

Grundlagen elektrische Antriebe

Kapitel 5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb – Systemanalyse

Prof. Dr.-Ing. A. Kleimaier

Aktuelles Kapitel

Kapitel 1: Einführung – Beispiele, Anwendungsgebiete

Kapitel 2: Grundlagen Magnetischer Kreis

3: Aufbau und Betriebsverhalten der Gleichstrommaschine

4: Gesteuerter Betrieb der Gleichstrommaschine

4a: Leistungselektronik für Gleichstrommaschinen



5: Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb: Systemanalyse

6: Elektrofahrzeuge

Kapitel 7: Grundlagen Drehfeldmaschinen

8: Aufbau und Betriebsverhalten der Asynchronmaschine

9: Gesteuerter Betrieb der Asynchronmaschine

10: Betriebsarten und drehzahlvariabler Betrieb der ASM

10a: Leistungselektronik für Drehfeldmaschinen

Kapitel 11: Aufbau und Betriebsverhalten Synchronmaschine

12: Aktuelle Entwicklung: neue Maschinenvarianten

13: Ansteuerung und Systemverhalten BLDC-Motor

Grundverständnis
elektrischer Antrieb

- Gleichstrommaschine
- Steuerung & Regelung
- Gleichrichter, DC-Steller

Drehfeldmaschinen:

- Drehfeldwicklung
- Asynchronmaschine
- Wechselrichtertechnik

Synchronmaschine:

- fremderregte SM
- PMSM, MDM, BLDC-Motor

Inhalt Kapitel 5 : Drehzahl geregelter Gleichstromantrieb – Systemanalyse

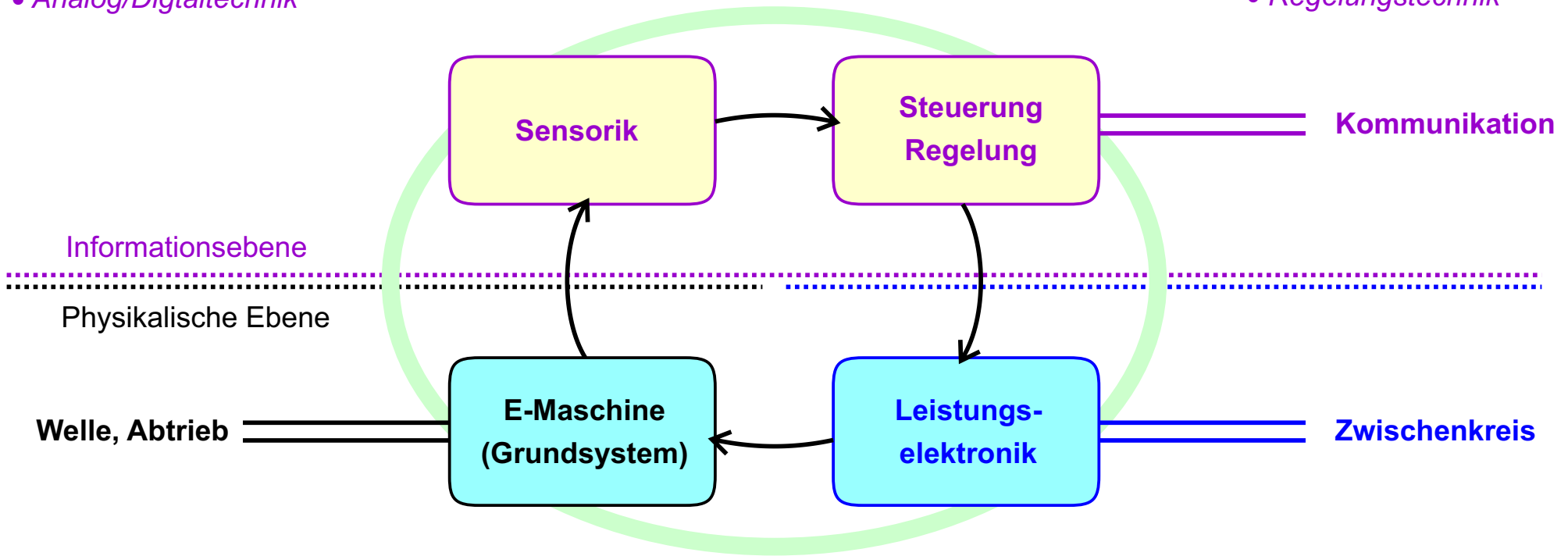
- 5.1 Aufgabenstellung
- 5.2 Modellbildung Regelstrecke
- 5.3 Modulationsverfahren
- 5.4 Stromregelkreis
- 5.5 Drehzahlregelkreis
- 5.6 Simulations- und Entwicklungstools
- 5.7 "Künstliche Intelligenz"

5.1 Aufgabenstellung

Elektrischer Antrieb mit Stromregelung = mechatronisches System

- *Schaltungsentwicklung*
- *Messtechnik*
- *Analog/Digitaltechnik*

- *Schaltungsentwicklung*
- *Softwareengineering*
- *Regelungstechnik*

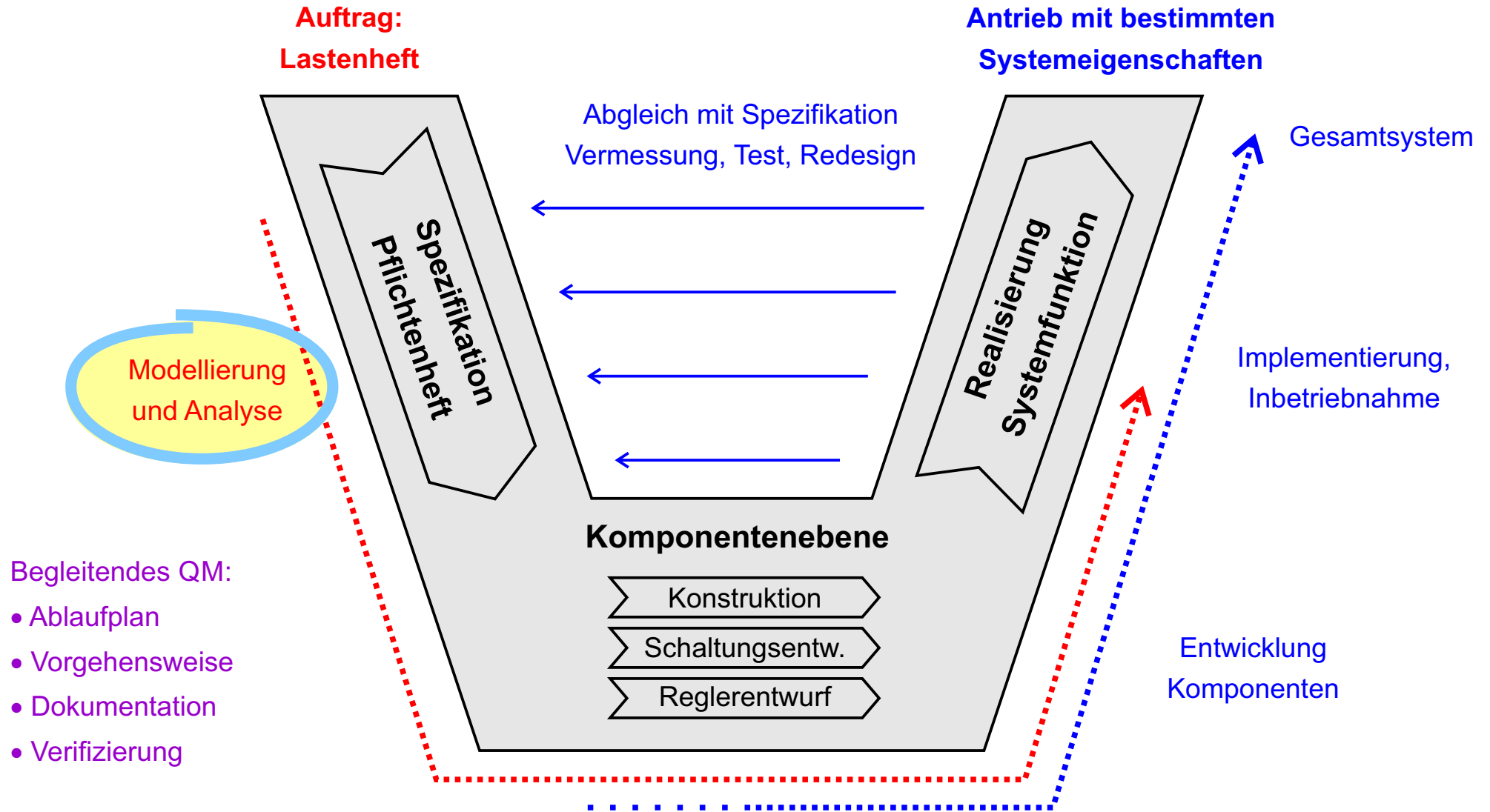


- *Magnetkreisauslegung*
- *Festigkeitsrechnung*
- *Konstruktion*

- *Schaltungsentwicklung*
- *Aufbautechnologie*
- *Elektrokonstruktion*

5.1 Aufgabenstellung

Vorgehensweise bei der Systementwicklung: V-Modell

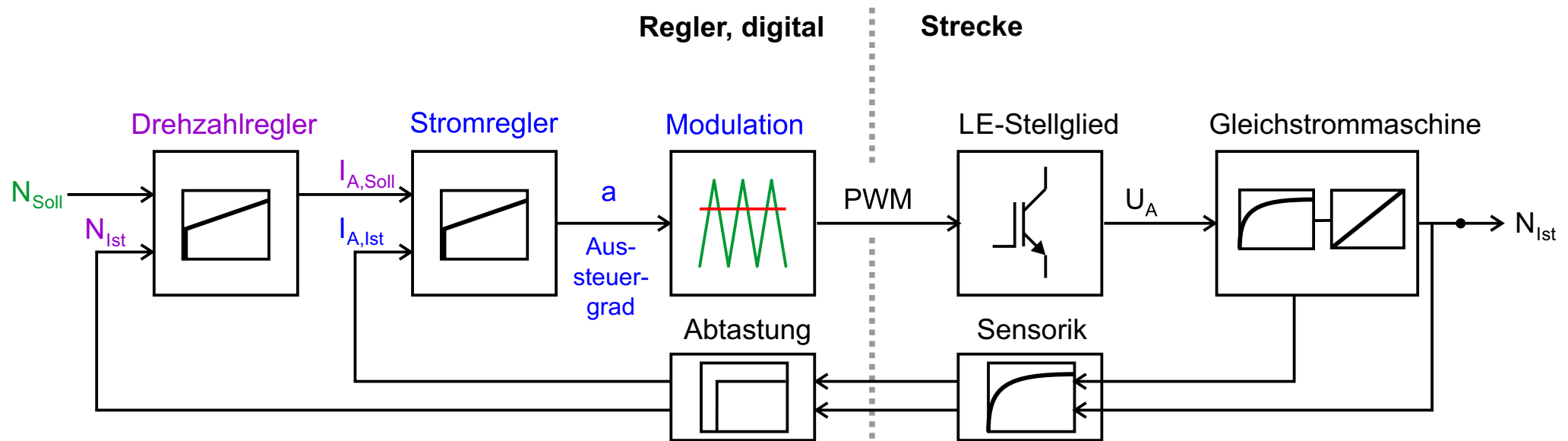


Begleitendes QM:

- Ablaufplan
- Vorgehensweise
- Dokumentation
- Verifizierung

5.1 Aufgabenstellung

hier: wir betrachten nur die regelungstechnische Modellbildung auf Systemebene



Ziel:

Simulation und Analyse Gesamtsystem

Arbeitsschritte:

1. Modellbildung der Regelstrecke: GM und LE
2. Ansteuerung LE: Pulsmustererzeugung (PWM)
3. Auslegung und Test unterlagerte Stromregelung
4. Auslegung und Test überlagerte Drehzahlregelung

5.1 Aufgabenstellung

Regelungstechnische Modellbildung auf Systemebene

Erstellen eines Simulationsmodells für **Regelung (überlagerte Regelkreise + Stromregler + PWM)**
+ **Strecke (Leistungselektronik + Maschine + Antrieb)**
z.B. Matlab/Simulink/Plexsim, Dymola/Modelica, Simplorer, ...

