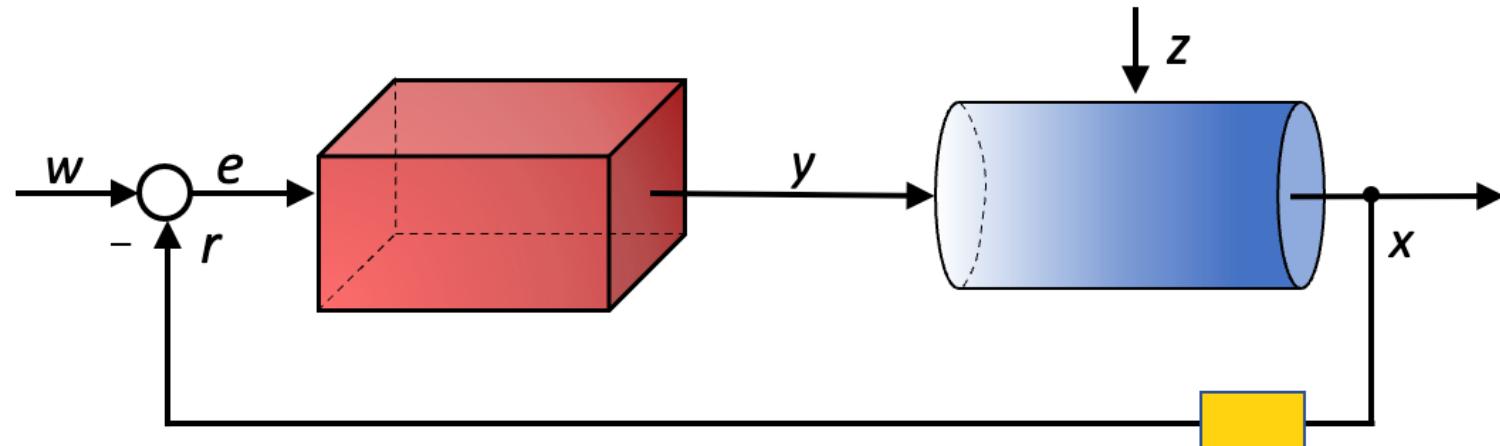


Vorlesung Regelungstechnik

10 Digitale Regelungen



Inhaltsverzeichnis

1. Motivation
2. Digitale Regelungen
 - 1.1 Digitaler Regler
 - 1.2 Zeitdiskrete Systembeschreibung von Regelkreise
 - 1.3 Die z-Transformation
3. Digitale Regler in Simulink
 - 2.1 Kontinuierlich vs. Diskret
 - 2.2 Einstellung eines digitalen Regler

Lernziele

Nach dieser Lektion können Sie...

1. Regelkreis eines PT2-Systems in Simulink entwerfen, modellieren und optimieren
2. Eine mathematische Beschreibung für Abtastung der Regelgröße oder der Regeldifferenz aufstellen und für den Entwurf eines Reglers verwenden
3. Zeitdiskrete Regelsysteme in Simulink simulieren und modellieren und / oder entwerfen

Motivation – Was ist der Elchtest?



Dieses Mercedes-Modell scheiterte am Elchtest – und löste gewaltige Wellen aus.

20 Jahre nach dem Skandal

Als ein Elch den Auto-Giganten ins Wanken brachte

Vor 20 Jahren blamierte sich Mercedes-Benz, als das neue Modell am «Elchtest» scheiterte. Eine Lektion für die gesamte Autoindustrie – in der Technik und in der Kommunikation.

Quelle SRF 2017

Regelungstechnik

Prof. Dr. Edwin Kamau
Institut für Fahrzeugtechnik



Elche, die den Elchtest nicht bestanden haben, müssen von der Teilnahme am öffentlichen Straßenverkehr ausgeschlossen werden.

© Joachim Czichos, www.joachim-czichos.de

Motivation – was hat der Elchtest mit RT zu tun?



FAHRSICHERHEIT BEIM DOPPELTEL SPURWECHSEL

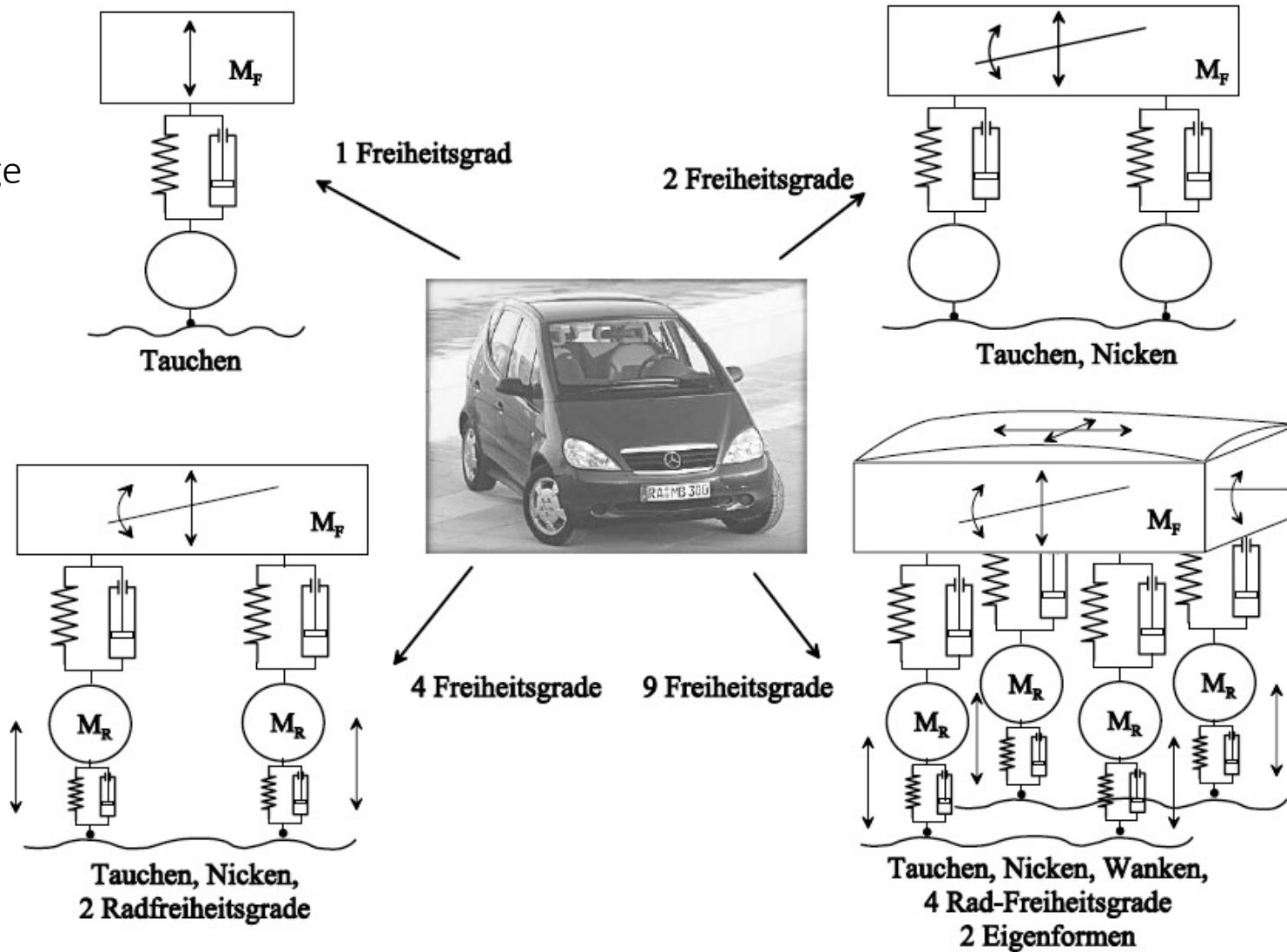
Warum der Elchtest gekippt wird

Die A-Klasse machte das Fahrmanöver einst weltberühmt. Jetzt gibt es bessere und der Elchtest gehört in Rente. Wir erklären, warum.

