
fossile oder Kern-Brennstoffe	Energie-Umwandlungs- und Erzeugungsvorgänge in einem Kraftwerk	elektrischer Strom

1.3 Begriffsbildung und Modellierung

1.3.1 Prozess (3)

Anfangszustand	Technischer Prozess in einem technischen System	Endzustand
einzulagernde Teile	Lagervorgänge in einem Hochregallager	zu Kommissionen zusammengestellte Teile
Zug in Ort A	Verkehrsablauf bei der Fahrt eines Zuges	Zug in Ort B
monomerer Stoff	Vorgänge in einem chemischen Reaktor	polymerer Stoff
ungeprüftes Gerät	Prüfabläufe in einem Prüffeld	geprüftes Gerät
Teile ohne Bohrung	Bohrvorgang bei einer Bohrmaschine	Teile mit Bohrung
Schadstoffe in der Luft	Vorgänge in einem System zur Schadstoffüberwachung der Luft	Informationen über Schadstoffkonzentrationen werden in der Überwachungs-zentrale angezeigt

1.3 Begriffsbildung und Modellierung

1.3.2 System

Def.: **System:**

Ein System ist eine abgegrenzte Anordnung von aufeinander einwirkenden Gebilden [DIN 19226 und IEC 60050-351].

Ein dynamisches System ist eine Funktionseinheit zur Verarbeitung von Signalen, wobei Systemeingangsgrößen (Einflussgrößen) als Ursache mit den Systemausgangsgrößen (Ergebnisgrößen) als deren zeitliche Auswirkung miteinander in Beziehung gesetzt werden.

Formale Beschreibung: Ein (Ein-/Ausgangs-)System Σ besteht aus ...

- einer Menge an Zeitpunkten M_t
- einem Eingangsgrößen-Funktionenraum D_u
- einem Ausgangsgrößen-Funktionenraum D_y
- einer Ein-/Ausgangsabbildungsvorschrift

$$S: D_s \rightarrow D_y$$

$$\emptyset \subset D_s \subseteq \{(t_1, t_2, u(t)) \mid t_1, t_2 \in M_t; t_1 \leq t_2; u(t) \in D_u\}$$

- Forderung: Wenn $(t_1, t_2, u(t)) \in D_s$, dann ist auch $(\tilde{t}, t_2, u(t)) \in D_s$, wenn $\tilde{t} \in [t_1, t_2[$

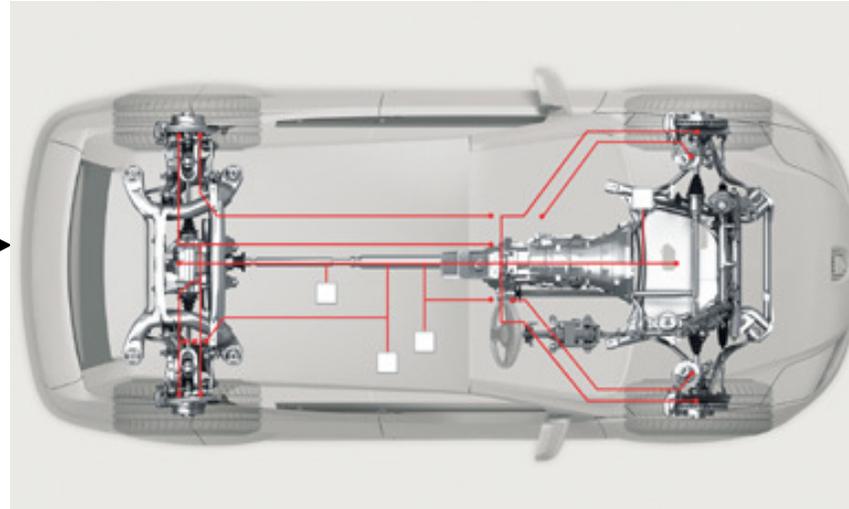
1.3 Begriffsbildung und Modellierung

1.3.2 System (2)

Beispiel: System Automobil

Einganggröße

Gaspedalstellung



Geschwindigkeit

Ausgangsgröße

$$M_t = \mathbb{R}^+$$

$$D_u = \left\{ u : M_t \rightarrow [0, 30^\circ] \right\}$$

$$D_y = \left\{ y : M_t \rightarrow \left[-30 \frac{\text{km}}{\text{h}}, 240 \frac{\text{km}}{\text{h}} \right] \right\}$$