Reglermodell:

- Auswahl und Entwurf Reglerstruktur
- Nachbildung des Übertragungsverhaltens
- Analyse, Test und Parametrierung
- Modell kann für Dokumentation genutzt werden
- ggf. direkte Implementierung in die Zielhardware (µC, FPGA) durch automatische Codegenerierung

Streckenmodell:

- Vermessung der Streckenparameter im Labor
- Nachbildung und Analyse der Strecke
- Entwickeln von Systemverständnis (!)
- Modellvalidierung am Komponentenprüfstand



Simulation des Gesamtsystems:

- Definition Systemstruktur, Erstellung der Spezifikation, Absicherung von Lastenheftvorgaben
- Unterstützung der Entwicklung von Komponenten und Gesamtsystem
- Gesamtsystem steht auf dem Prüfstand: Parameterabgleich und Validierung, Doku

5.2 Modellbildung Regelstrecke: GM

Mechanisches Grundsystem (GM): Aufstellen von Zustandsdifferentialgleichungen

Systemgleichungen GM:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Ankerspannungsgl.: } U_A = R_A \cdot I_A + L_A \cdot \dot{I}_A + U_{\text{ind}} \\ \text{Momentenbilanz: } M_i = M_W + M_S + J_{\text{Ges}} \cdot \dot{\omega} \end{array} \right.$$



Zustandsraumdarstellung:
(numerische) Lösung der ZDGL
durch Integration

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Zustandsgleichung: } \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{p}, t) \\ \text{Ausgangsgleichung: } \mathbf{y}(t) = \mathbf{g}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t), \mathbf{p}, t) \end{array} \right.$$

u: Eingangsvektor
x: Zustandsvektor
p: Parametervektor
y: Ausgangsvektor



Zustandsgleichungen GM:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Eingangsgrößen: } U_A, M_W \quad \boxed{U_A} \quad \boxed{M_W} \\ \text{Zustandsgröße 1: } \dot{I}_A = 1/L_A \cdot (U_A - c \cdot \Phi \cdot \omega - R_A \cdot I_A) \quad \boxed{I_A} \\ \text{Zustandsgröße 2: } \dot{\omega} = 1/J_{\text{Ges}} \cdot (c \cdot \Phi \cdot I_A - M_S - M_W) \quad \boxed{\omega} \\ \text{Parameter: } R_A, L_A, J_{\text{Ges}}, c \cdot \Phi, M_S \\ \text{Ausgangsgröße: } N [\text{Upm}] = \omega [\text{rad/s}] \cdot 30/\pi \quad \boxed{N} \end{array} \right.$$

5.2 Modellbildung Regelstrecke: GM

Erstellung des Signalflussplans

Ankerspannungsgleichung umgestellt:

$$\frac{dI_A}{dt} = 1/L_A \cdot (U_A - c \cdot \Phi \cdot \omega - R_A \cdot I_A)$$

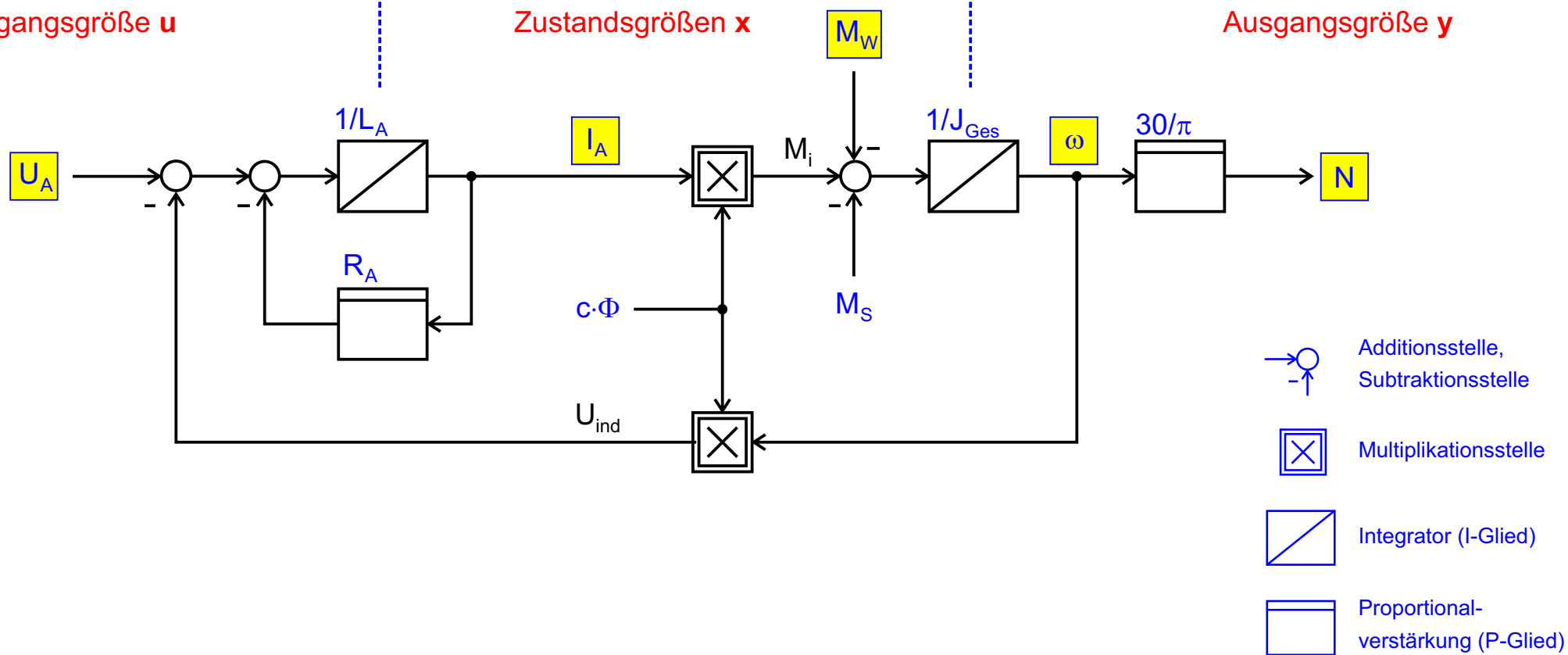
Drehmomentengleichung umgestellt:

$$\frac{d\omega}{dt} = 1/J_{Ges} \cdot (c \cdot \Phi \cdot I_A - M_W - M_S)$$

Eingangsgröße u

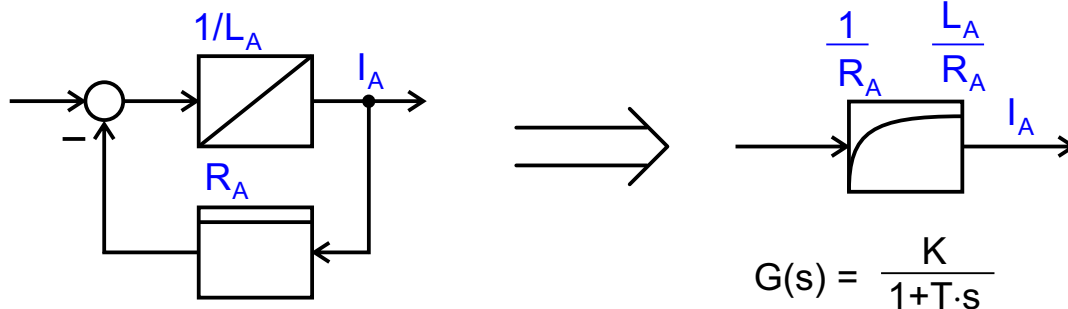
Zustandsgrößen x

Ausgangsgröße y



5.2 Modellbildung Regelstrecke: GM

Exkurs: Zusammenfassen von Modellblöcken

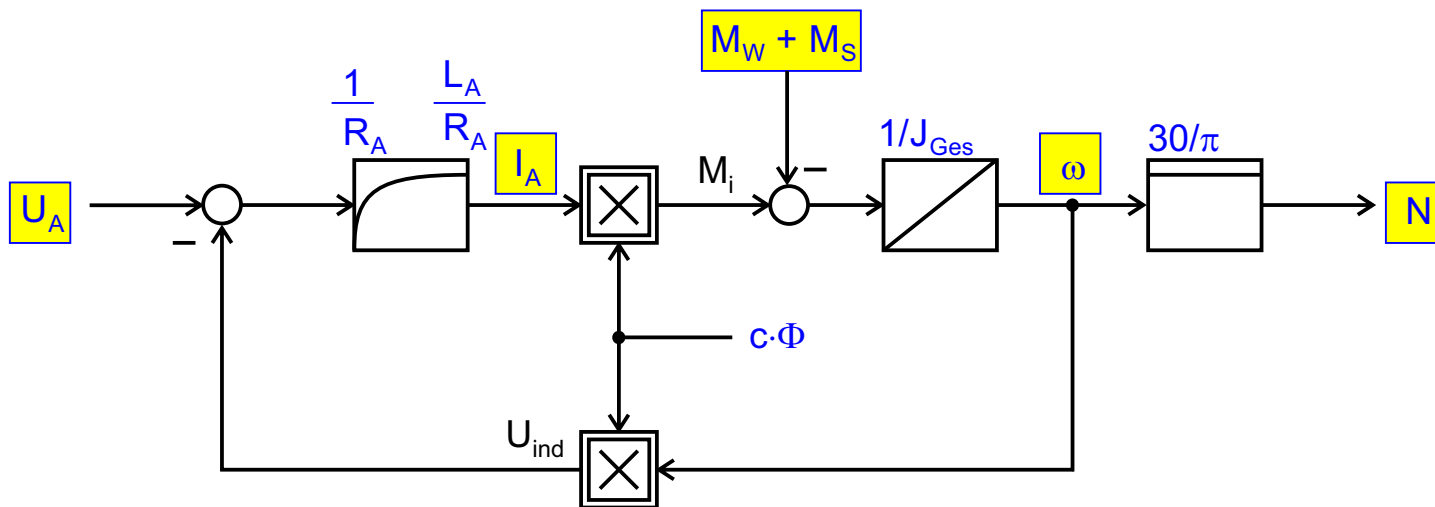


P-T₁-Glied

Verstärkung: $K = \frac{1}{R_A}$

Zeitkonstante: $T = \frac{L_A}{R_A} = \frac{1}{2\pi \cdot f_0}$

Eckfrequenz: f_0



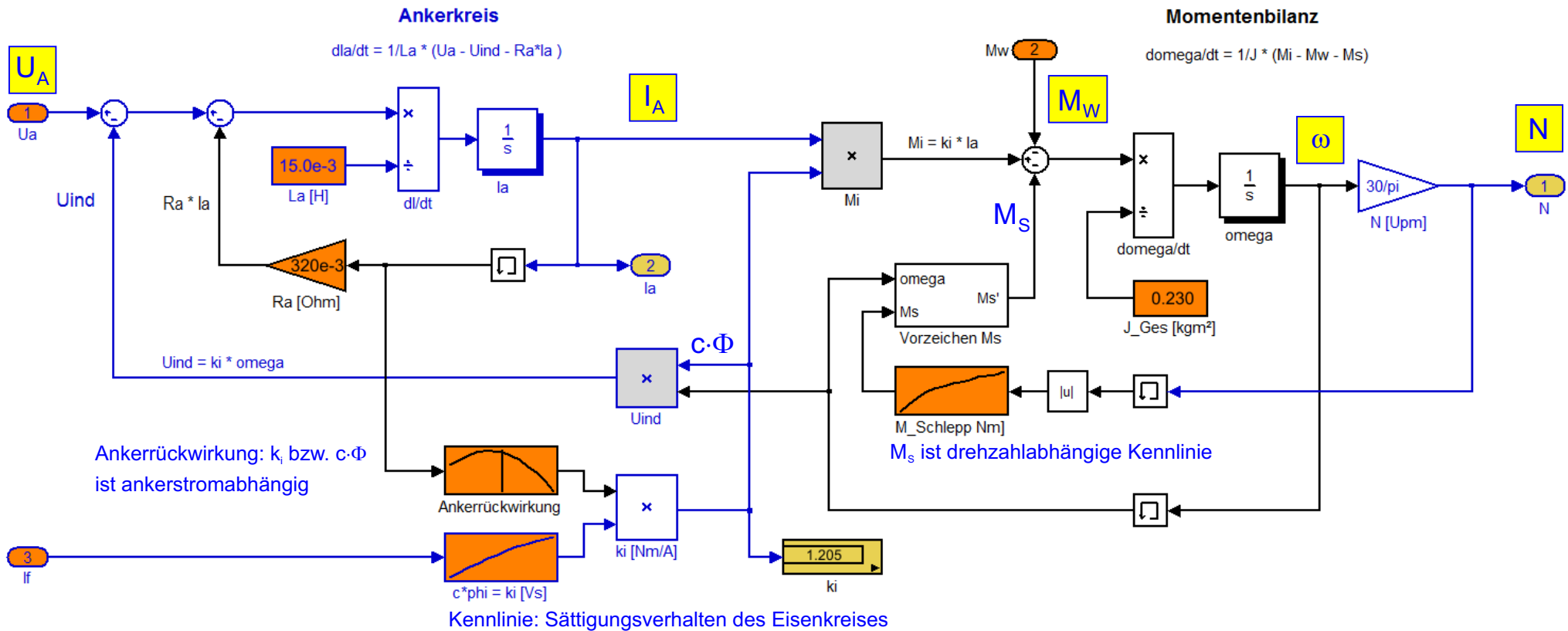
5.2 Modellbildung Regelstrecke: GM

Übertragen des Strukturbildes in eine graphische Modelloberfläche

Parametrierung: Maschine aus Antriebstechniklabor

Modelloberfläche: Simulink (zustandsabhängige Parameter sind als Kennlinien hinterlegt)