Quelle Auto Motor Sport 2020

Motivation – Beeinflussung der Feder-Dämpfercharakteristik

- Modellvarianten für Fahrzeuge



Motivation – Beeinflussung der Feder-Dämpfercharakteristik

- Passive Feder-Dämpfersysteme haben **weitgehend** ihren Entwicklungsstand erreicht.
- Eine zusätzliche Verbesserung der Fahrsicherheit und des Fahrkomforts verlangt nach einer **aktiven** Beeinflussung der Feder-Dämpfercharakteristik **in Abhängigkeit des aktuellen Fahrzustands eines Fahrzeugs.**

Zielsetzung:

1. zusätzliche Verbesserung der Fahrsicherheit und des Fahrkomforts
2. Federungskomfort dem Marksegment der jeweiligen Modellreihe anpassen
3. Realisierung von autonomen Fahrfunktionen

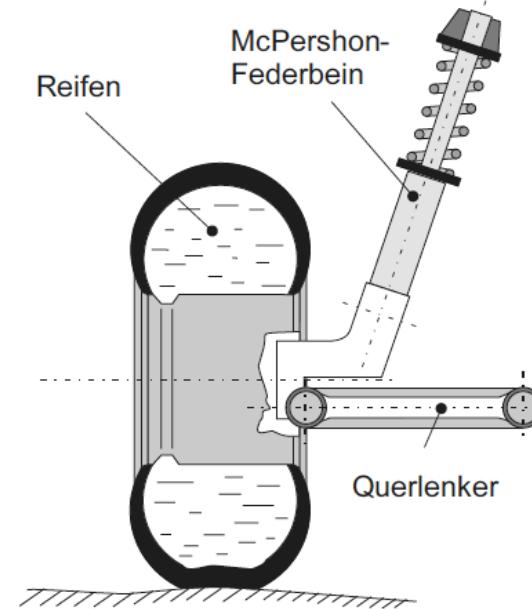
Motivation – Beeinflussung der Feder-Dämpfercharakteristik



Dämpfer-Massesystem

So einfach ein Dämpfer-Massesystem auch aussieht, so wenig lässt sich der Wirkplan direkt ableiten. Hier behilft man sich mit der mathematischen Struktur der Bewegungsgesetze

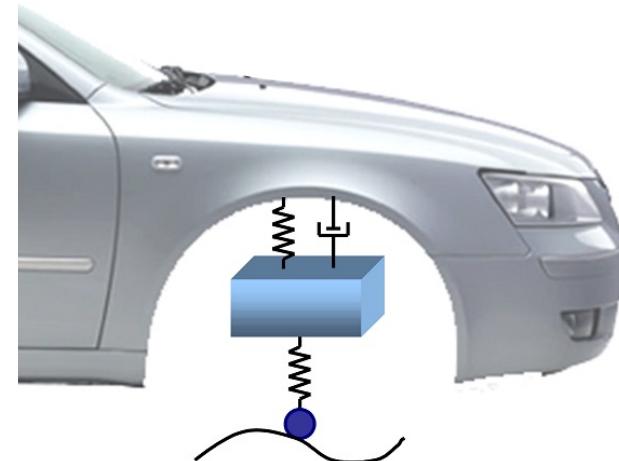
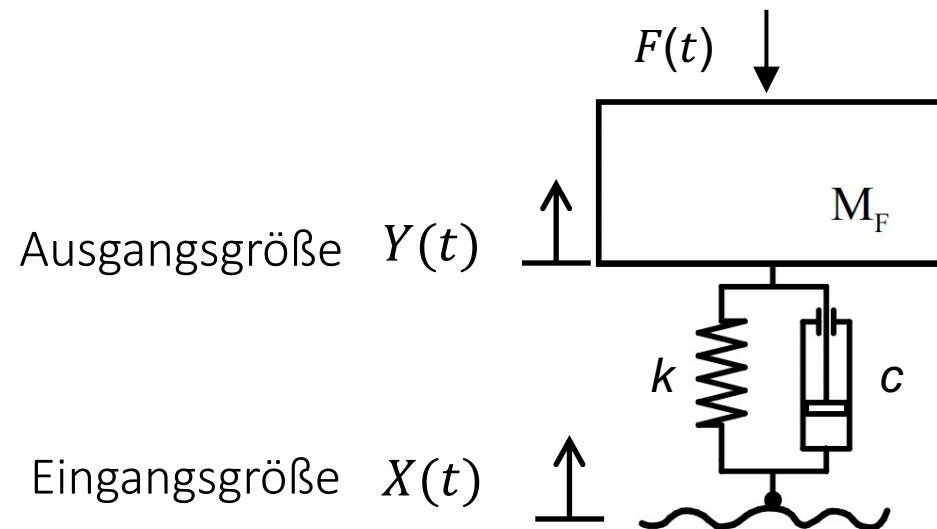
- Das Federbein setzt sich aus einer Feder und einem Dämpfer zusammen.
- Der Reifen wird durch die Parallelschaltung einer Feder und eines Dämpfungselements modelliert.
- Neben der Fahrzeugmasse wird die Radmasse gesondert ausgewiesen



Technologieschema der konventionellen Radaufhängung

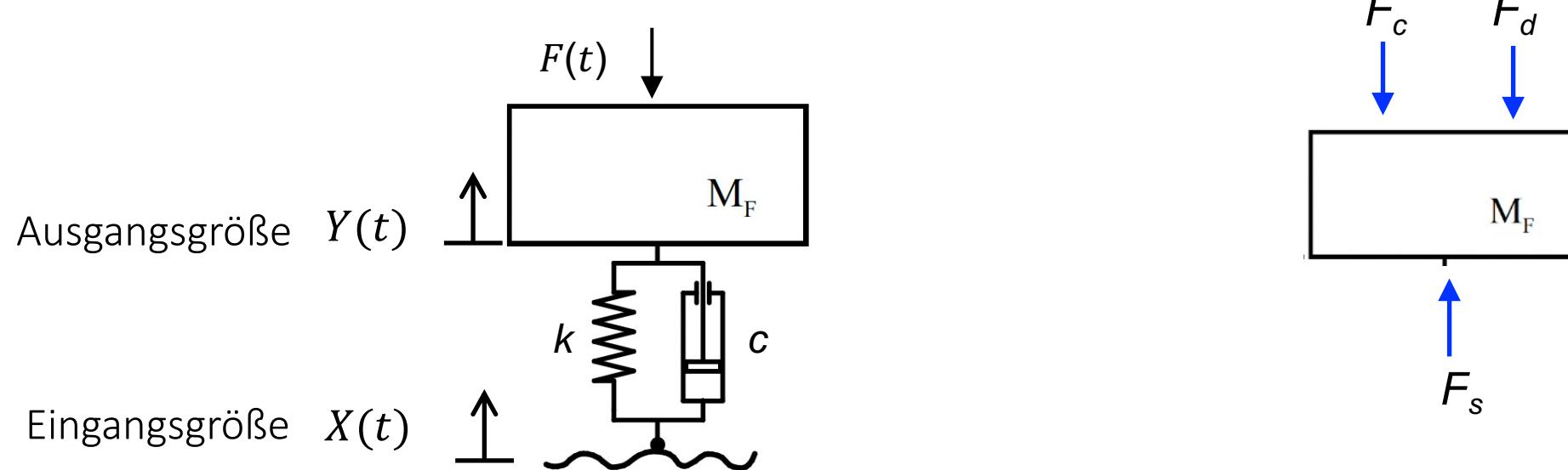
Ersatzsystem: Viertelfahrzeug

- Unebenheit der Wegstrecke stellt die Eingangsgröße $x(t)$ in das System dar
- Als Ausgangsgröße $y(t)$ wirkt die Bewegung des Fahrgestells (Chassisbewegung)
- Für den Wirkplan vereinfachen wir das System durch die Vernachlässigung der Reifenfunktionalität.



Mathematische Beschreibung des Dämpfer-Massesystems

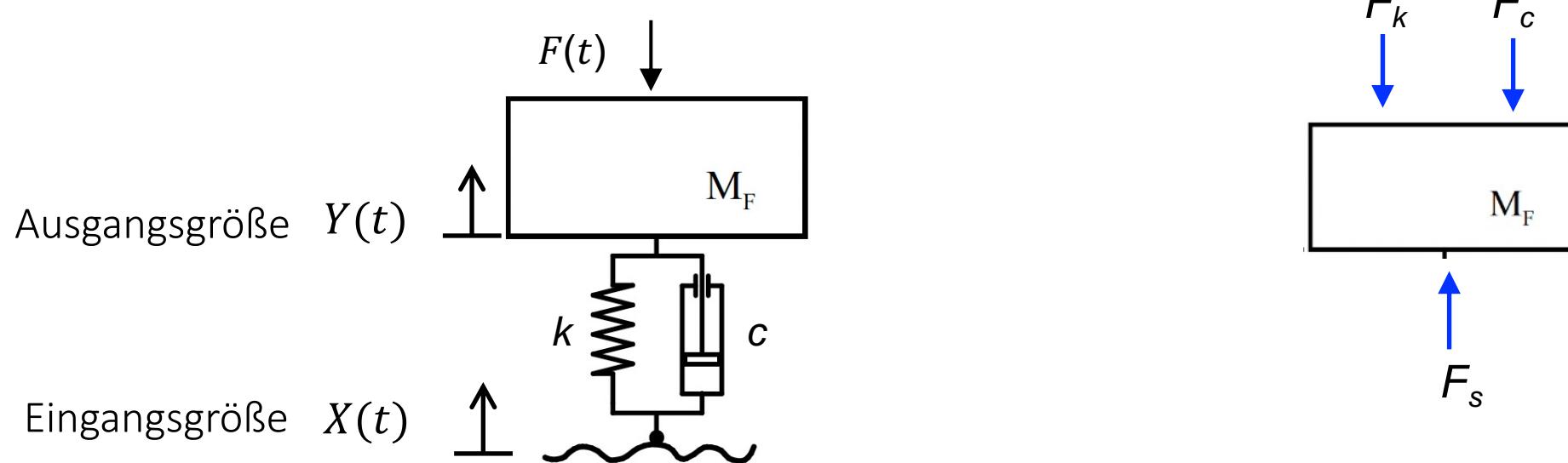
- Freikörperdiagramm?