gesucht: S

1.3 Begriffsbildung und Modellierung

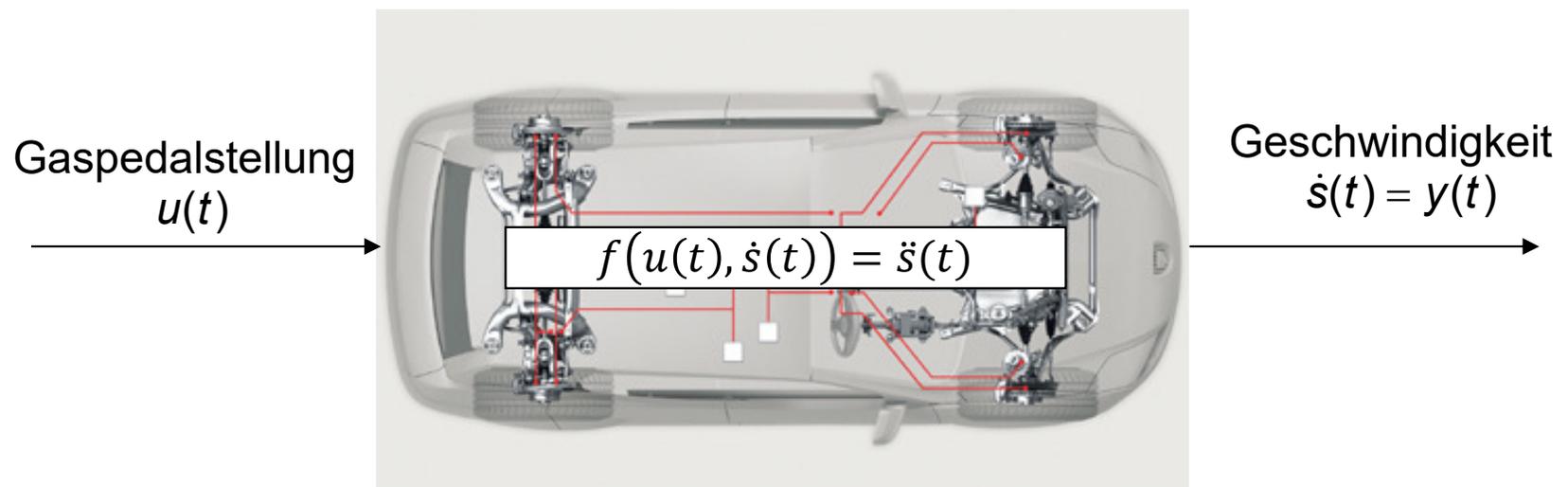
1.3.3 Modell

Def.: **Modell:**

Ein Modell ist eine an die jeweilige Zielstellung angepasste Beschreibung des Systems unter Zuhilfenahme des verfügbaren Wissens über die Ursache-Wirkungszusammenhänge im System.

Speziell ein funktionales mathematisches Modell ist ein Modell, bei dem die Zusammenhänge mit mathematischen Funktionen abgebildet sind.

Beispiel: Automobil



Abbildungsvorschrift S implizit gegeben.

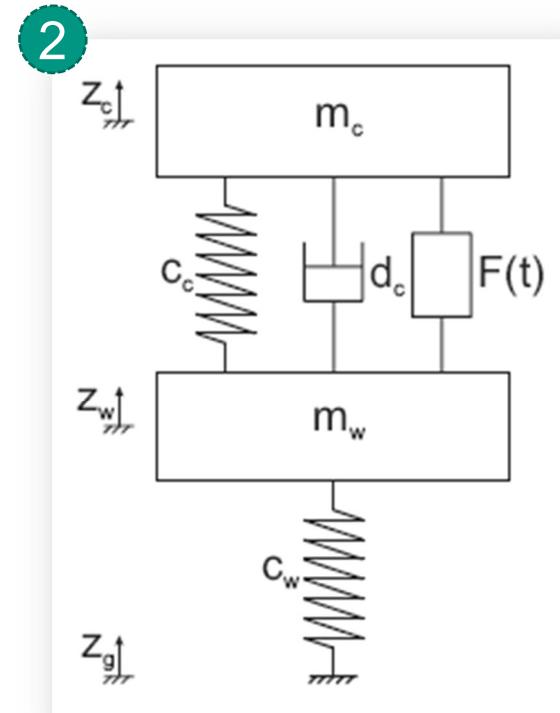
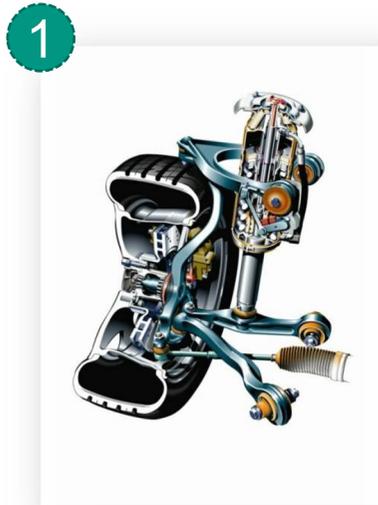
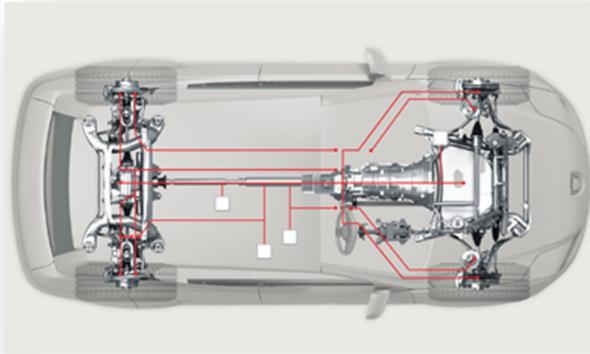
1.3 Begriffsbildung und Modellierung