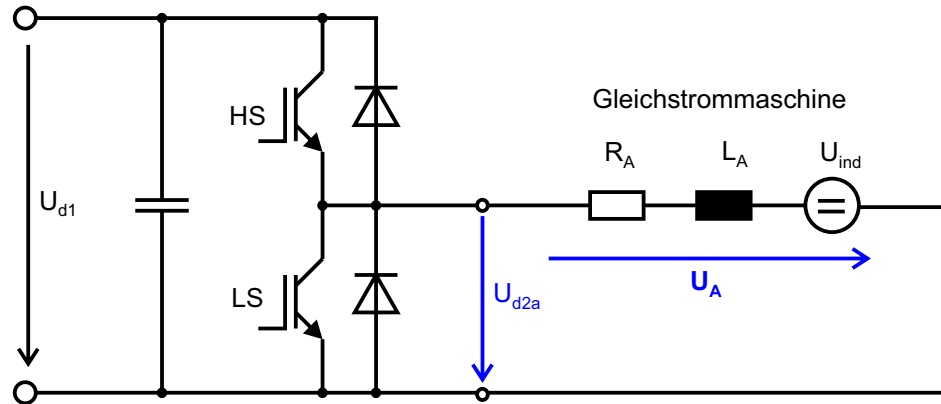
Fremderregte Gleichstrommaschine



Simulationstool: Matlab/Simulink – Modell: A. Kleimaier

5.2 Modellbildung Regelstrecke: LE-Stellglied

Leistungselektronisches Stellglied

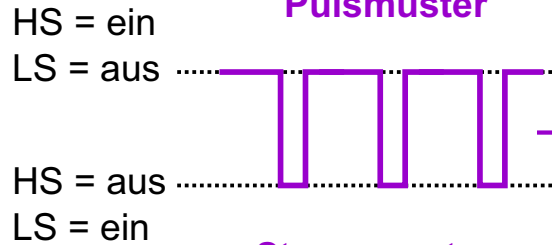


hier: Halbbrücke

dann ist nur 2 Quadrantbetrieb möglich:
Rechtslauf Motor/Generator

Modellbildung

Pulsmuster

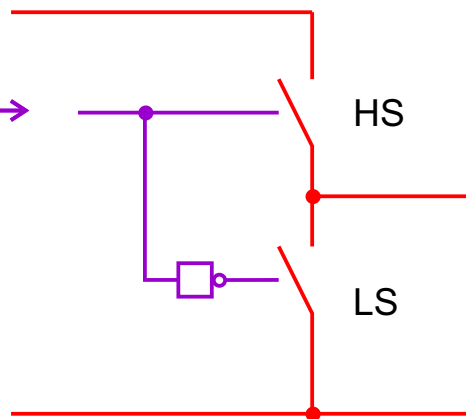


Steuergesetz:

$$U_A = U_{d2a} = a \cdot U_{d1}$$

Aussteuergrad:

$$a = 0..1$$



Systemverhalten Gesamtantrieb:

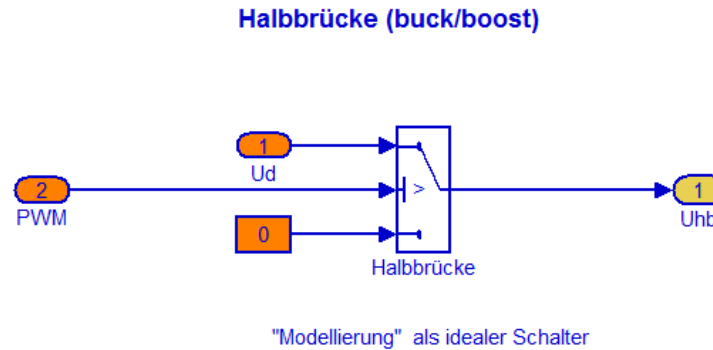
- relevantes Verhalten der Leistungselektronik abbilden
- einfachster Fall: 2 ideale Schalter
- Ansteuerung durch PWM

5.2 Modellbildung Regelstrecke: LE-Stellglied

Beispiele für die Modellbildung Halbbrücke

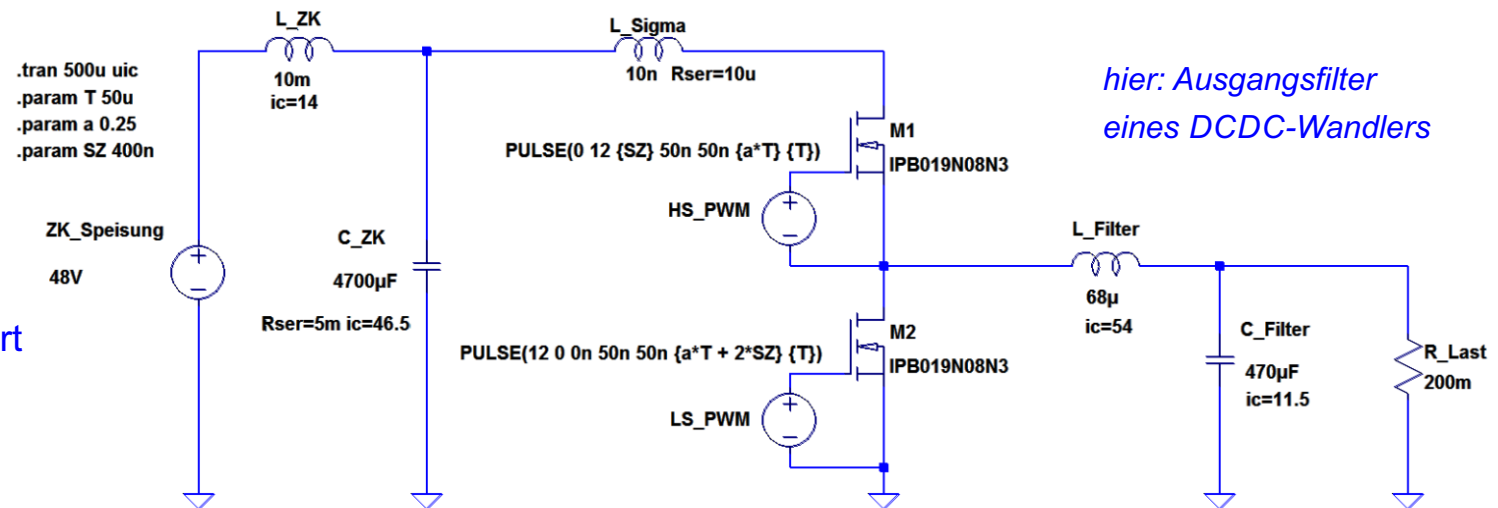
Simulink:

- Signalflussplan
- Fokus: Gesamtsystem
- nur idealer Schalter
- keine passiven Bauelemente



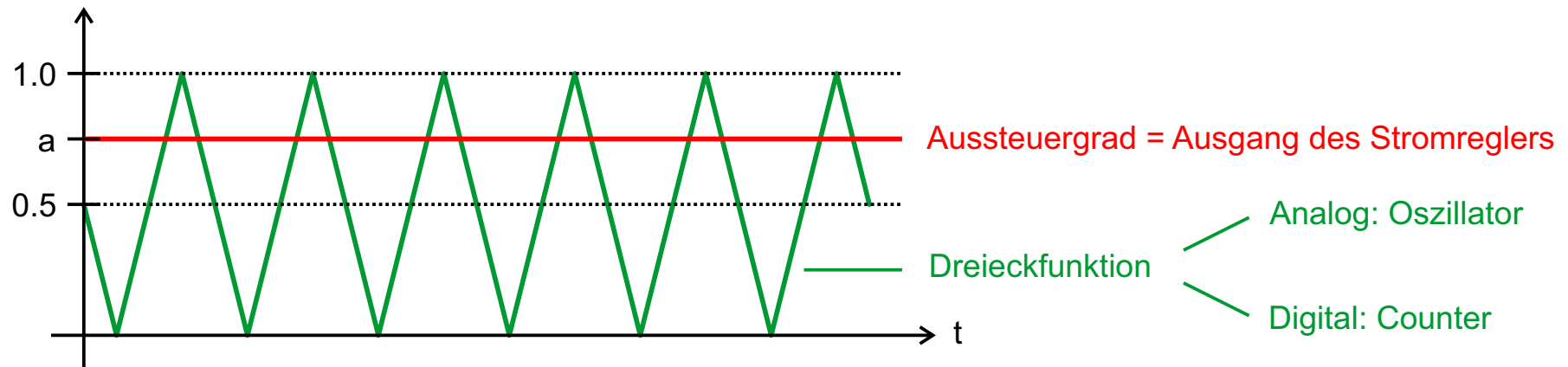
LTspice:

- objektorientiert
- Fokus: Schaltung
- reale Schalter
- passive Bauelemente
- Gateansteuerung idealisiert

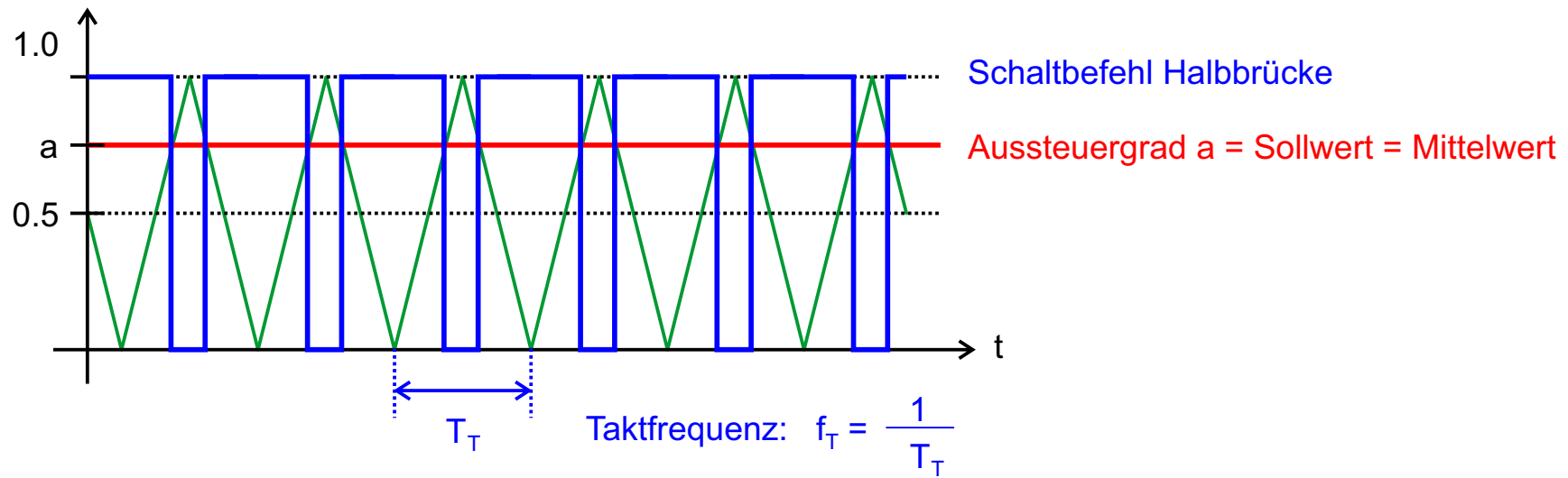


5.3 Modulationsverfahren

Standardverfahren: Dreieckmodulation



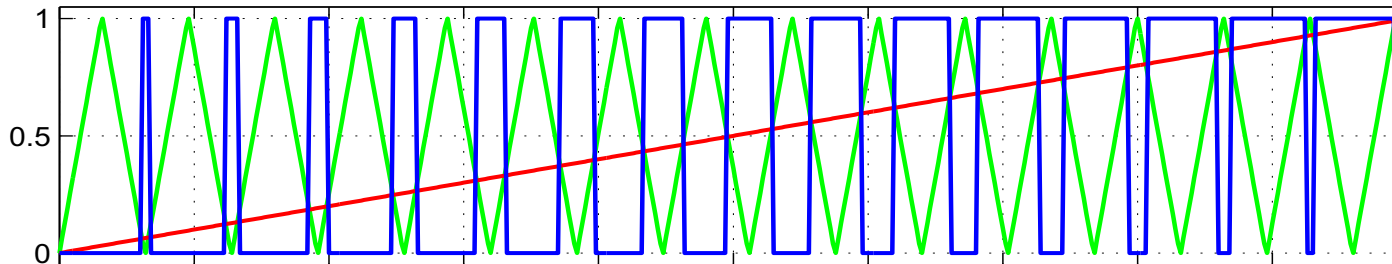
⇓ Komparator Sollwert > Dreieckfunktion



5.3 Modulationsverfahren

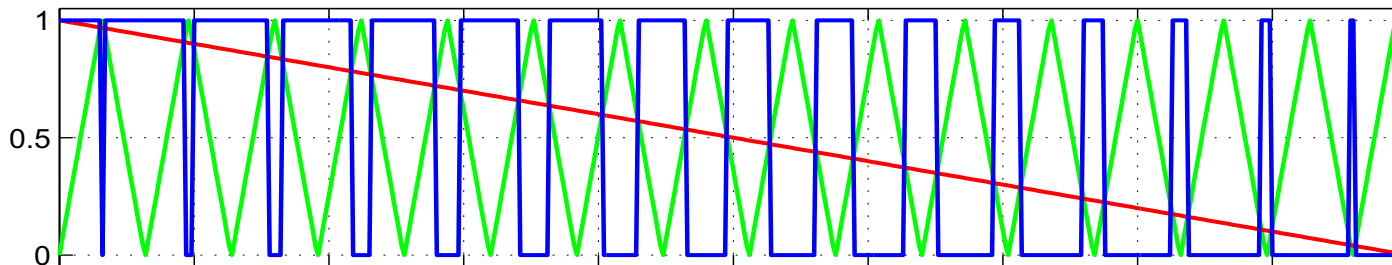
Ansteuerung Halb- und Vollbrücke, Durchfahren des gesamten Stellbereichs

Modulation Halbbrücke 1, Dreieck



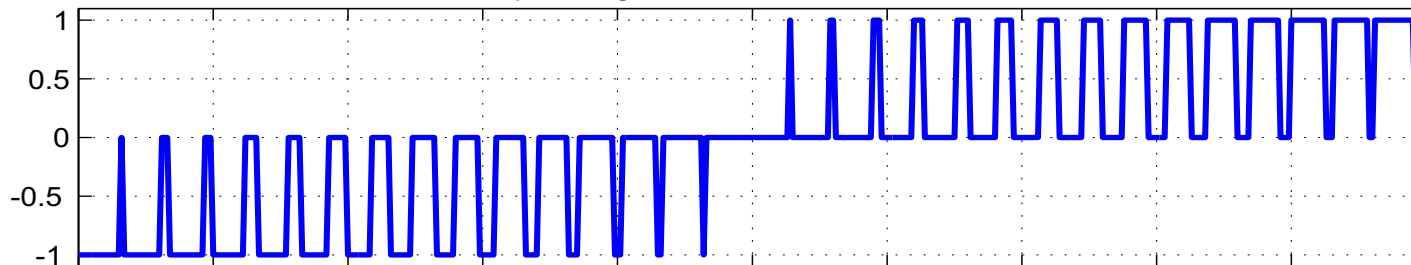
Halbbrücke 1: $a_1 = a(t)$
(wie in 5.2, nur 2Q-Betrieb)

Modulation Halbbrücke 2, Dreieck



Halbbrücke 2: $a_2 = 1 - a(t)$
(dann wäre 4Q-Betrieb mögl.)