Mathematische Beschreibung des Dämpfer-Massesystems

- Kräftegleichgewicht

$$\sum F = m\ddot{y} = F_s - F_k - F_c$$

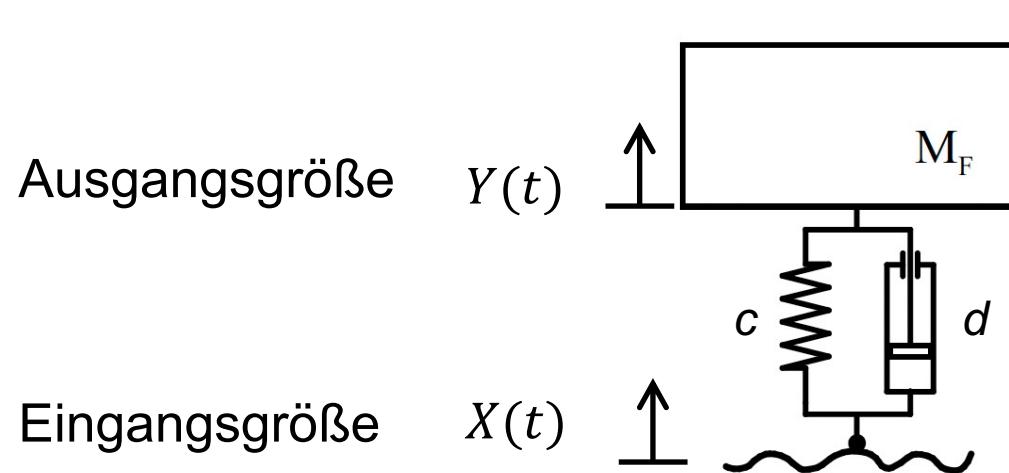


Mathematische Beschreibung des Dämpfer-Massesystems

- Kräftegleichgewicht

$$\sum F_y = m\ddot{y} = F_s - F_c - F_k$$

$$m\ddot{y} + F_c + F_k = F_s$$



$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_s$$

Mathematische Beschreibung des Dämpfer-Massesystems

- Kräftegleichgewicht

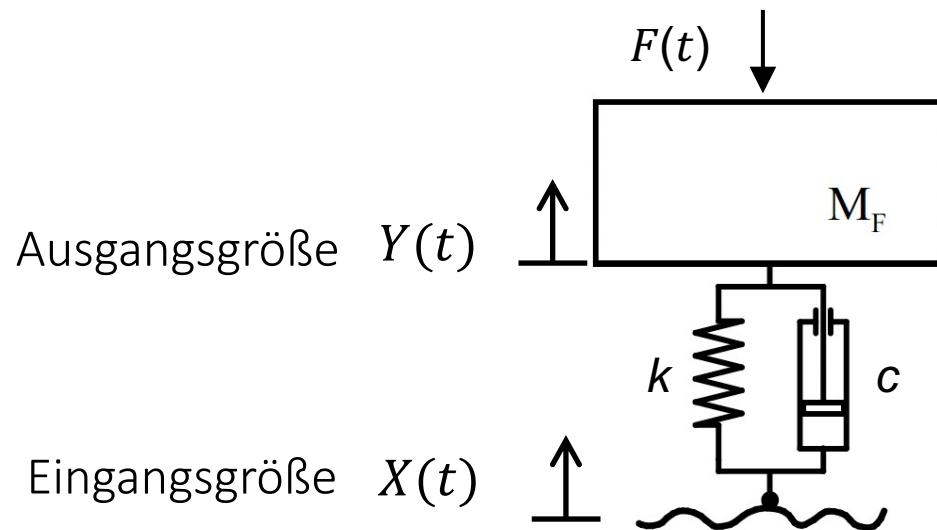
$$\sum F_y = m\ddot{y} = F_s - F_c - F_k$$

$$m\ddot{y} + F_c + F_k = F_s$$

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_s$$

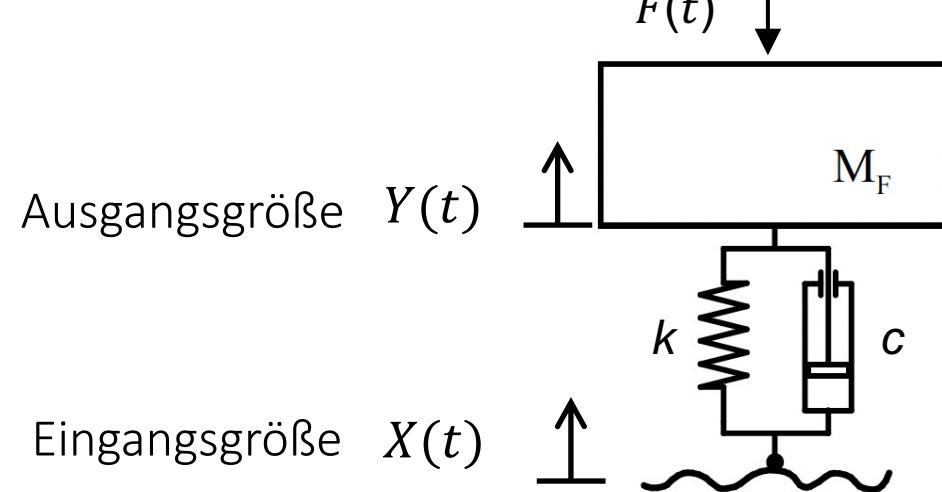
$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = c\dot{x} + kx$$