Vorgehen bei der Modellierung

1. Abgrenzung des Systems (Festlegung des Betrachtungsumfangs)
2. Festlegung des Abstraktionsgrades und Ermittlung relevanter Teilsysteme, Einbringen von Beziehungswissen
3. Aufstellen der Modellbeschreibung durch
 - Physikalische, biologische, wirtschaftswissenschaftliche, chemische, ... Gesetzmäßigkeiten
 - Beschreibung des menschlichen Wissens (z.B. durch Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz)

1.3 Begriffsbildung und Modellierung

■ Beispiel: Dämpfer eines aktiven Fahrwerks



1.3 Begriffsbildung und Modellierung

- Beispiel: Dämpfer eines aktiven Fahrwerks



Tafelanschrieb 1.3 (1)

Aktiver Dämpfer

Tafelanschrieb 1.3 (2)

Modellformen und Modellbildung

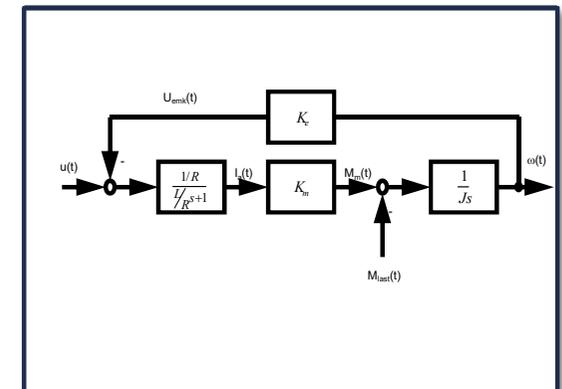
1. Einführung

1. Motivation
2. Übersicht
3. Begriffsbildung und Modellierung
- 4. Steuerung und Regelung**
5. Entwicklungsablauf für Regelungssysteme



2. Klassifizierung und Beschreibung von linearen Regelkreisen

1. Einführung und Grundbegriffe
2. Das Signalflussbild
3. Verhalten elementarer zeitkont. Regelkreisglieder
4. Standardregelkreis und Signalflussbildumformungen
5. Analoge und digitale Regelkreise
6. Beschreibung digitaler Regelkreise



1.4 Steuerung und Regelung

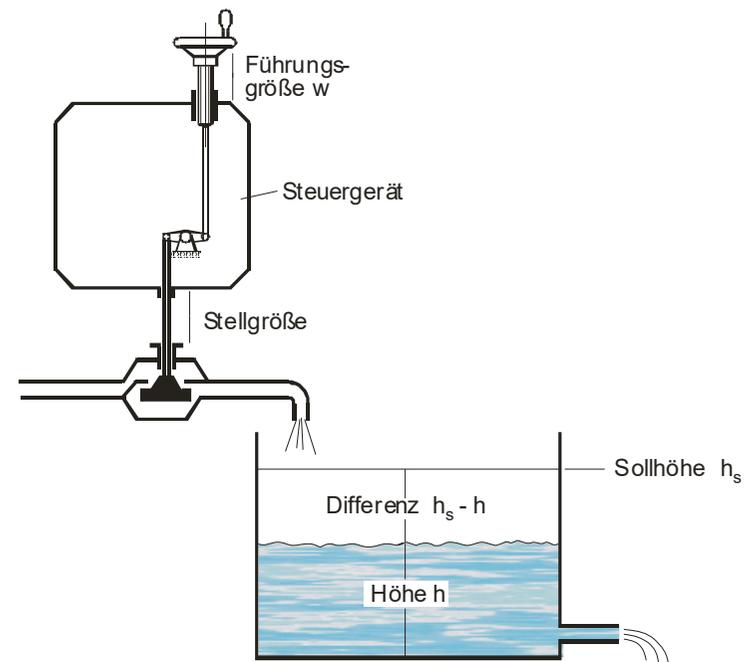
1.4.1 Steuerung

Def.: **Steuerung (engl. control):**

Das Steuern, die Steuerung, ist der Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen.