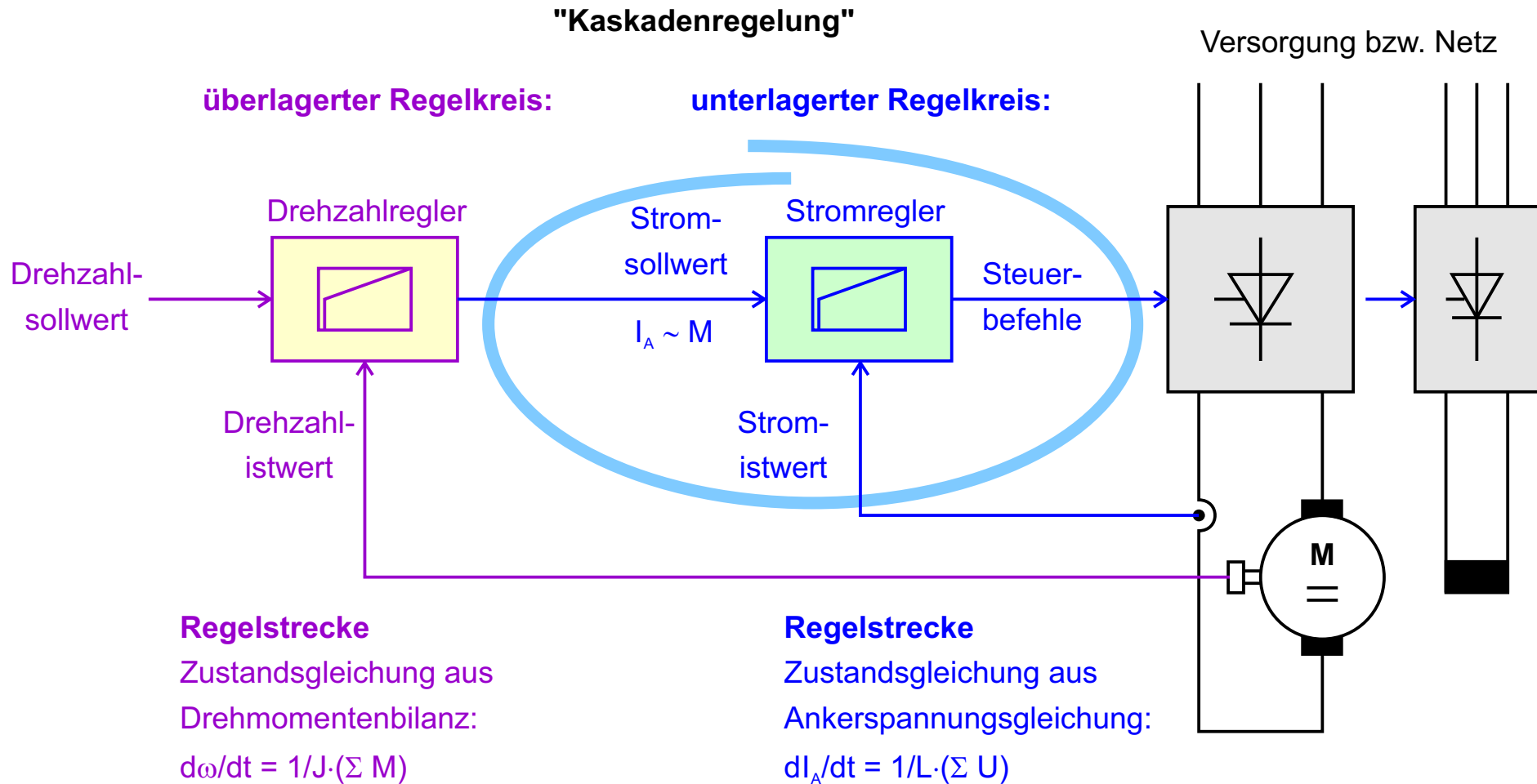
Spannung an der Last, auf U_d normiert



$U_A = U_{10} - U_{20}$:
resultierendes Pulsmuster
an der Last (Maschine)

5.4 Stromregelkreis

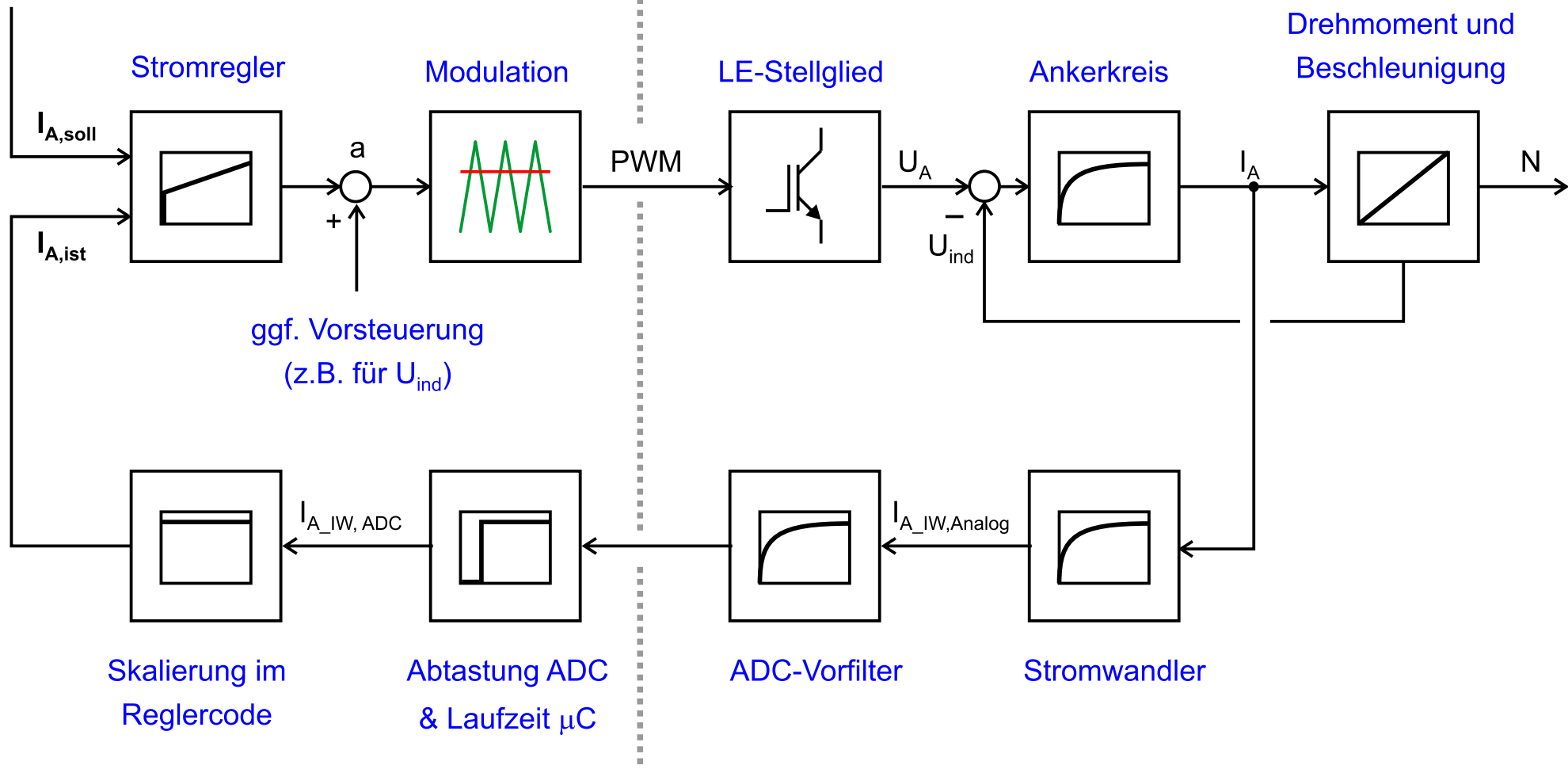
Grundstruktur drehzahl geregelter elektrischer Antrieb mit GM