$$\ddot{y} = \frac{1}{m}((c\dot{x} + kx) - c\dot{y} - ky)$$



Mathematische Beschreibung des Dämpfer-Massesystems

- Kräftegleichgewicht



$$\ddot{y} = \frac{1}{m}((c\dot{x} + kx) - c\dot{y} - ky)$$

$$m = 100 \text{ kg}$$

$$c = 200 \text{ N.s/m}$$

$$k = 10000 \text{ N/m}$$

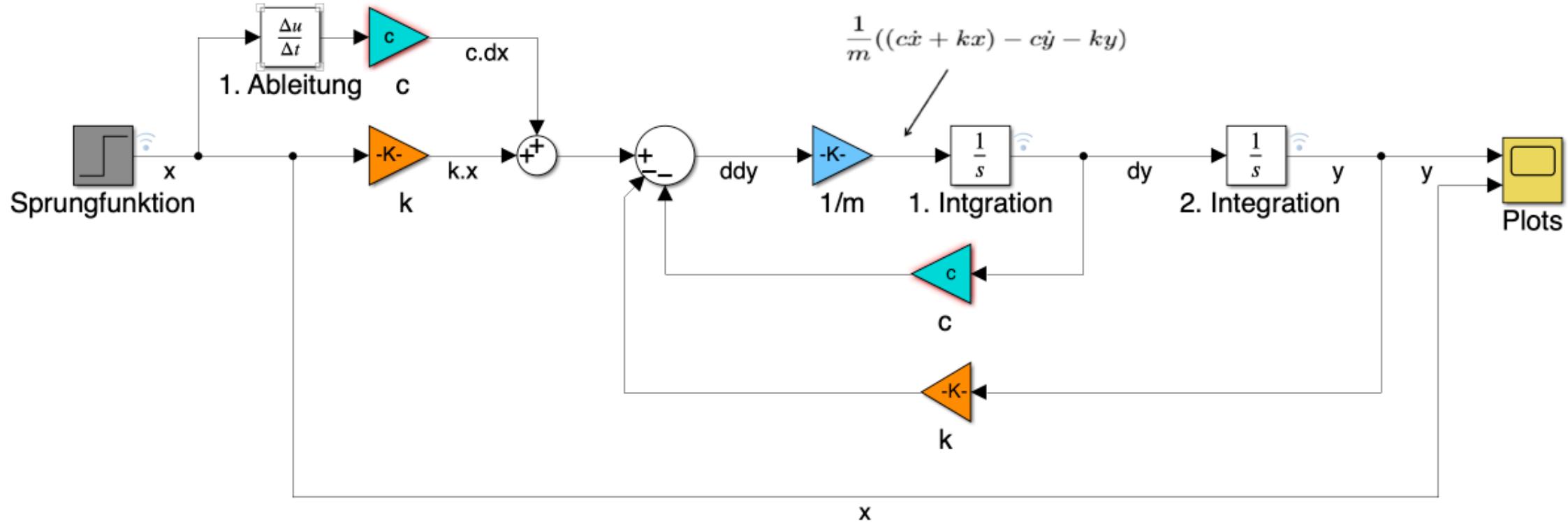
$$y = 0.1 \text{ m}$$

Beschreibung des Modells

- Das hier vorgestellte Modell stellt den **Einstieg** in weitere Fahrzeugmodelle dar.
- Es wird für **Abstimmungsuntersuchungen der Feder-Dämpfercharakteristik** bzgl. **Eigenfrequenzen** verwendet.
- Für Fahrkomfortuntersuchungen müssen weitere Freiheitsgrade einbezogen werden.

Erstellung des Wirkplans im Zeitbereich in Simulink

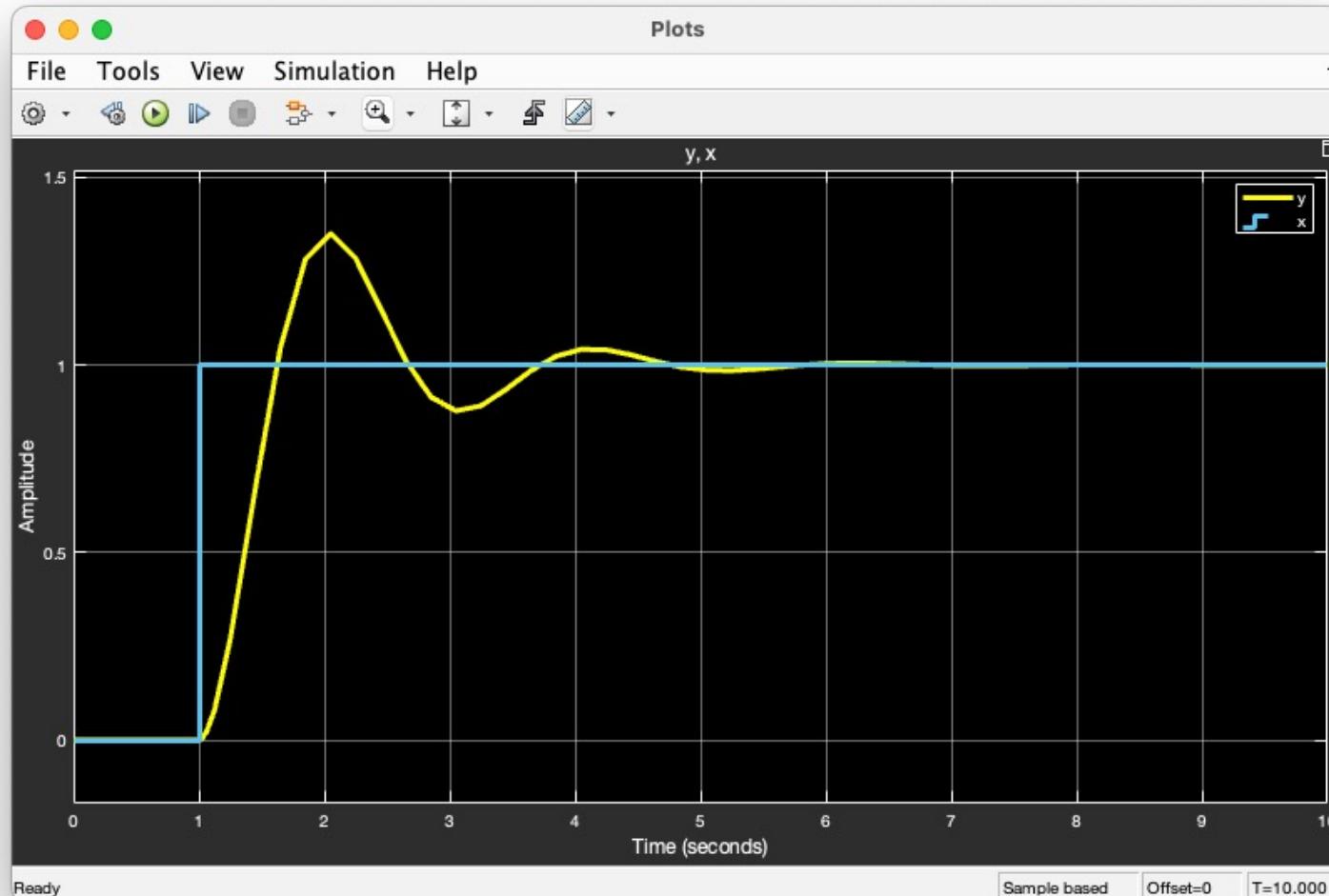
$$\ddot{y} = \frac{1}{m}((c\dot{x} + kx) - c\dot{y} - ky)$$



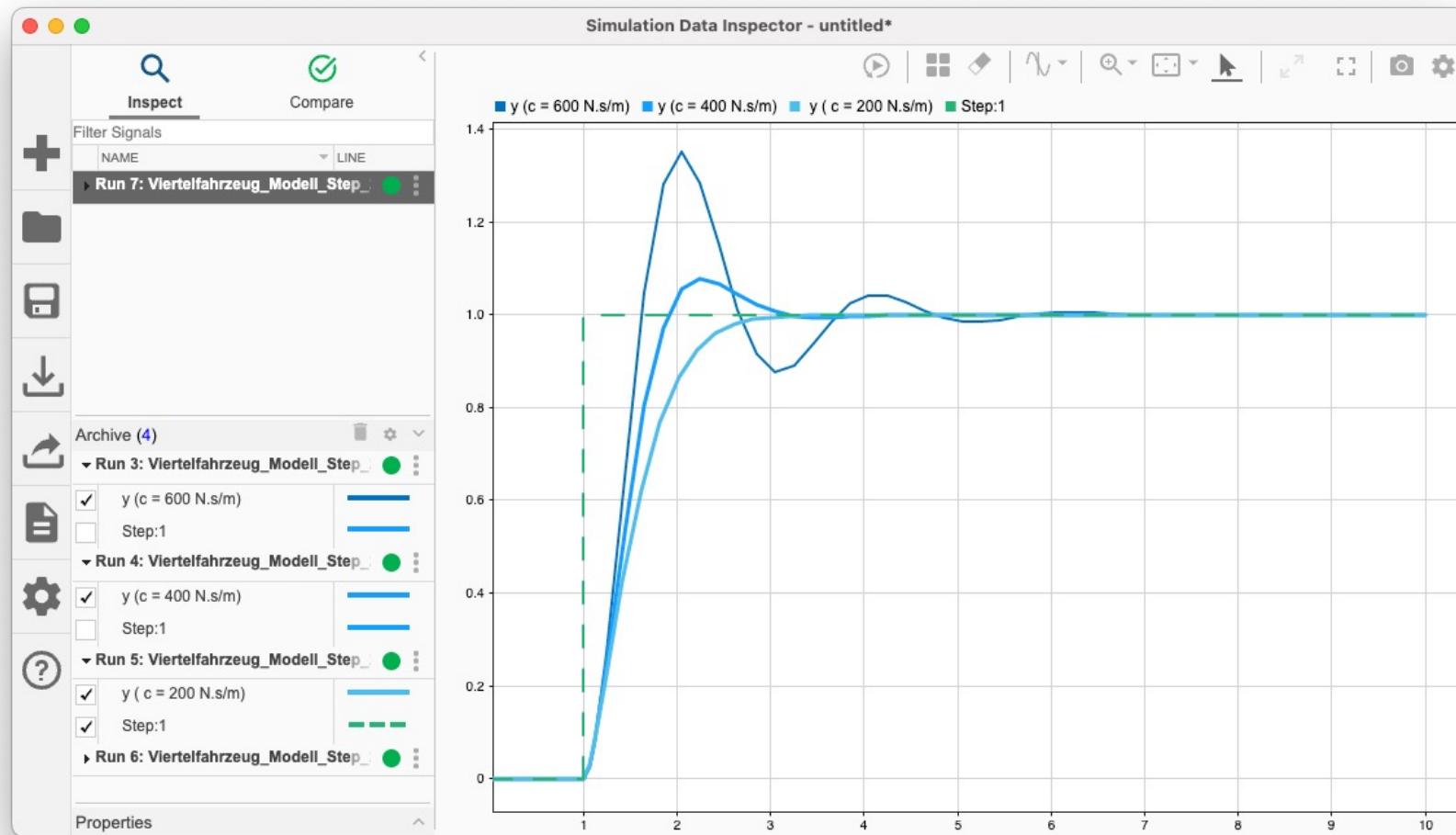
Beschreibung des Wirkplans

- Die Kräftebilanz drückt sich als Summationsstelle aus.
- Die mechanischen Bewegungsgesetze verlangen **Zeitableitungen**, welche als Integrationskette von der Ausgangsgröße her **rückwärts im Plan** eingetragen werden.
- Die Eingangswirkung des Dämpfers verlangt die zeitliche Differenzierung von Ein- und Ausgangssignal.

