



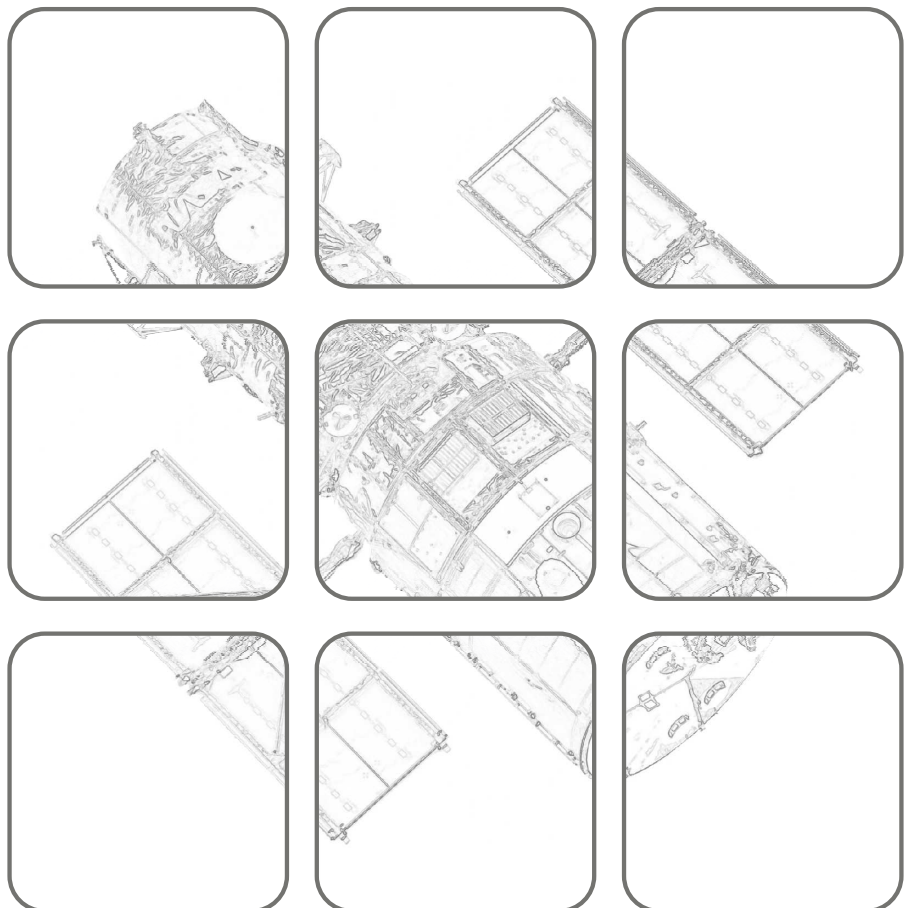
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN



REGELUNGSSYSTEME 2

Vorlesung
SS 2021

Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas KUGI



Regelungssysteme 2

Vorlesung
SS 2021

Univ.-Prof. Dr. techn. Andreas KUGI

TU Wien
Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik
Gruppe für komplexe dynamische Systeme

Gußhausstraße 27–29
1040 Wien
Telefon: +43 1 58801 – 37615
Internet: <https://www.acin.tuwien.ac.at>

© Institut für Automatisierungs- und Regelungstechnik, TU Wien

Inhaltsverzeichnis

1	Nichtlineare Systeme	1
1.1	Lineare und nichtlineare Systeme	3
1.2	Satellitenregelung	8
1.3	Balken mit Kugel	11
1.4	Positionierung mit Haftreibung	20
1.5	Linearer und nichtlinearer Oszillator	38
1.6	Fahrzeugmanöver	41
1.7	Gleichstrommaschinen	44
1.8	Hydraulischer Aktor (Zweistangenzyylinder)	55
1.9	Literatur	23
2	Dynamische Systeme	61
2.1	Differenzialgleichungen	72
2.1.1	Der Normbegriff	76
2.1.2	Induzierte Matrixnorm	87
2.1.3	Banachraum	93
2.1.4	Hilbertraum	102
2.1.5	Existenz und Eindeutigkeit	108
2.1.6	Einfluss von Parametern	122
2.2	Literatur	47
3	Lyapunov-Theorie: Grundlagen	131
3.1	Autonome Systeme	131
3.1.1	Das Vektorfeld	132
3.1.2	Stabilität der Ruhelage	138
3.1.3	Direkte (Zweite) Methode von Lyapunov	139
3.1.4	Einzugsbereich	152
3.1.5	Das Invarianz-Prinzip	165
3.1.6	Lineare Systeme	176
3.1.7	Indirekte (Erste) Methode von Lyapunov	189
3.2	Nichtautonome Systeme	195
3.2.1	Lineare Systeme	208
3.2.2	Lyapunov-ähnliche Theorie: Barbalat's Lemma	216
3.3	Literatur	81
4	Singuläre Störtheorie	228
4.1	Grundidee	229
4.2	Unterschiedliche Zeitskalen	242