5.4 Stromregelkreis

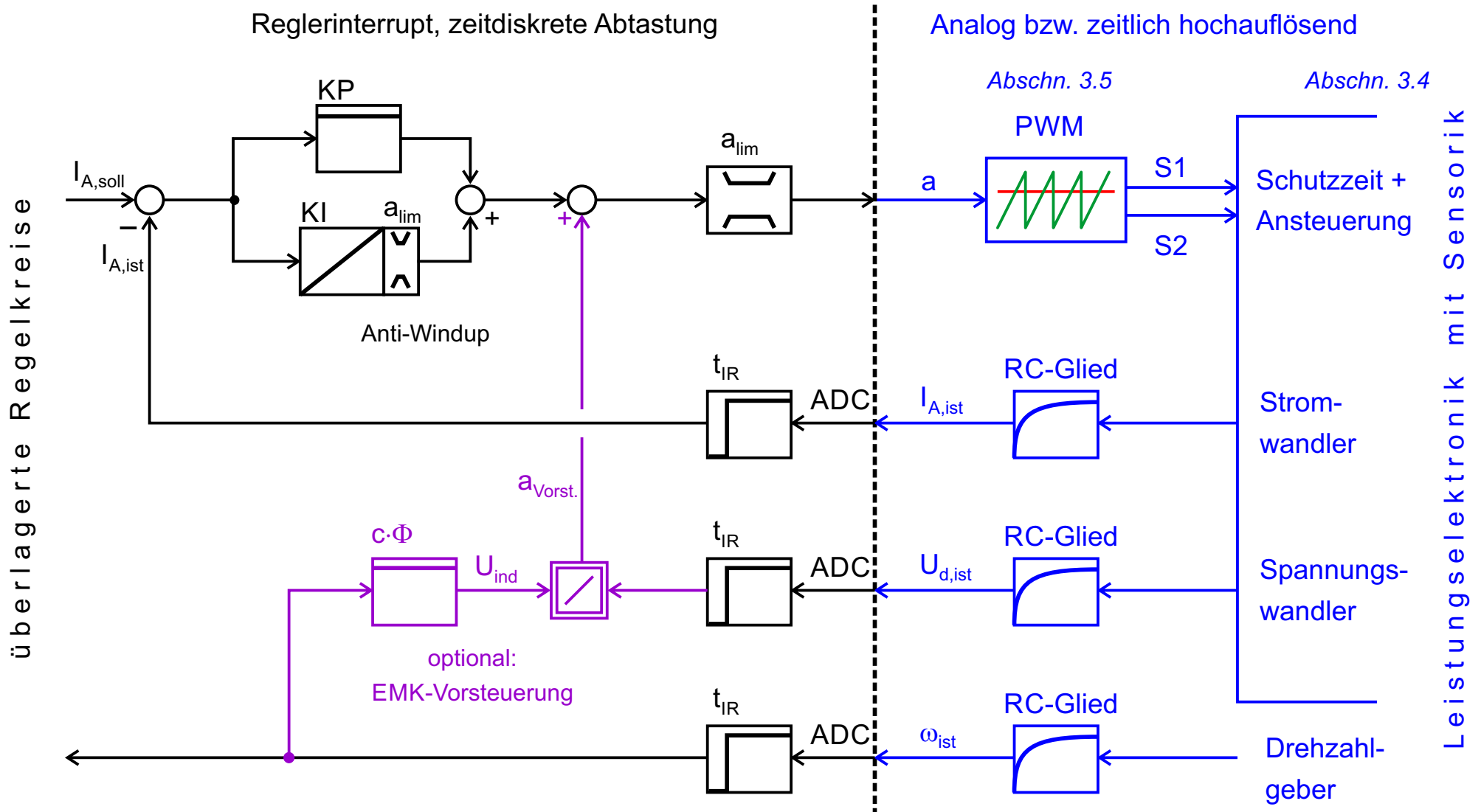
Prinzipielle Struktur

Überlagerte
Regelung /
Steuerung



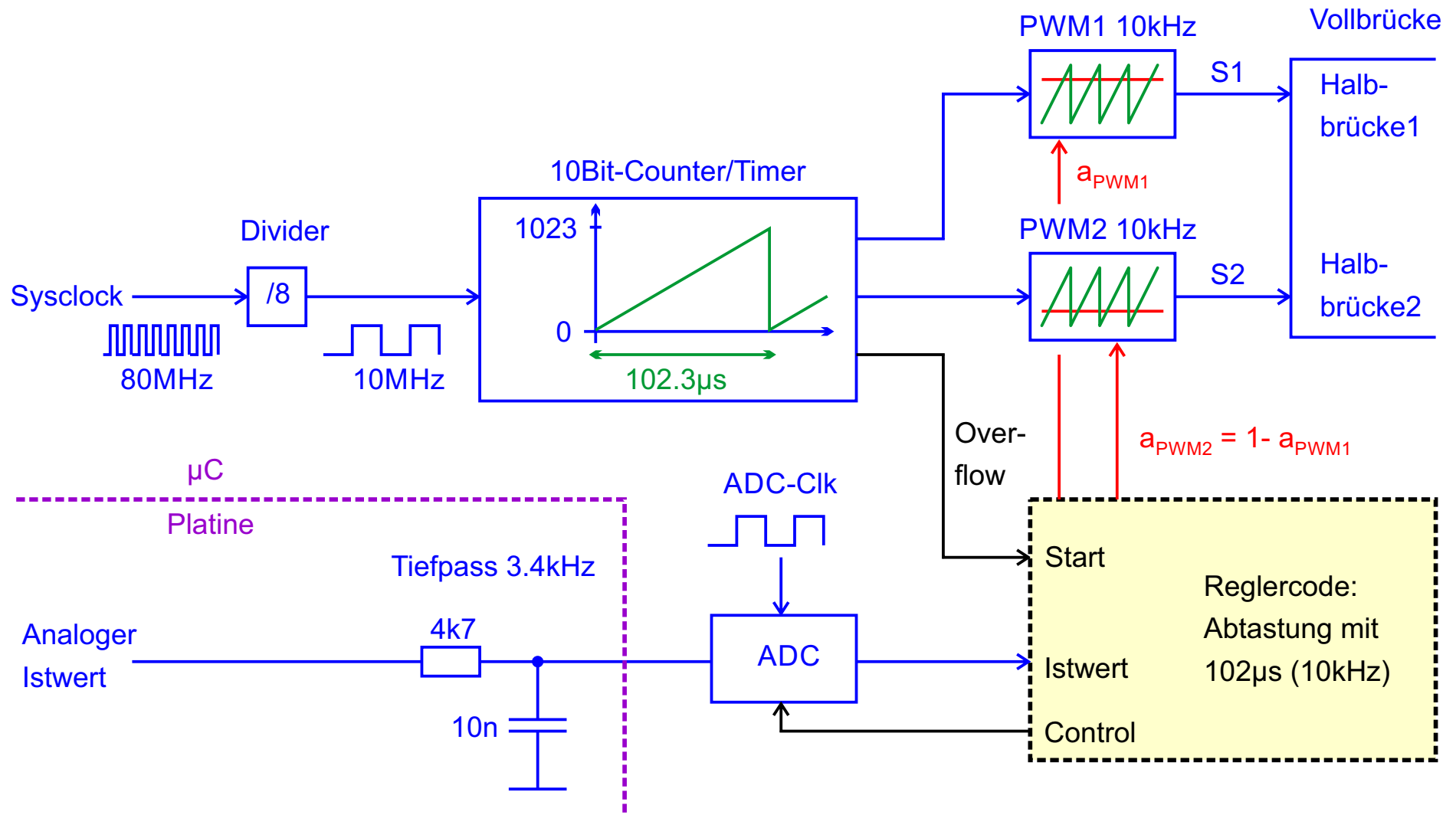
5.4 Stromregelkreis

Alternative, detailliertere Darstellung



5.4 Stromregelkreis

Beispiel für eine Reglerinterruptsteuerung (Regler läuft mit PWM synchron)



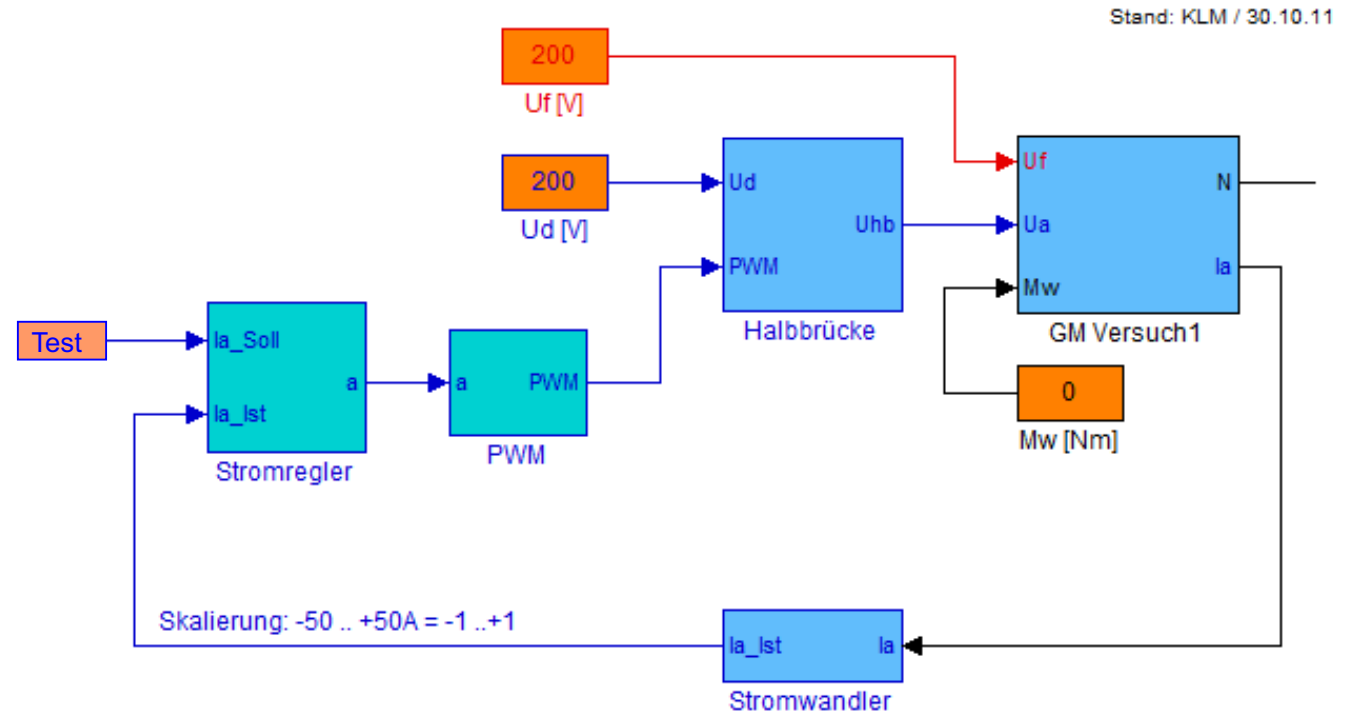
5.4 Stromregelkreis

Umsetzung in Simulink

Stromregelkreis, überlagerter Drehzahlregler fehlt noch

Abtastschrittwerten:
Streckenmodell: $1\mu\text{s}$
(möglichst fein)

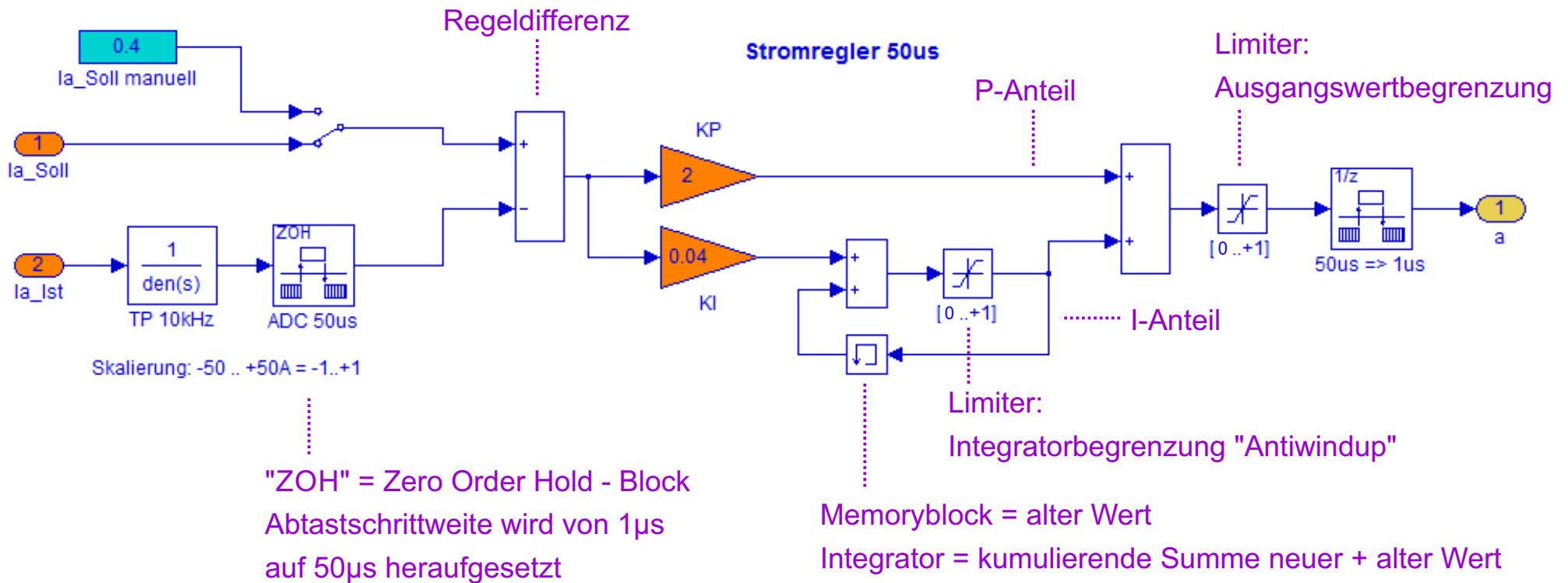
Reglerabtastung: $50\mu\text{s}$
PWM: $10\text{kHz} = 100\mu\text{s}$
(bildet μC nach)



5.4 Stromregelkreis

Umsetzung in Simulink

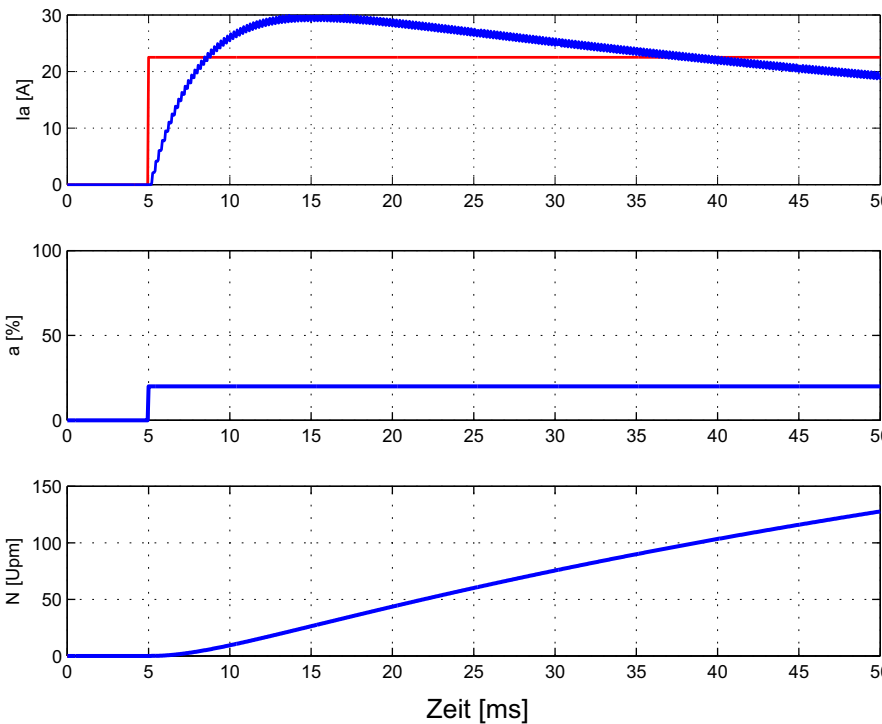
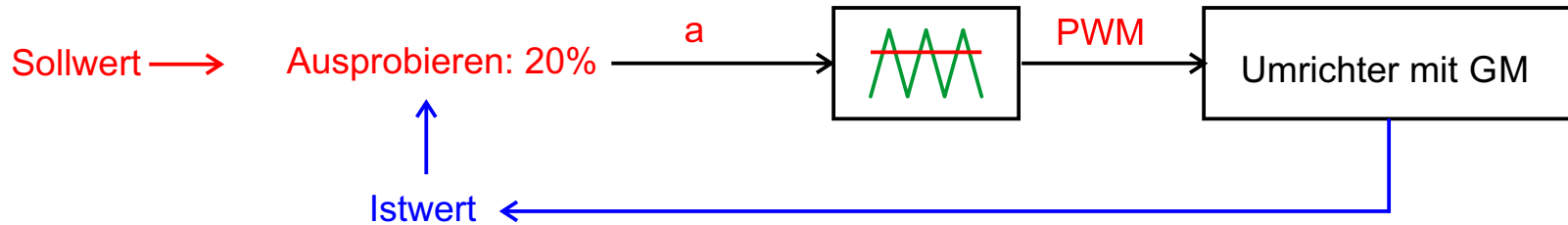
Stromregler