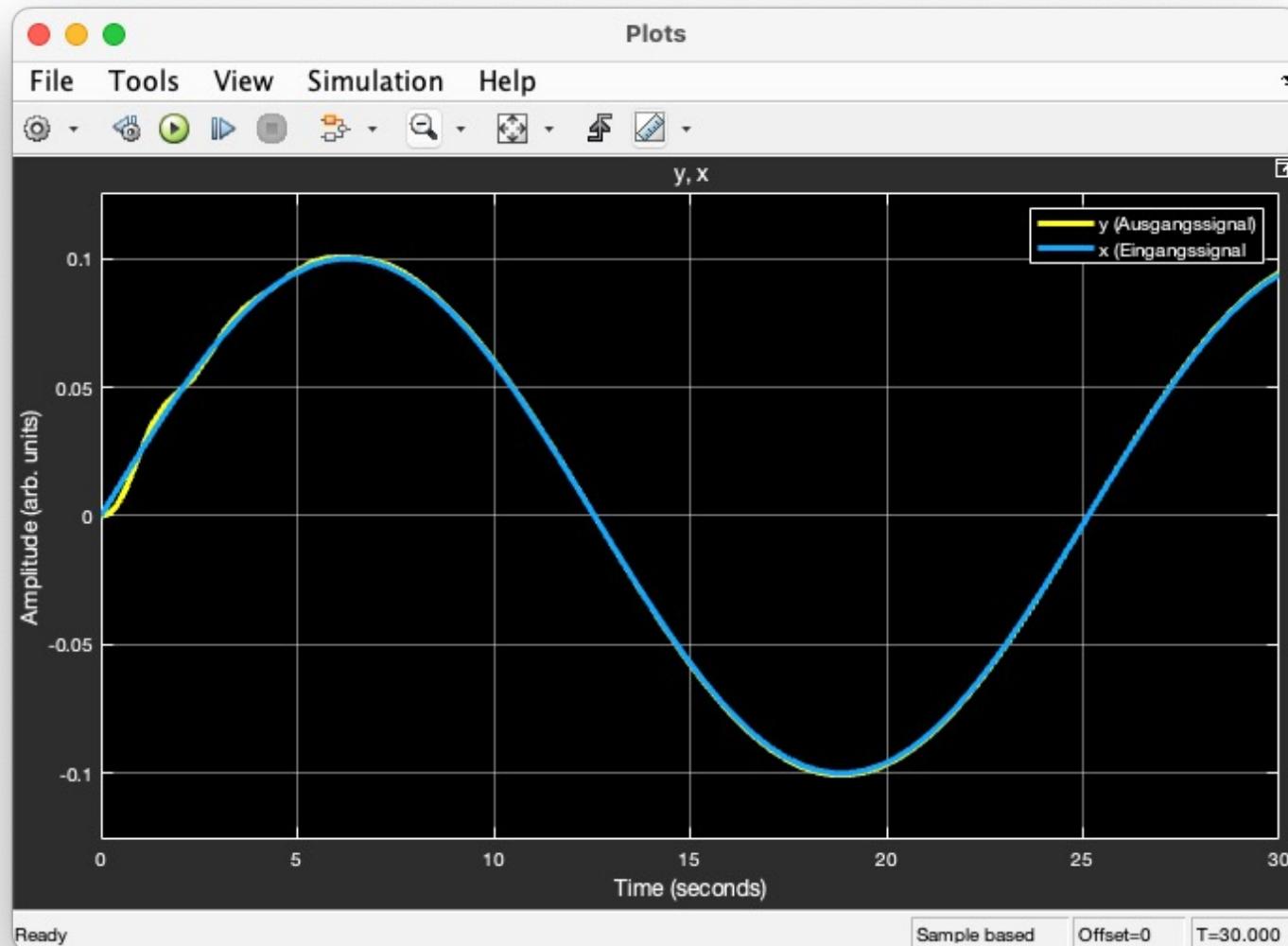
Sprungantwort des Dämpfer-Massesystems



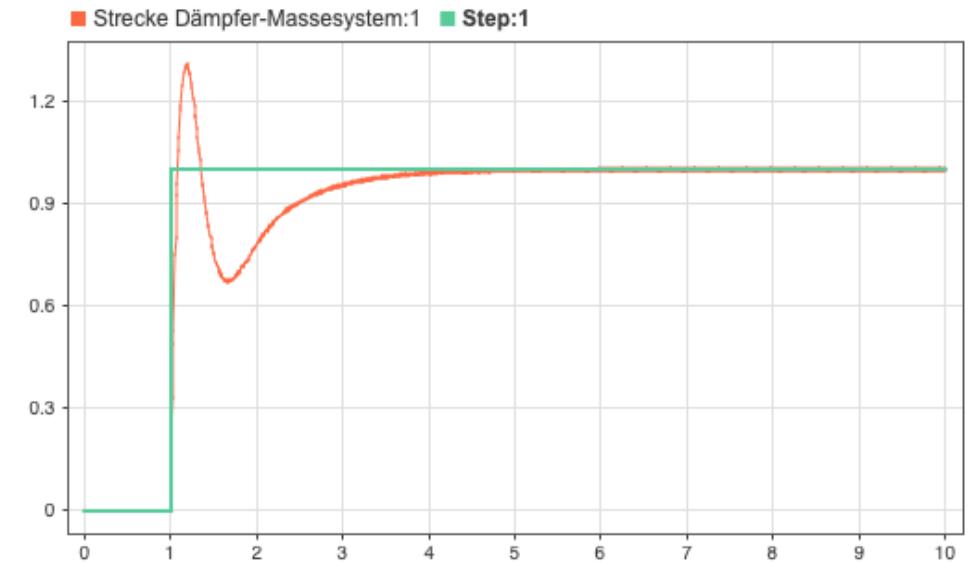
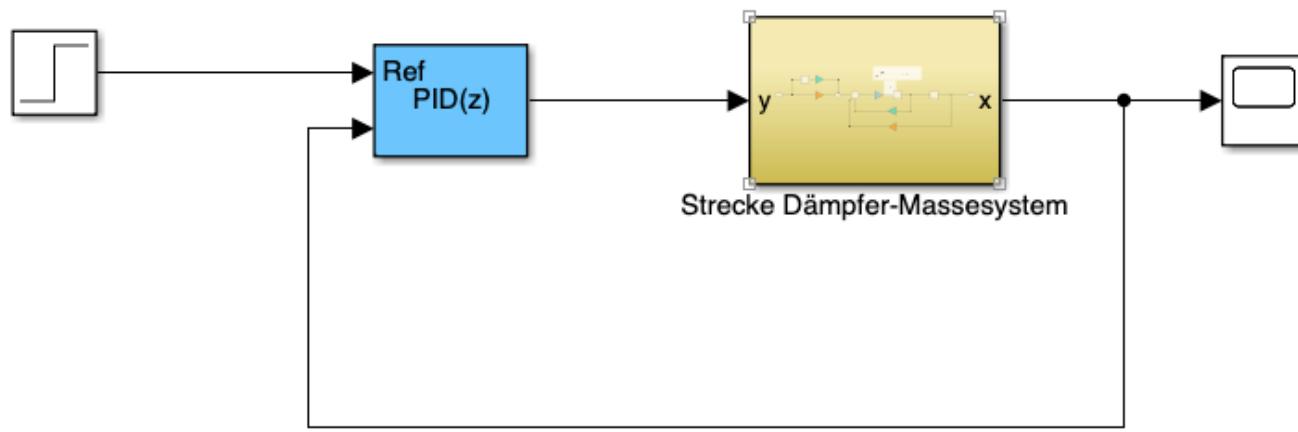
Sprungantwort des Dämpfer-Massesystems (Verschiedene Dämpfungen)