4.3	Lineare zeitinvariante Systeme	255
4.4	Literatur	99
5	Lyapunov-Theorie: Reglerentwurf	275
5.1	Integrator Backstepping	276
5.2	Verallgemeinertes Backstepping	293
5.3	Adaptive Regelung	308
5.4	PD-Regelgesetz für Starrkörpersysteme	322
5.5	Inverse Dynamik (Computed-Torque)	335
5.6	Literatur	124
6	Exakte Linearisierung und Flachheit	346
6.1	Eingangs-Ausgangslinearisierung	347
6.2	Nulldynamik	364
6.3	Eingangs-Zustandslinearisierung	380
6.4	Trajektorienfolgeregelung	395
6.4.1	Exakte Feedforwardlinearisierung mit Ausgangsstabilisierung	399
6.4.2	Exakte Eingangs-Zustandslinearisierung mit Beobachter	416
6.4.3	Trajektorienfolgeregelung für einen nichtflachen Ausgang	437
6.5	Mehrgrößenfall	453
6.5.1	Exakte Linearisierung	453
6.5.2	Flachheit	480
6.6	Literatur	175
A	Grundlagen der Differentialgeometrie	A1
A.1	Mannigfaltigkeit	A1
A.2	Tangententialraum	A8
A.3	Kotangententialraum	A18
A.4	Lie-Klammer	A28
A.5	Distribution und Kodistribution	A38
A.6	Theorem von Frobenius	A47
A.7	Literatur	A19
B	Beobachter für zeitvariante lin. Systeme	B1
B.1	Literatur	B10

Abbildungsverzeichnis

1.1	Zur Drehbewegung eines Satelliten.	9
1.2	Balken mit rollender Kugel.	12
1.3	Kran mit Schwenkarm.	17
1.4	Geschlossene kinematische Kette.	19
1.5	Feder-Masse-System mit Haftreibung.	21
1.6	Zum statischen Reibkraftmodell.	22
1.7	Blockschaltbild in SIMULINK zum Feder-Masse-System mit Haftreibung.	25
1.8	Sprungantwort des linearen Systems.	34
1.9	Positionsregelung eines Feder-Masse-Systems mit Haftreibung mithilfe eines PI-Reglers.	35
1.10	Nichtlinearer und linearer Oszillator.	40
1.11	Einfaches Fahrzeugmodell.	42
1.12	Ersatzschaltbild einer fremderregten Gleichstrommaschine.	45
1.13	Stationäre Kennlinien bei der Feldregelung.	52
1.14	Ersatzschaltbild einer Reihenschlussmaschine.	54
1.15	Zweistangenzyylinder mit 3/4-Wegeventil.	56
2.1	Bewegung auf einer Kugel.	69
3.1	Zum Begriff des Vektorfeldes am Beispiel des elektrischen Feldes zweier Punktladungen.	136
3.2	Vektorfeld eines instabilen aber anziehenden Punktes.	140
3.3	Einfaches elektrisches System.	142
3.4	Zur Konstruktion einer Lyapunovfunktion.	147
3.5	Zur Abgeschlossenheit von Niveaumengen.	155
3.6	Blockschaltbild des untersuchten dynamischen Systems.	159
3.7	Zur Berechnung des Einzugsbereiches von Abbildung 3.6.	164
3.8	Einfaches mechanisches System.	166
3.9	Grenzpunkte und Grenzmengen.	171
4.1	Simulationsergebnisse des vollständigen und des reduzierten Modells der Gleichstrommaschine.	235
4.2	Kaskadierter Regelkreis.	236
4.3	Blockschaltbild des linearen Systems (4.14b).	238
4.4	Elektrisches Netzwerk.	239
4.5	Modell eines Viertelfahrzeuges.	265
4.6	Reduziertes quasi-stationäres Modell eines Viertelfahrzeuges.	271
5.1	Aktive Fahrzeugdämpfung.	301

5.2	Roboter mit drei Freiheitsgraden.	334
6.1	Einfacher elastisch gekoppelter Roboterarm.	388
6.2	Blockschaltbild der Zwei-Freiheitsgrad-Regelkreisstruktur.	403
6.3	Schematische Darstellung des Einspurmodells.	405
6.4	Achskennlinien (Seitenkraft des Reifens als Funktion des Schräglaufwinkels) für verschiedene Bodenverhältnisse.	408
6.5	Blockschaltbild der exakten Eingangs-Zustandslinearisierung mit Regler- Beobachterstruktur.	422
6.6	Schematische Darstellung der Magnetlagerung.	424
6.7	Schematische Darstellung des Laborversuchs Ball-on-Wheel.	433
6.8	Schematische Darstellung des grundsätzlichen Aufbaus einer Axialkolben- pumpe in Schrägscheibenbauweise.	448
6.9	Hydraulisches Ersatzschaltbild der Axialkolbenpumpe mit Last.	449
6.10	Schematische Darstellung des Laborhelikopters.	474
6.11	Schematische Darstellung eines Brückenkrans.	484
A.1	Zur Definition einer Mannigfaltigkeit.	A4
A.2	Zur stereographischen Projektion.	A5
A.3	Zur Abbildung zwischen zwei Mannigfaltigkeiten.	A16
A.4	Zur geometrischen Deutung der Lie-Klammer.	A30
A.5	Die Lie-Klammer als Kommutator.	A37