Simulationstool: Matlab/Simulink – Modell: A. Kleimaier

5.4 Stromregelkreis

Schritt 1: reine Steuerung



Ankerstrom [A]

rot: Sollwert

blau: Istwert

Aussteuerung [%]

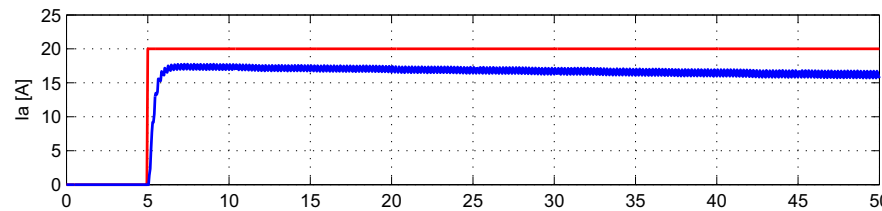
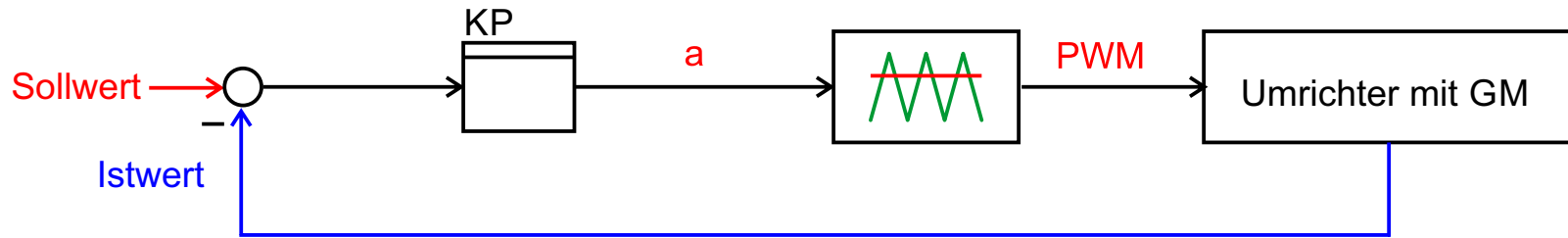
20% $\rightarrow 200V \cdot 0.2 = 40V$

Drehzahl [Upm]

Hochlauf mit $M_L = 0$

5.4 Stromregelkreis

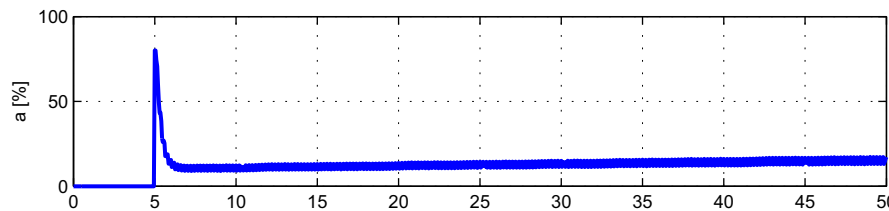
Schritt 2: einfache P-Regelung



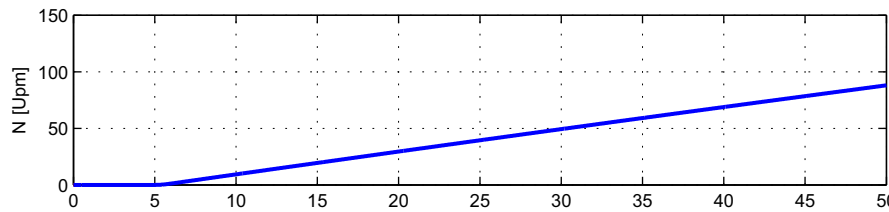
Ankerstrom [A]

rot: Sollwert

blau: Istwert



Aussteuerung [%]

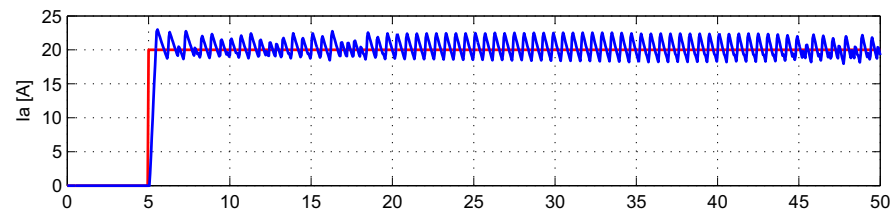
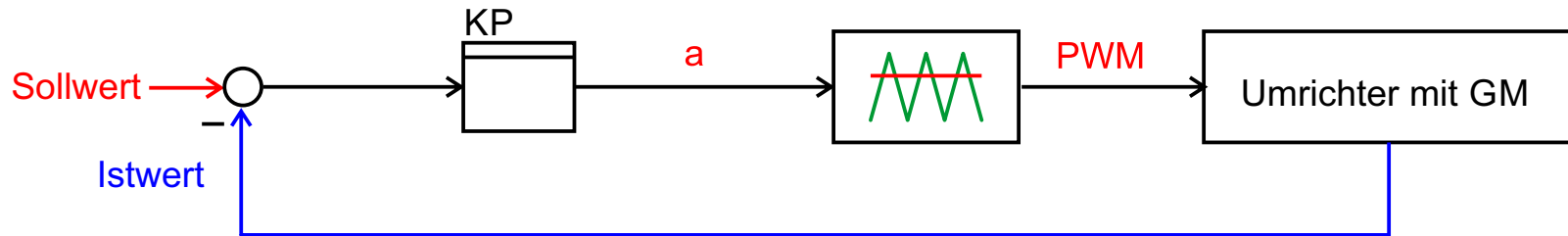


Drehzahl [Upm]

Hochlauf mit $M_L = 0$

5.4 Stromregelkreis

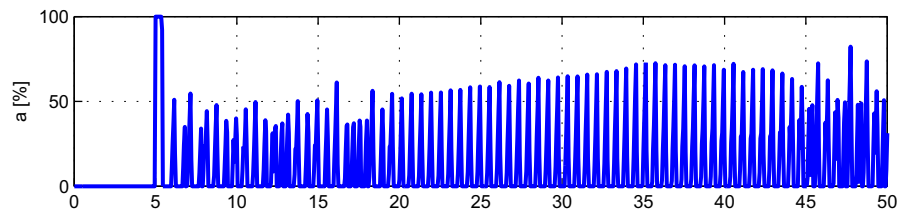
Schritt 3: P-Regelung, Test: KP um Faktor 10 erhöht



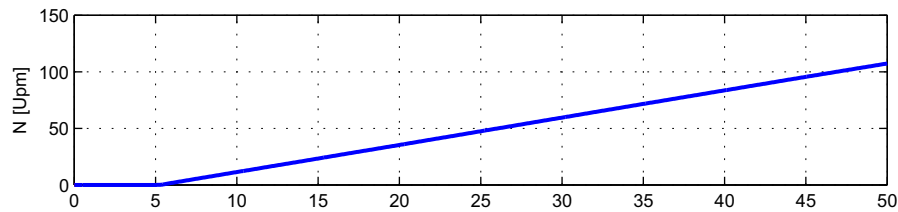
Ankerstrom [A]

rot: Sollwert

blau: Istwert



Aussteuerung [%]

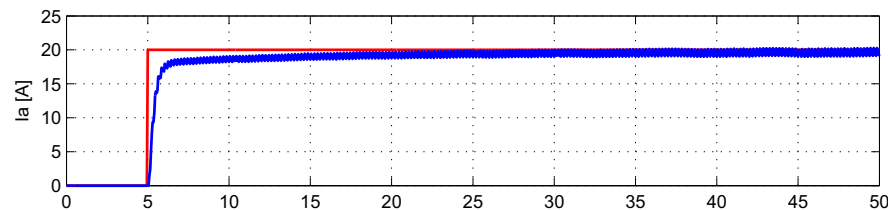
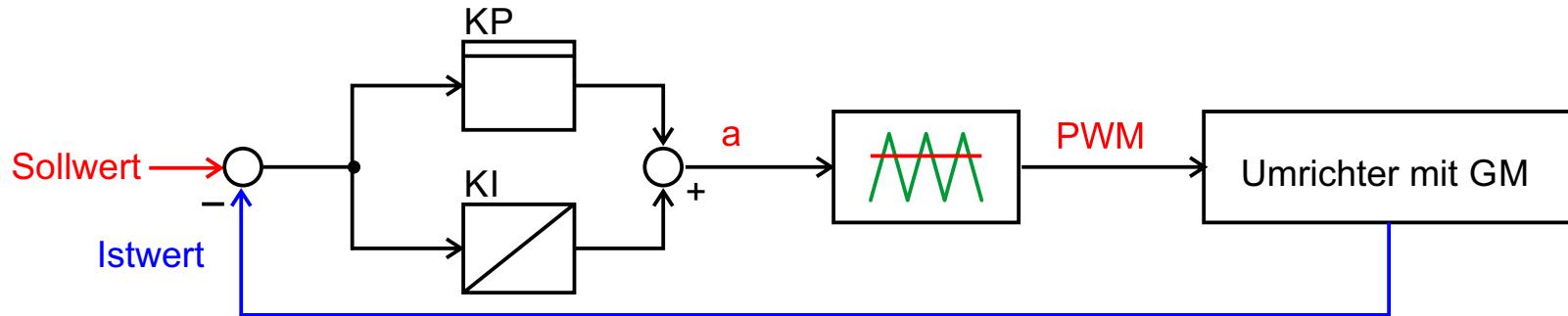


Drehzahl [Upm]

Hochlauf mit $M_L = 0$

5.4 Stromregelkreis

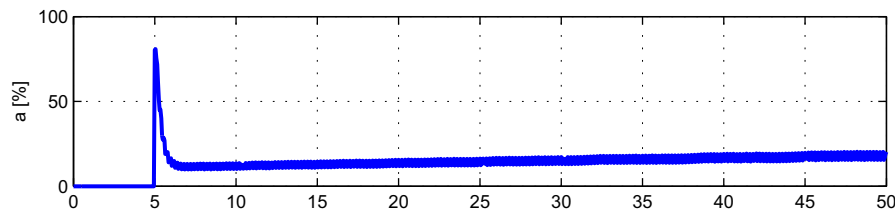
Schritt 4: PI-Regelung, KP wie in Versuch 2, KI sehr klein



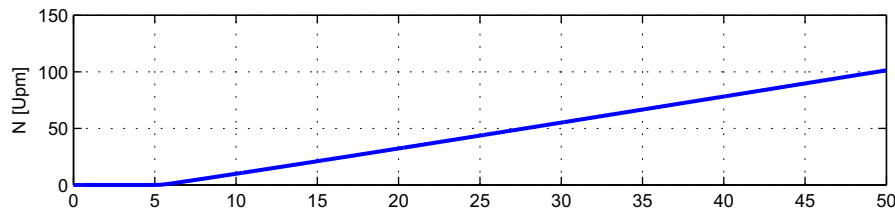
Ankerstrom [A]

rot: Sollwert

blau: Istwert



Aussteuerung [%]

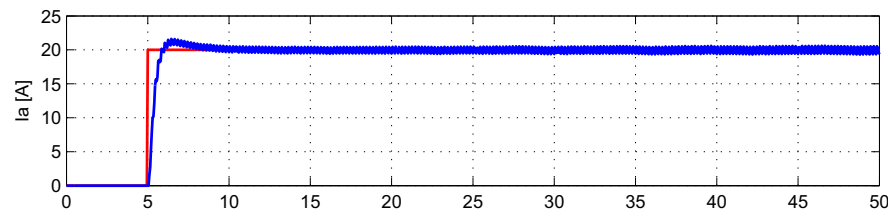
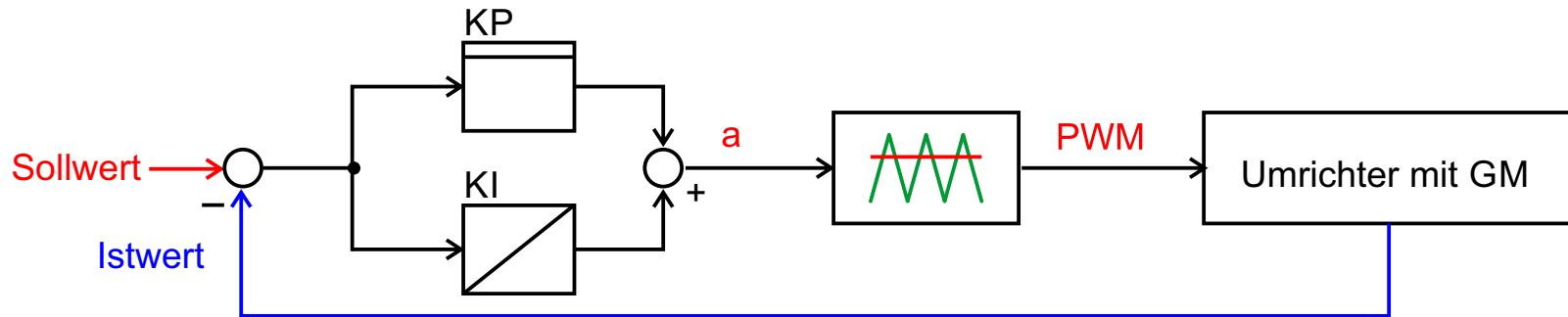


Drehzahl [Upm]