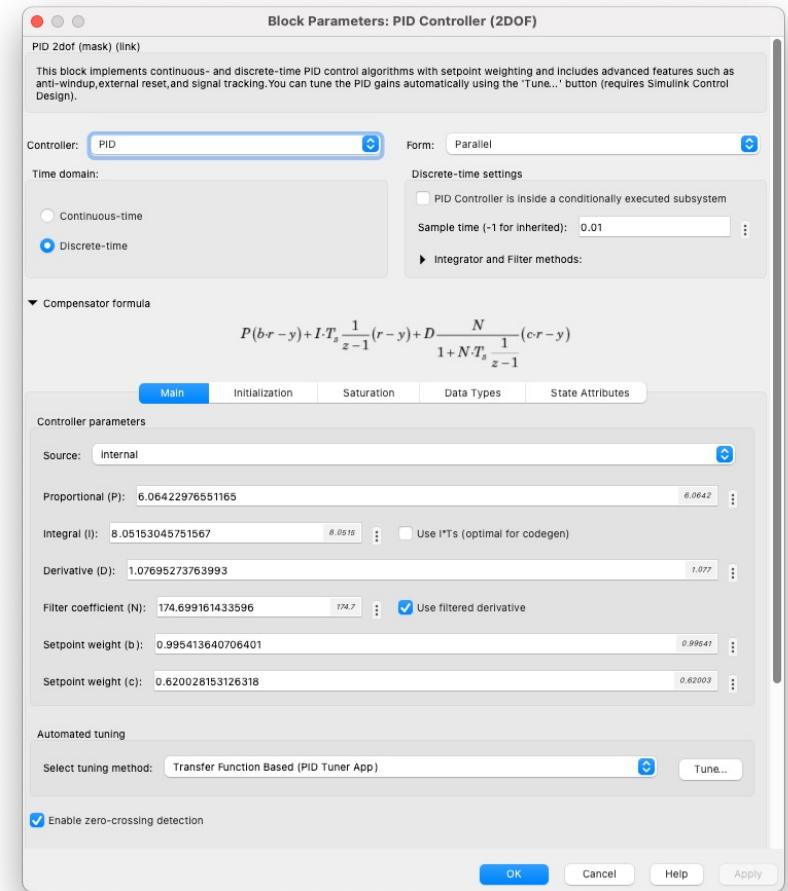
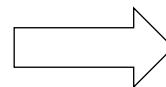
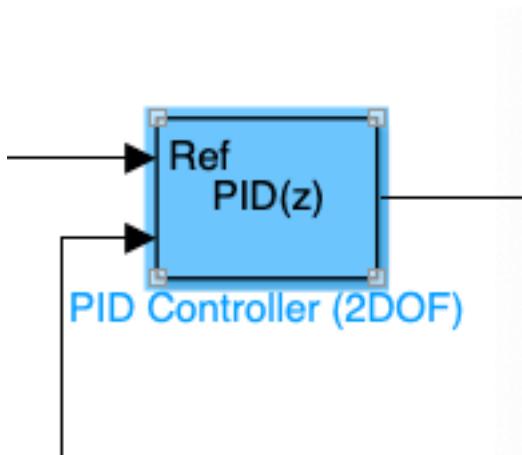
Sinusförmige Test Funktion- unebene Fahrbahn



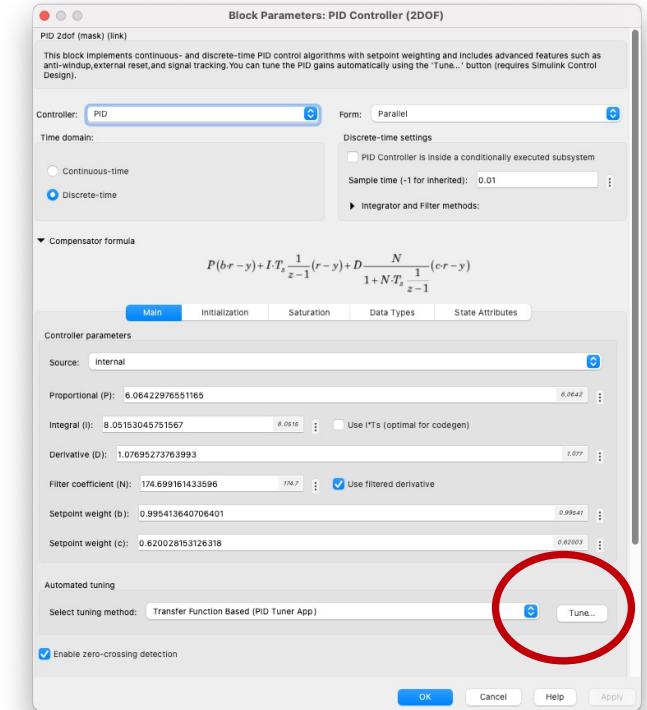
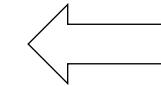
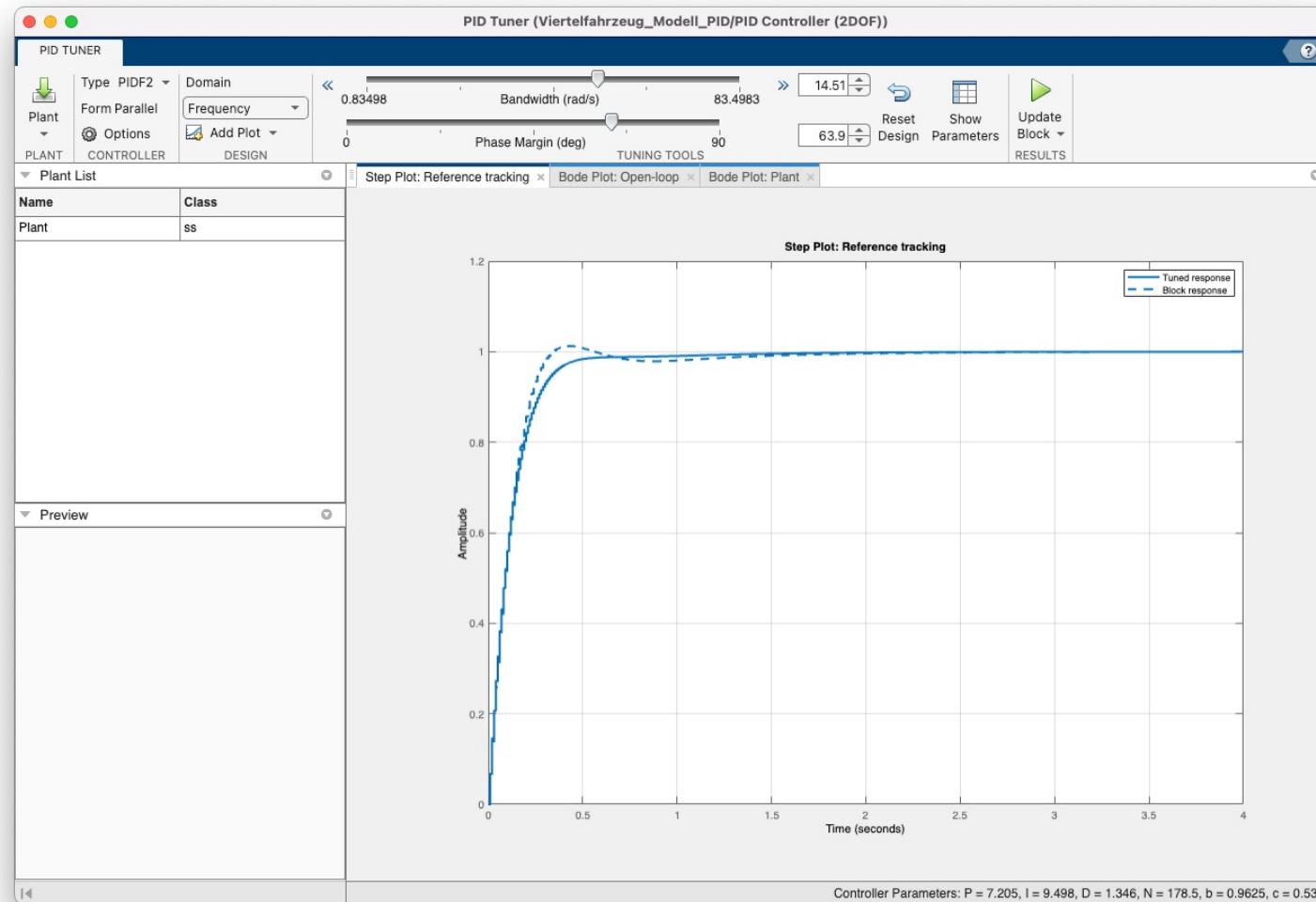
Erstellung des Wirkplans in Simulink