Beispiel: Füllstands-Steuerung

Aufgabe: Beeinflussung des Behälters über das Zuflussventil so, dass der Füllstand konstant auf dem Sollwert h_s verharrt



1.4 Steuerung und Regelung

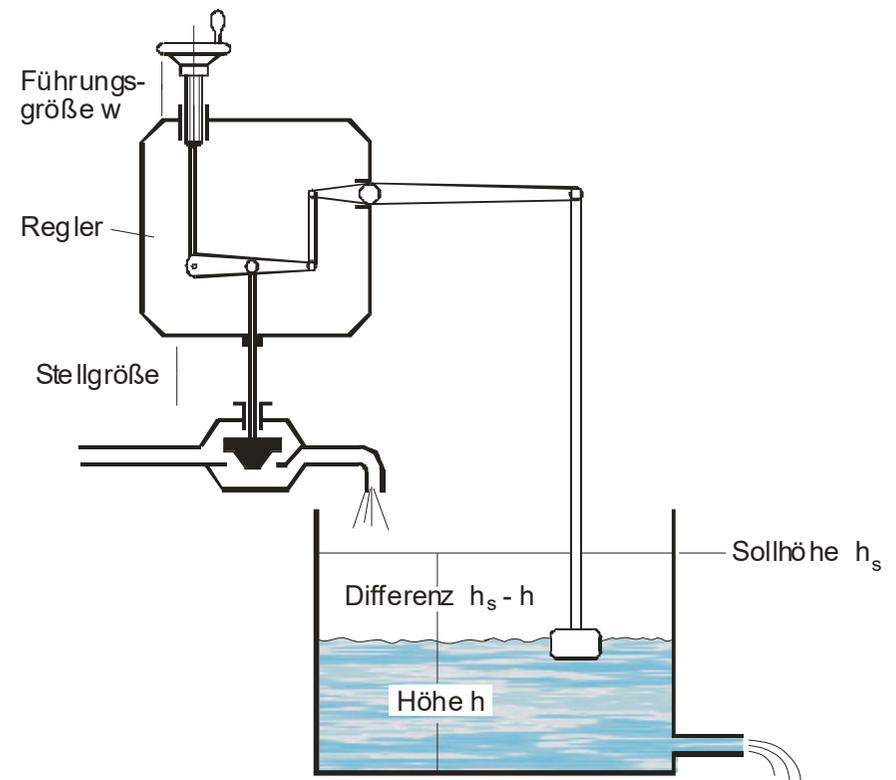
1.4.2 Regelung (1)

Def.: **Regelung (engl. Feedback control)**

Das Regeln, die Regelung ist ein Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe) erfasst, mit einer anderen Größe, der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird.

Beispiel: Füllstands-Regelung

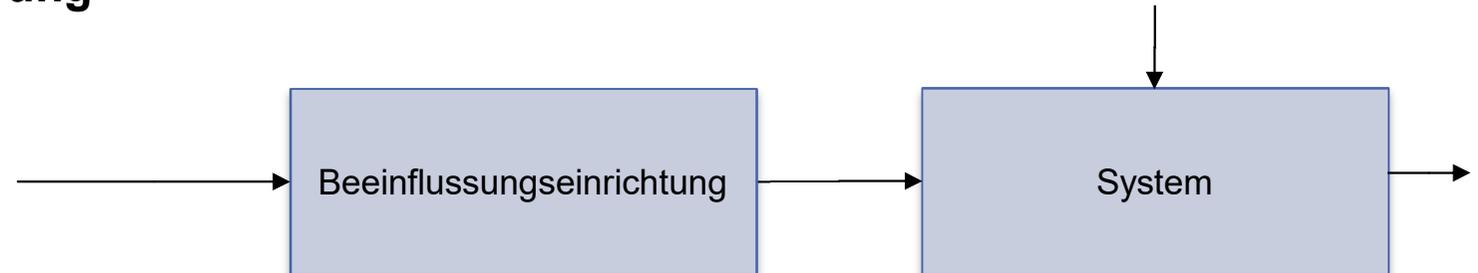
Fortlaufende Messung der Ausgangsgröße (Füllstand $x = h$), Vergleich mit der Führungsgröße $w = h_s$ und Beeinflussung des Prozesses über die Ventilstellung aufgrund der gewonnenen Information