Hochlauf mit $M_L = 0$

5.4 Stromregelkreis

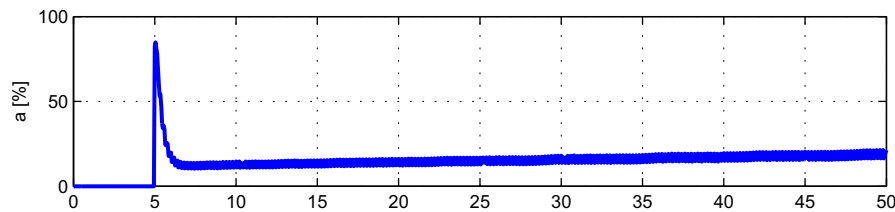
Schritt 5: PI-Regelung, KP unverändert, KI angehoben



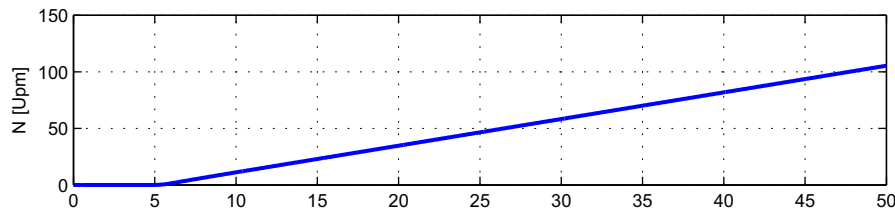
Ankerstrom [A]

rot: Sollwert

blau: Istwert



Aussteuerung [%]

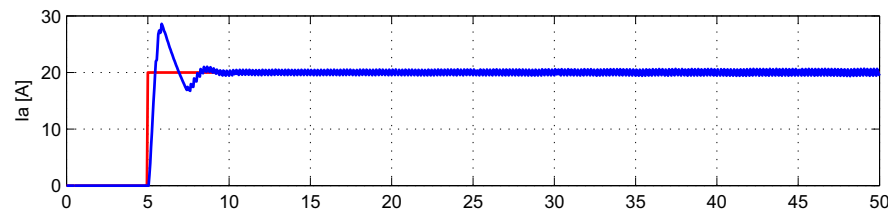
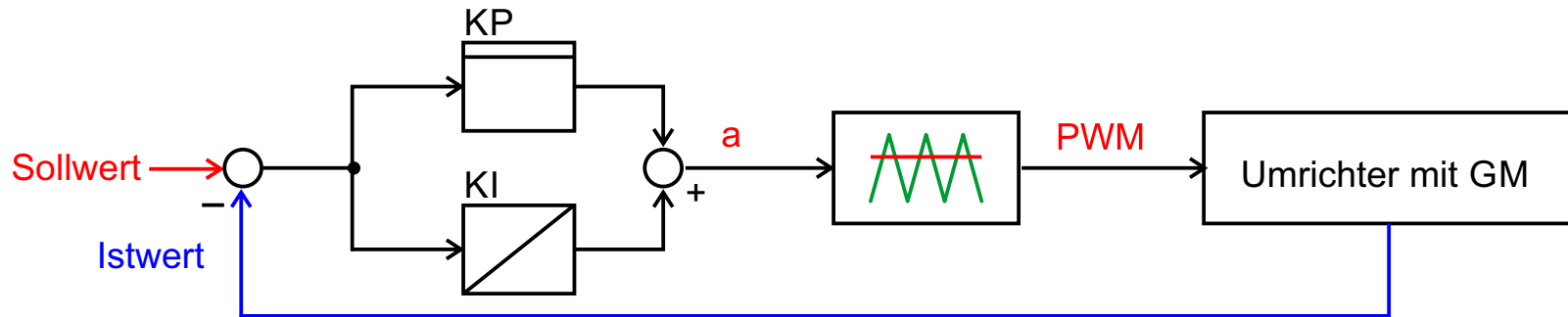


Drehzahl [Upm]

Hochlauf mit $M_L = 0$

5.4 Stromregelkreis

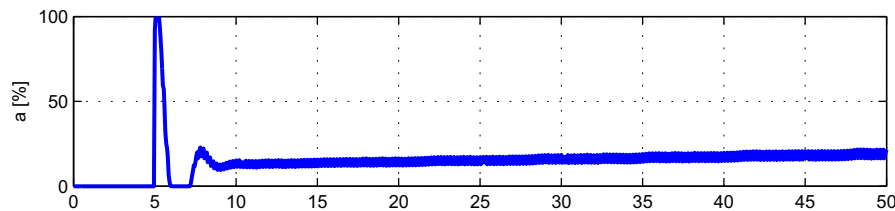
Schritt 6: PI-Regelung, Test: KI weiter angehoben



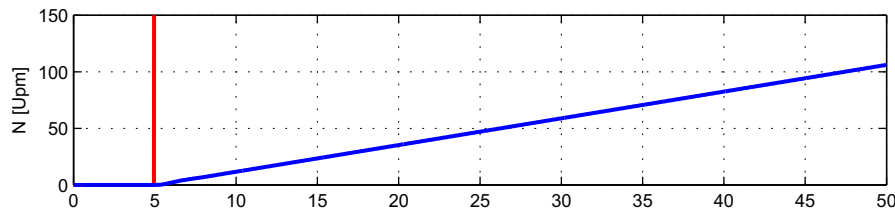
Ankerstrom [A]

rot: Sollwert

blau: Istwert



Aussteuerung [%]

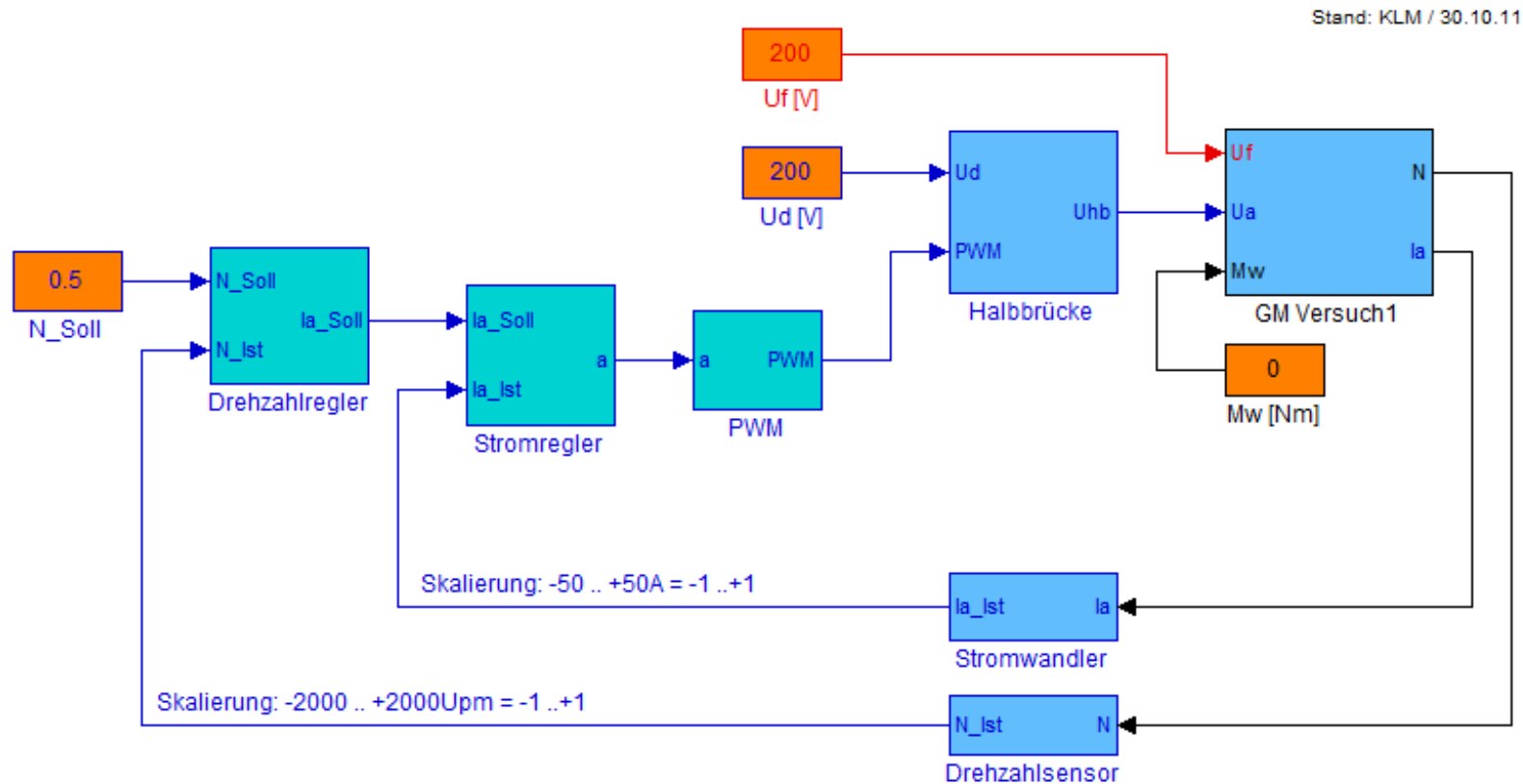


Drehzahl [Upm]

Hochlauf mit $M_L = 0$

5.5 Drehzahlregelkreis

Kaskadenregelung: Drehzahlregelkreis mit unterlagertem Stromregler

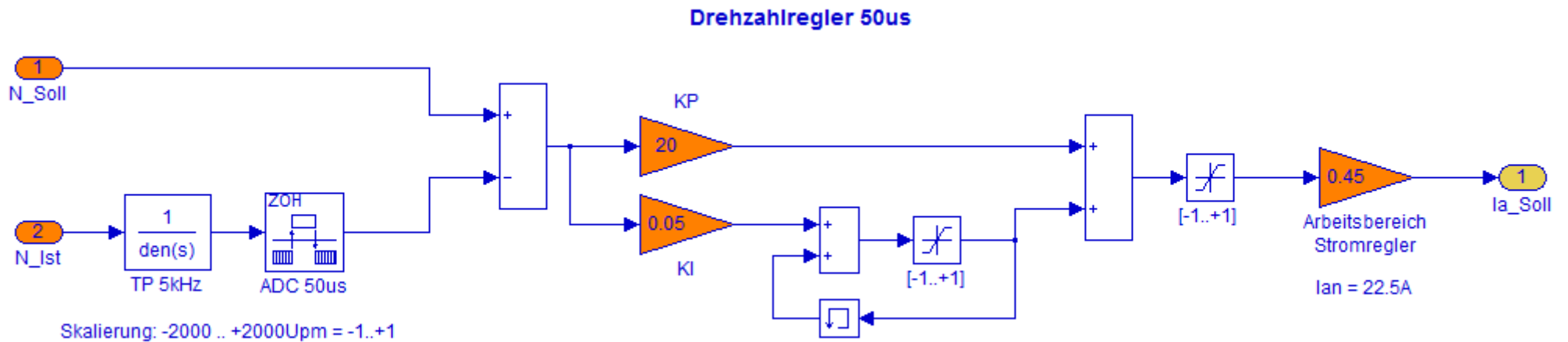


Simulationstool: Matlab/Simulink – Modell: A. Kleimaier

5.5 Drehzahlregelkreis

Umsetzung in Simulink

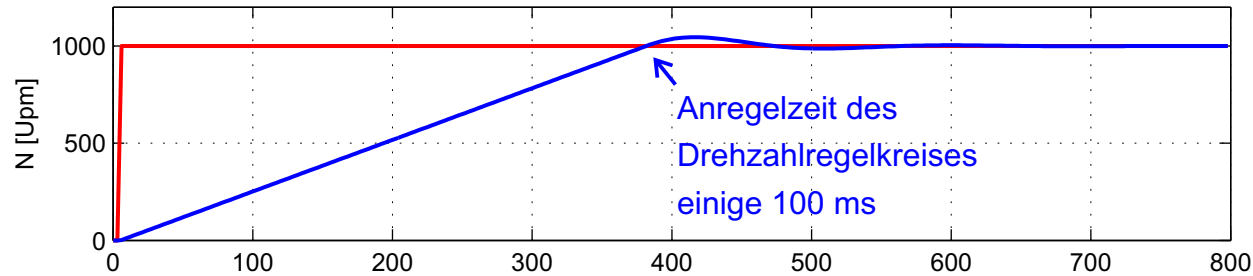
Drehzahlregler



Simulationstool: Matlab/Simulink – Modell: A. Kleimaier

5.5 Drehzahlregelkreis

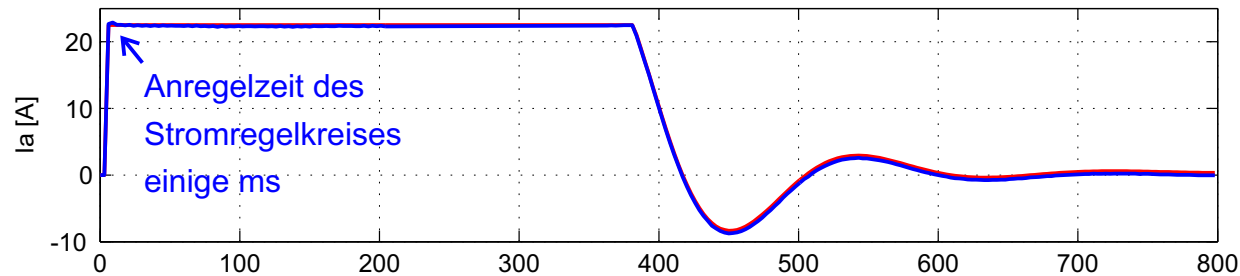
Simulation Gesamtsystem



Drehzahl [Upm]