Abstimmung des Reglers mithilfe des PID Tools

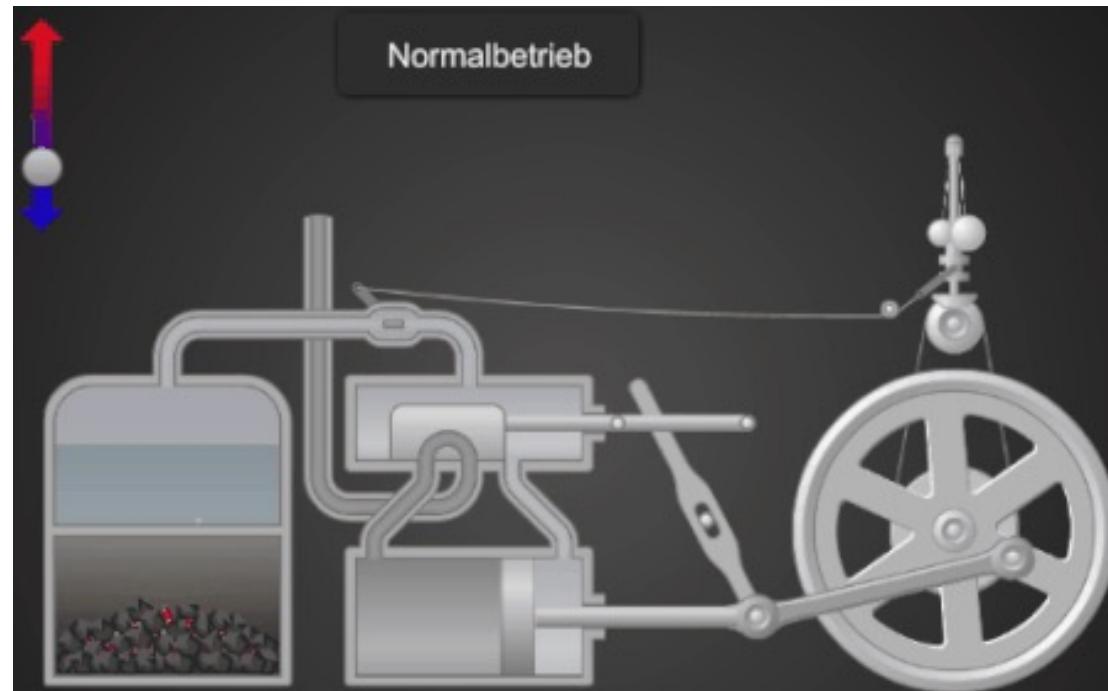


Optimierung des Reglers mithilfe des PID Tuners



Digitale Implementierung von Reglern

- Bisher - alle Komponenten des Regelkreises in der zeitkontinuierlichen Form behandelt



Digitale Implementierung von Reglern

- In der Industrie werden überwiegend digitale Regler eingesetzt
- Hardware-Plattform für einen digitalen Regler können:
 - ein Prozessrechner,
 - eine speicherprogrammierbare **Steuerung** (SPS),
 - ein PC oder
 - ein Micro Controller sein.

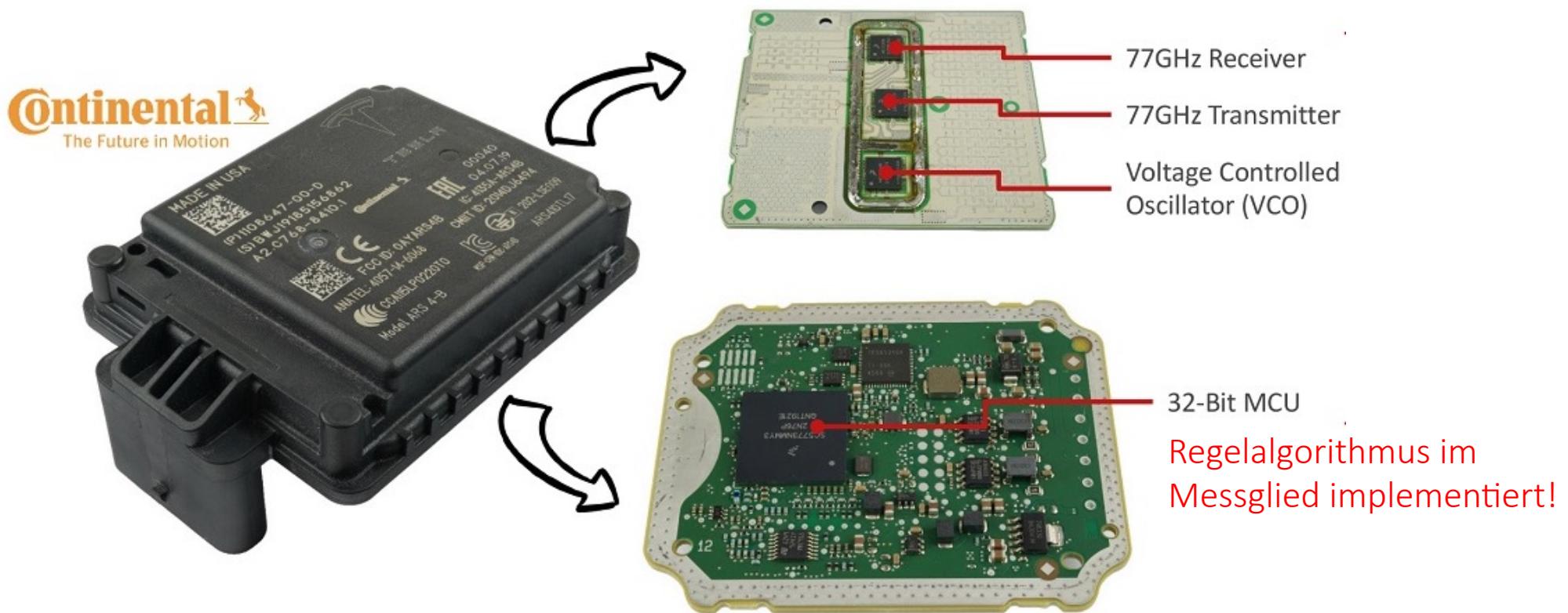


SPS-Steuerungsmodul
(Fa. Siemens)



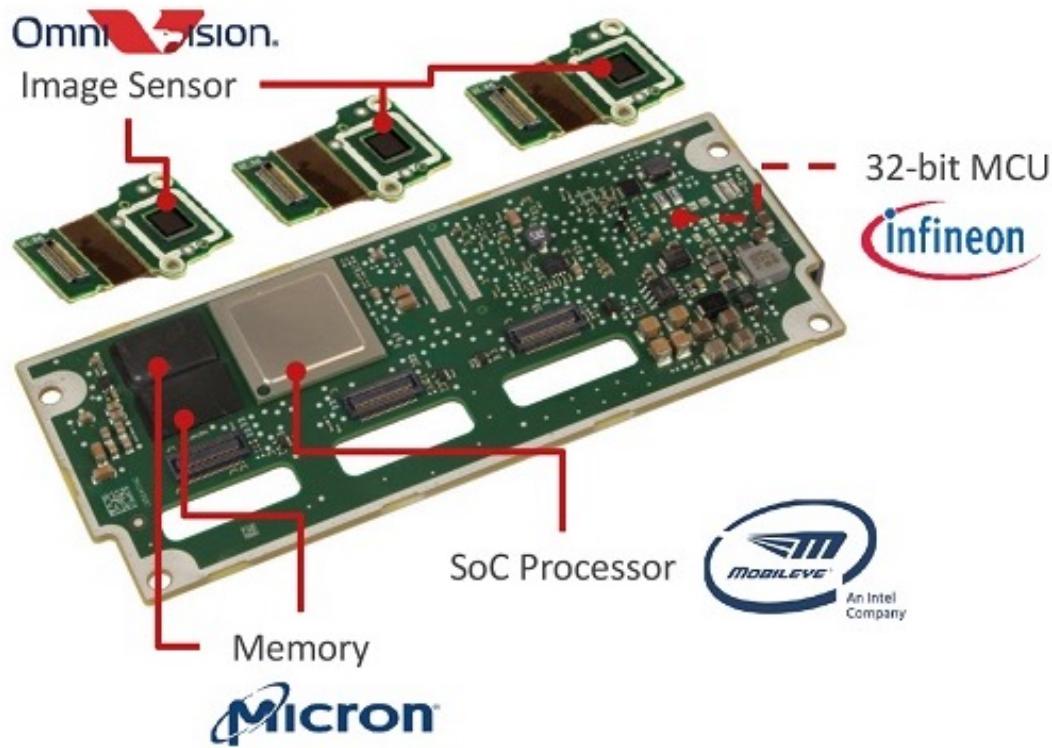
AURIX TriCore-32-Bit-
Mikrocontroller (Fa.
Infineon)