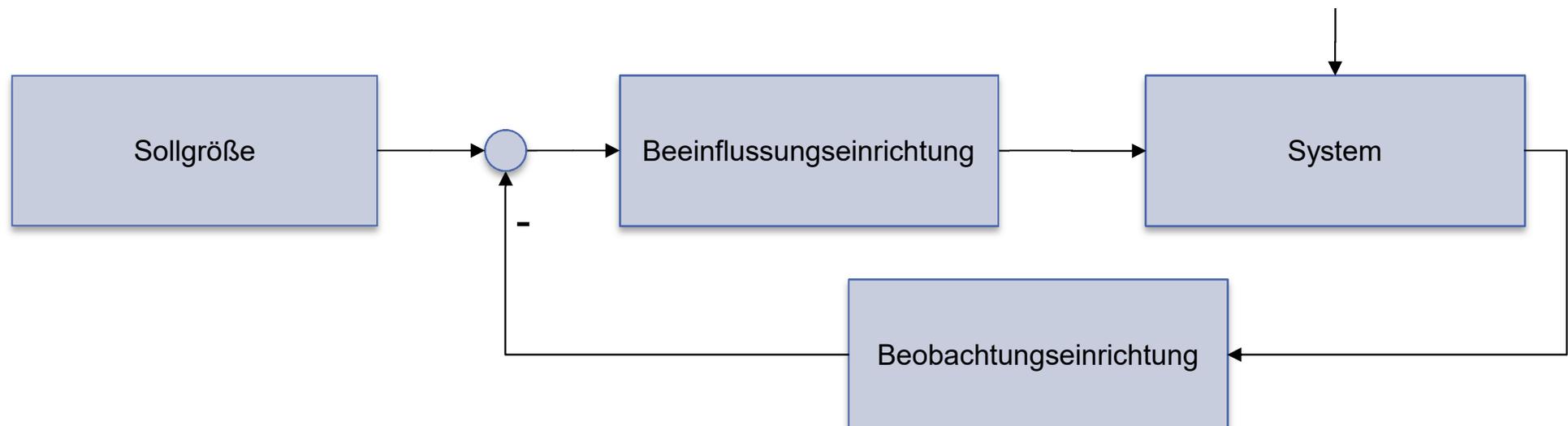
1.4 Steuerung und Regelung

1.4.3 Schematische Darstellung

Schematisch: Steuerung



Schematisch: Regelung



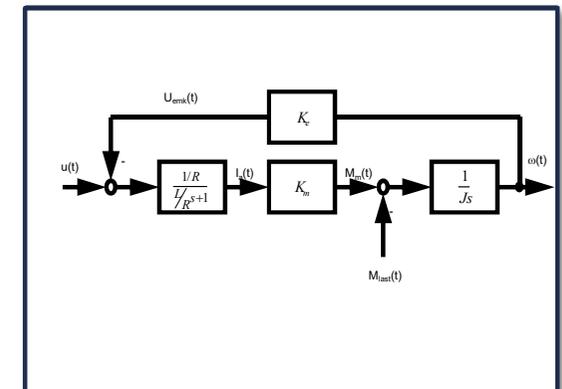
1. Einführung

1. Motivation
2. Übersicht
3. Begriffsbildung und Modellierung
4. Steuerung und Regelung
- 5. Entwicklungsablauf für Regelungssysteme**



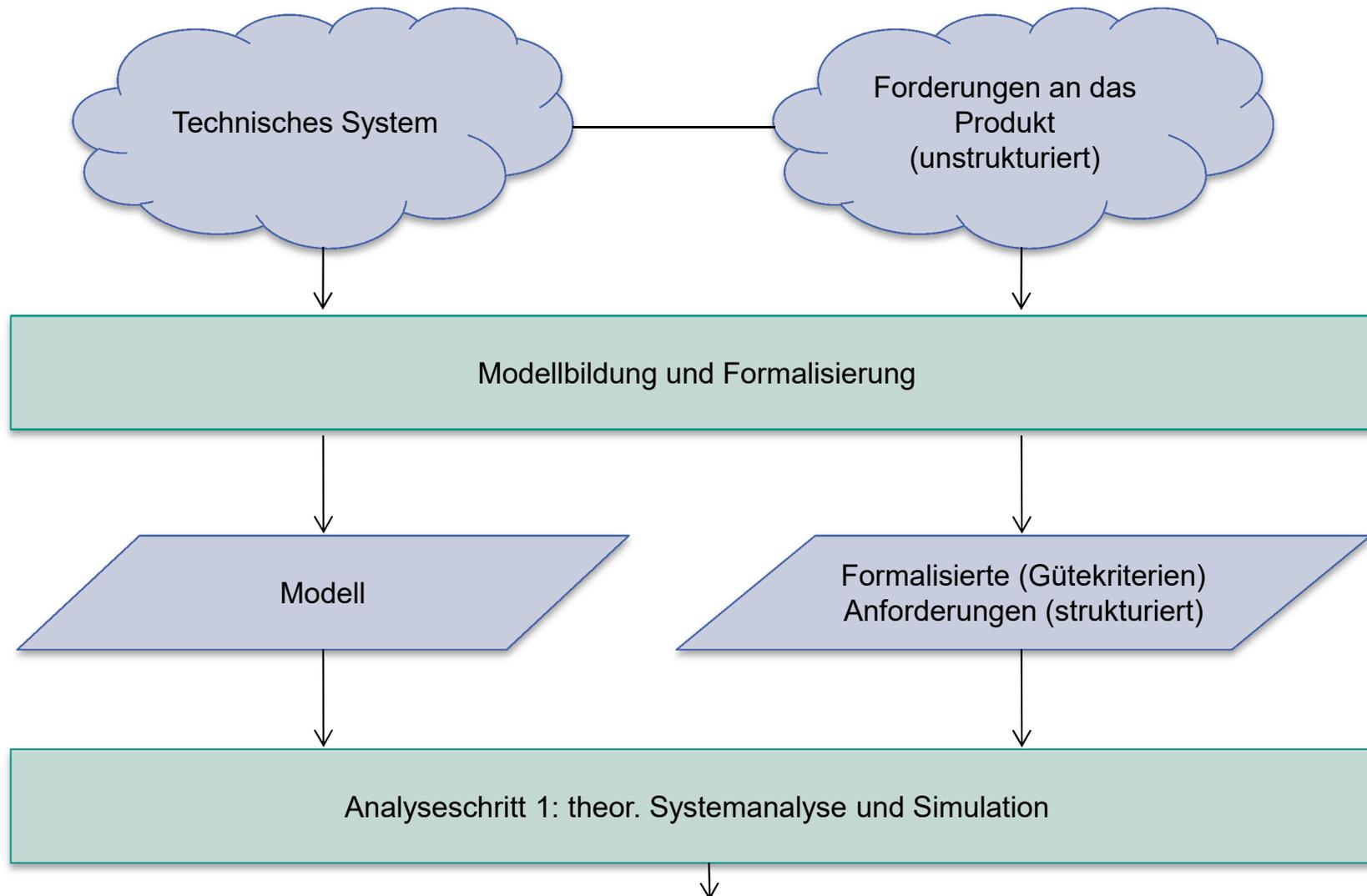
2. Klassifizierung und Beschreibung von linearen Regelkreisen