rot: Sollwert

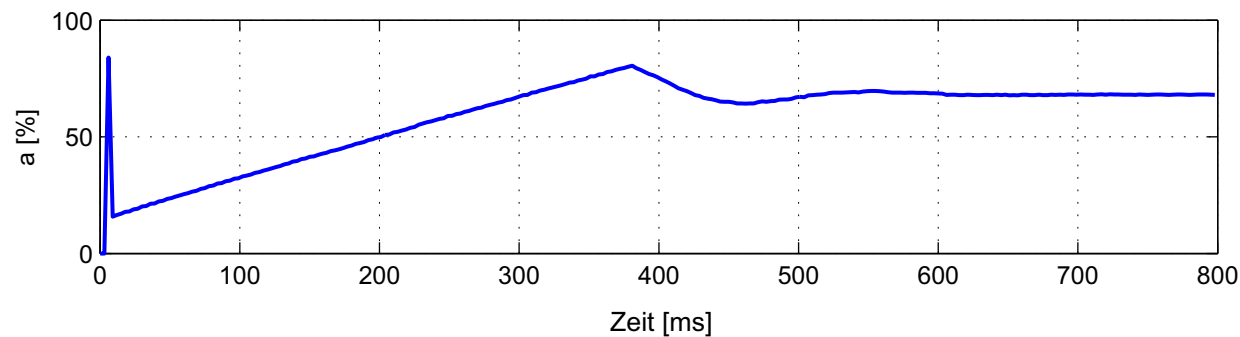
blau: Istwert



Ankerstrom [A]

rot: Sollwert

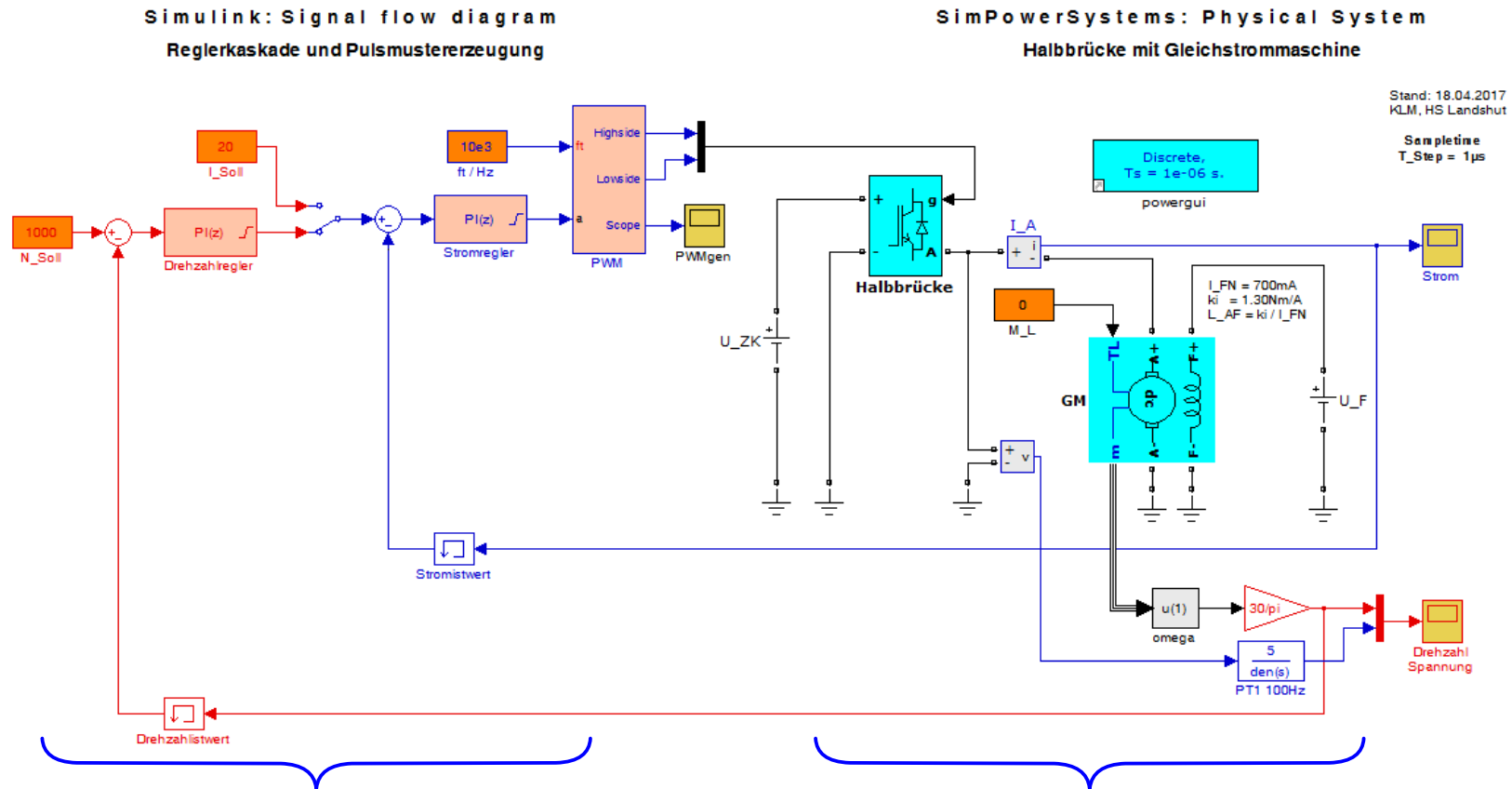
blau: Istwert



Aussteuerung [%]

5.6 Simulations- und Entwicklungstools

Objektorientierte Modellierung: Matlab/Simulink + Simscape Power Systems (Toolbox)



Regelung

- Signalflussplandarstellung in Simulink
- PID-Regler als fertige Blöcke aus Bibliothek

Strecke

- vorgefertigte Blöcke aus Bibliothek / Toolbox
- Systemgleichungen werden durch SW erzeugt
- hier: SimPowerSystems – Alternativen: Dymola, Plecs

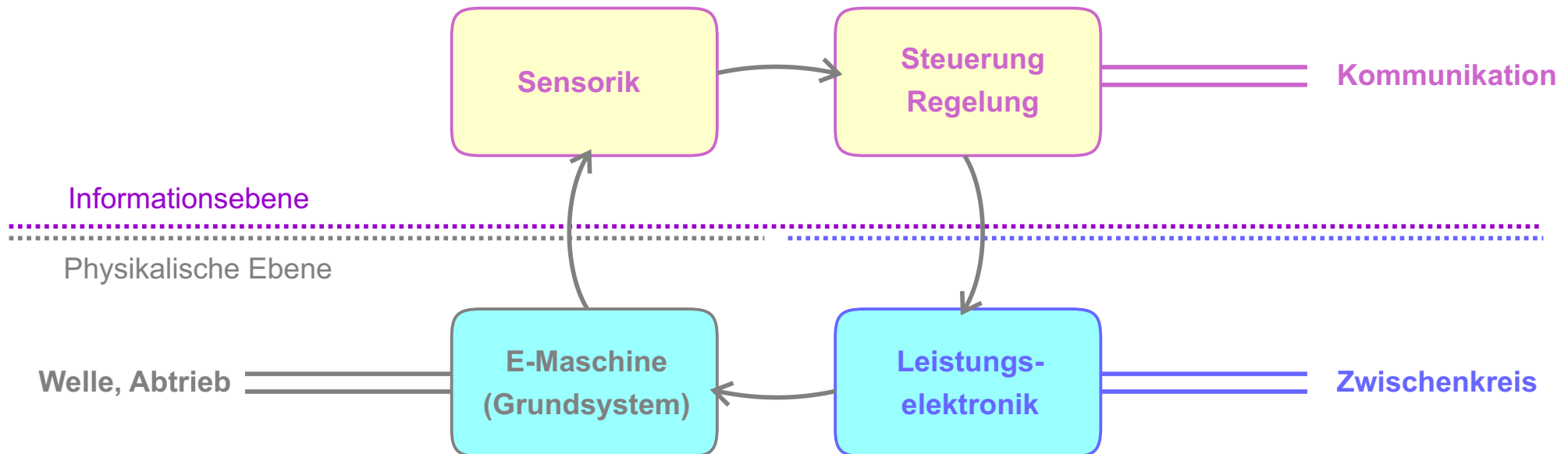
5.6 Simulations- und Entwicklungstools

• Berechnungen und Gesamtsystemsimulation:

- Skriptsprachen: Matlab, Octave, Python, Scilab, Lua
- Graphische Oberfläche: Mathcad, Mathematica, Excel
- Signalfussplan: Matlab/Simulink + Toolboxen
- Physical: Dymola/Modelica, Scilab/Xcos, Simplorer, Plexim

• Reglerentwicklung und Systeminbetriebnahme

- Hardwarenah: Assembler; VHDL, Verilog (FPGA)
- Manuelle Codierung in C, ggf. mit Echtzeitbetriebssystem
- Autocodegeneration aus Signalfussplan
(z.B. Simulink + Tools der Hardwarehersteller; dSPACE)
- Monitoring: div. USB/RS232-Lösungen, CANape, etc.



• Magnetkreisauslegung: ANSYS Maxwell, COMSOL, FEMM

• Festigkeitsrechnung: Abaqus, ANSYS, Nastran

• Konstruktion: CATIA, Solid Works, Autodesk Inventor

• Schaltungsentwicklung: Spice, LTspice, ANSYS Simplorer

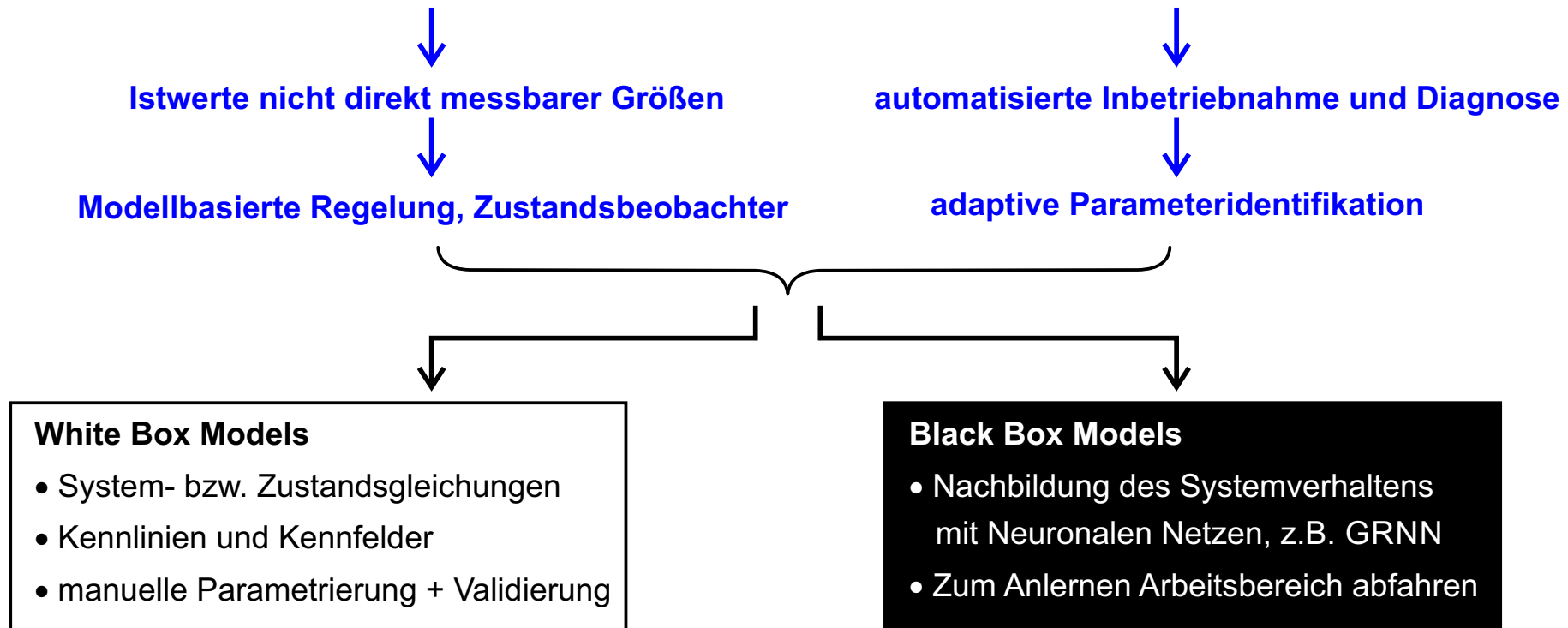
• Schaltungslayout: Eagle, Protel/Altium, Mentor

• Entwärmung, Stromverteilung: ANSYS Maxwell, FEMM

5.7 "künstliche Intelligenz"

Komplexe Regelaufgaben in der EAT

- sensorlose Regelung von Maschinen, prädiktive Stromregelverfahren
- verkoppelte Mehrgrößenregelungen in der Automatisierung / Fertigung
- unangenehme Strecken: Lose, Zweimassenschwinger, Nichtlinearitäten



Simulationsmodelle müssen an Testaufbauten aufwändig manuell validiert und parametrierung werden!



Automatisierung von Modellbildung und Parametrierung durch Abfahren des gesamten Arbeitsbereichs am Prüfstand. Ingenieur/Informatiker ist ggf. "KI-Spezialist" ohne Systemverständnis!