1. Einführung und Grundbegriffe
2. Das Signalflussbild
3. Verhalten elementarer zeitkont. Regelkreisglieder
4. Standardregelkreis und Signalflussbildumformungen
5. Aufbau digitaler Regelkreise
6. Analoge und digitale Regelkreise



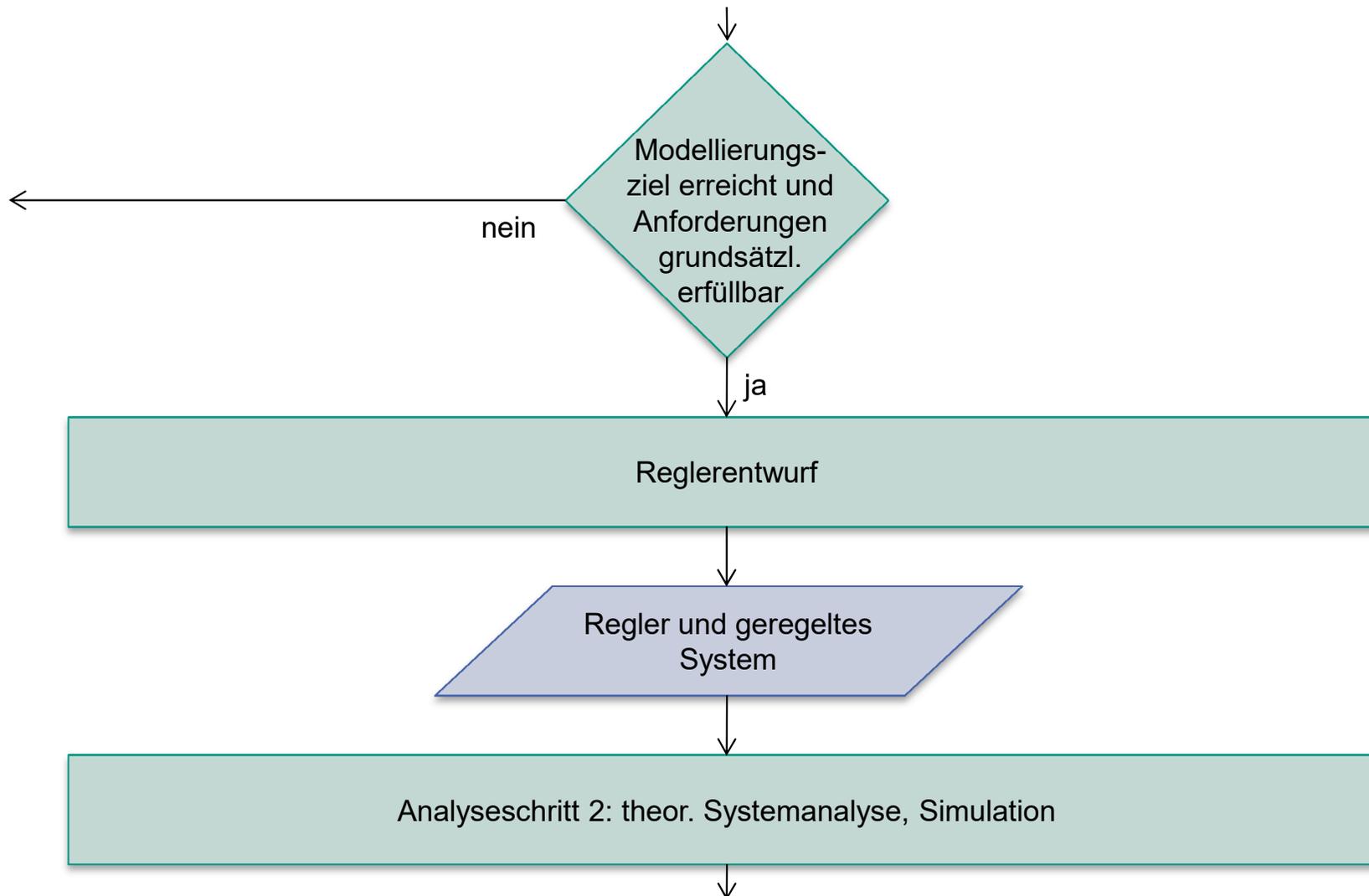
1.5 Entwicklungsablauf für Regelungssysteme

1.5.1 Modellbildung und Analyse



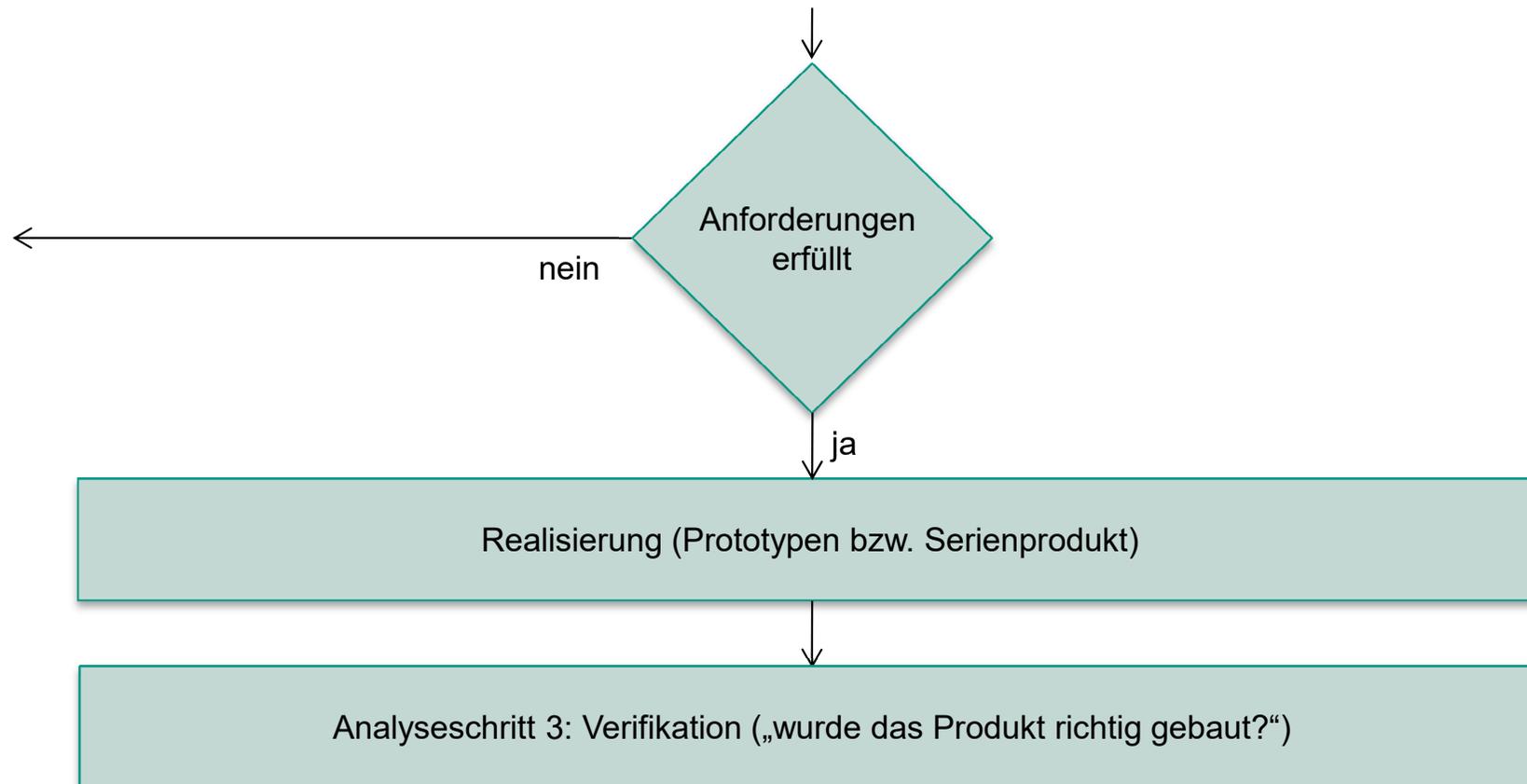
1.5 Entwicklungsablauf für Regelungssysteme

1.5.2 Reglerentwurf



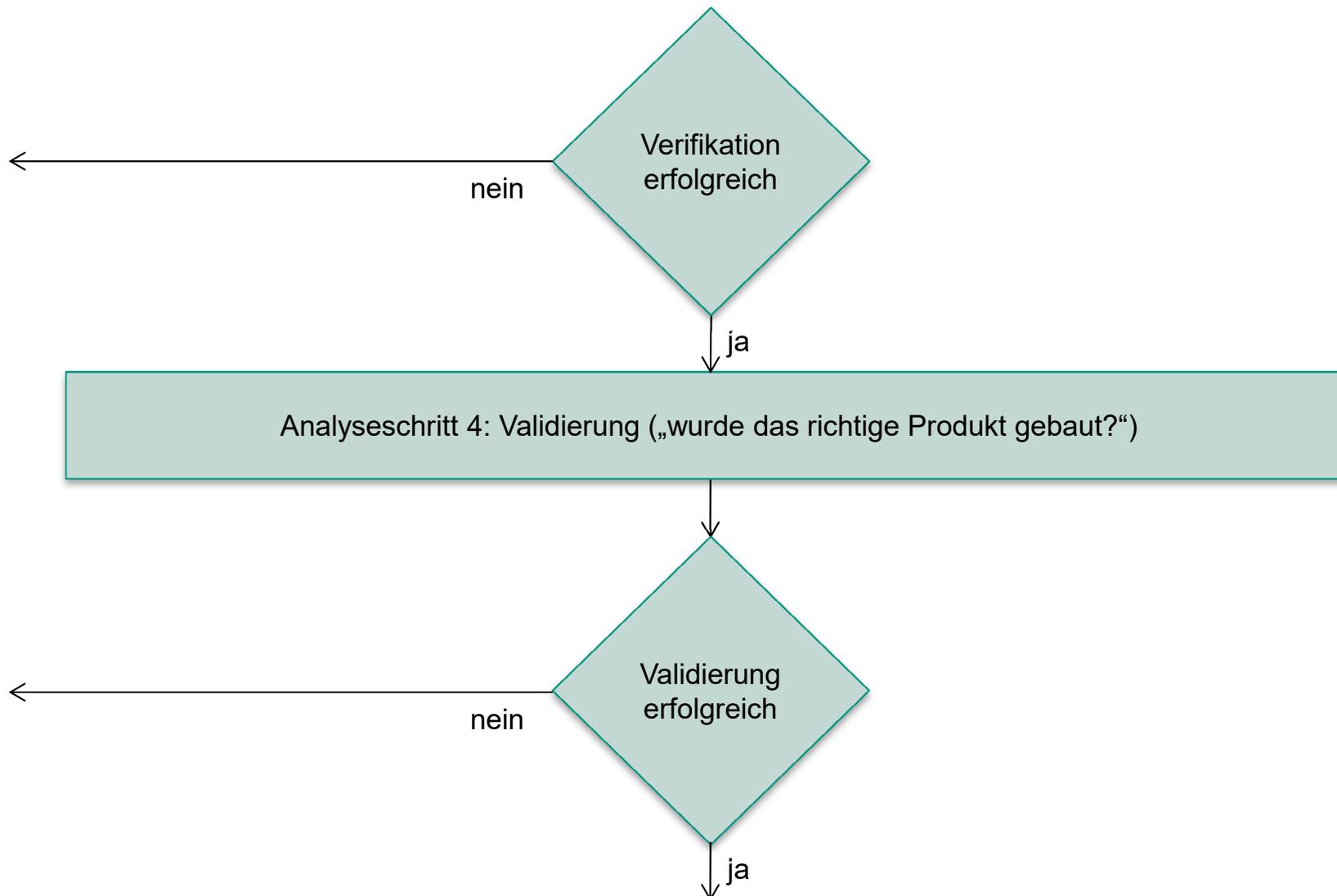
1.5 Entwicklungsablauf für Regelungssysteme

1.5.3 Realisierung



1.5 Entwicklungsablauf für Regelungssysteme

1.5.3 Verifikation und Validierung



1.5 Entwicklungsablauf für Regelungssysteme

1.5.4 Übersicht