Digitale Implementierung von Reglern



→ Continental ARS4-B Radar mit dem Aurix MCU (engl. Micro Controller Unit) für die Implementierung von digitalen Regler, bspw. für den Notbremsassistent, unter anderem

Digitale Implementierung von Reglern

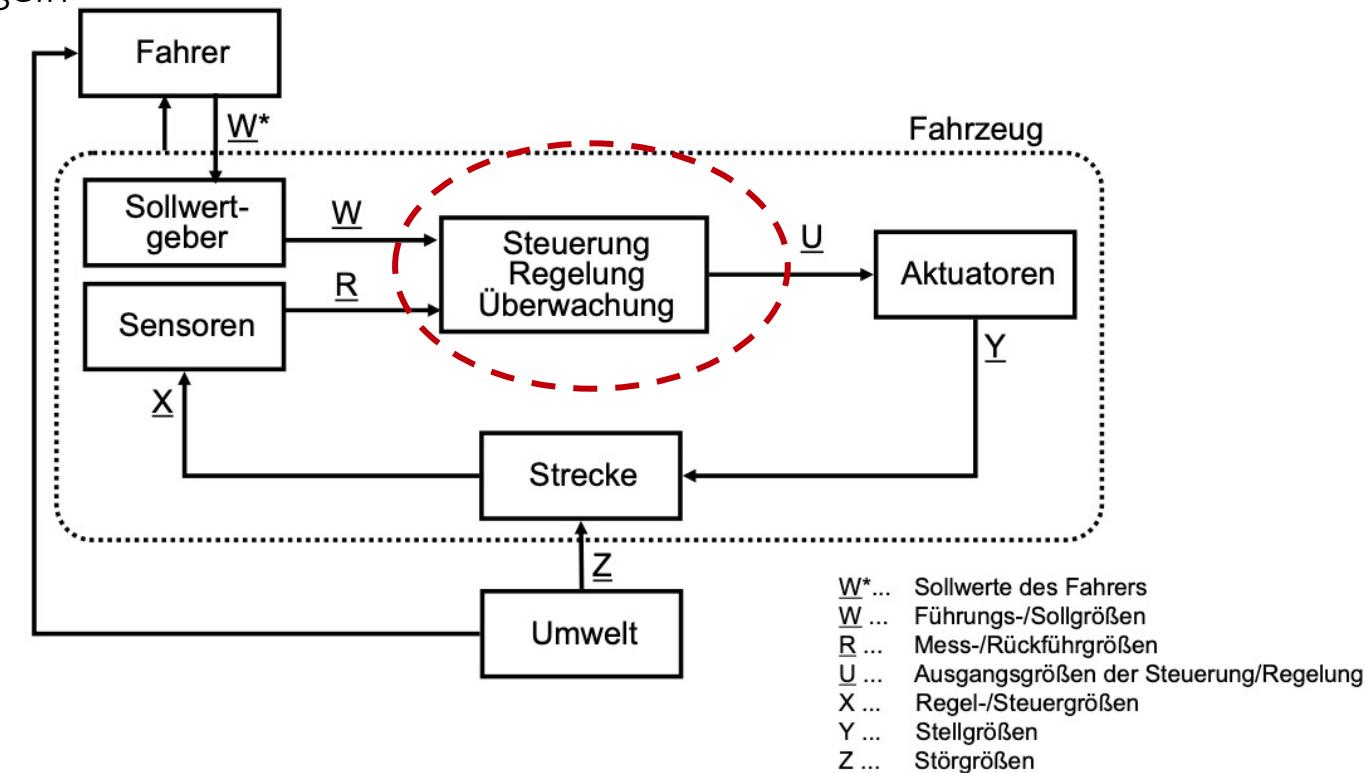


→ ZF S-CAM4 Kamera mit dem Aurix MCU und EyeQ SoC (engl. System-on-Chip) für die Implementierung von digitalen Regler, bspw. für den **Notbremsassistent** und / oder **Spurhalteassistent**, unter anderem

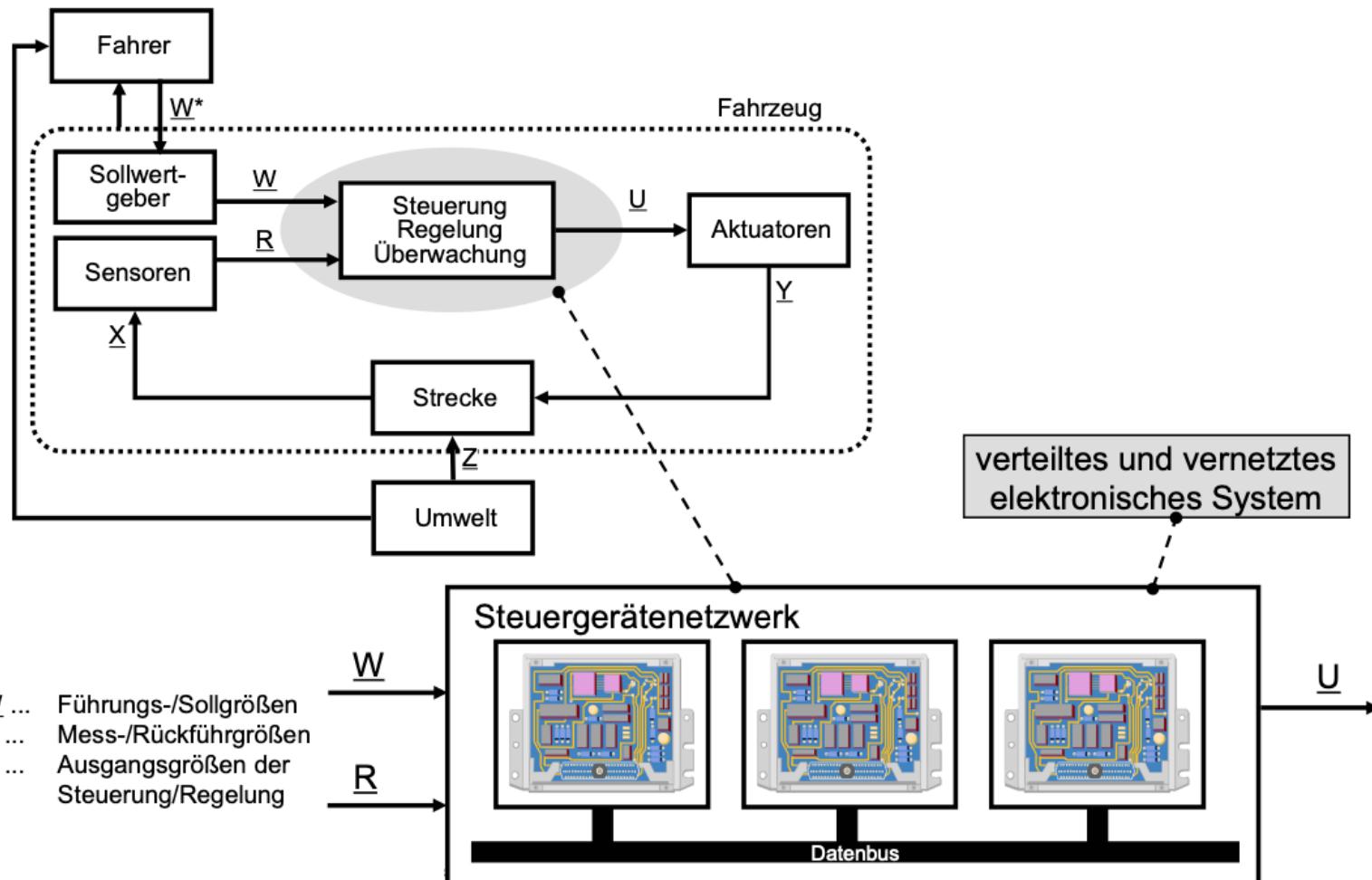
Vernetzte Steuergeräte als Steuerungs- und Regelungssysteme

(Elektronische) Steuergeräte – engl. ECUs

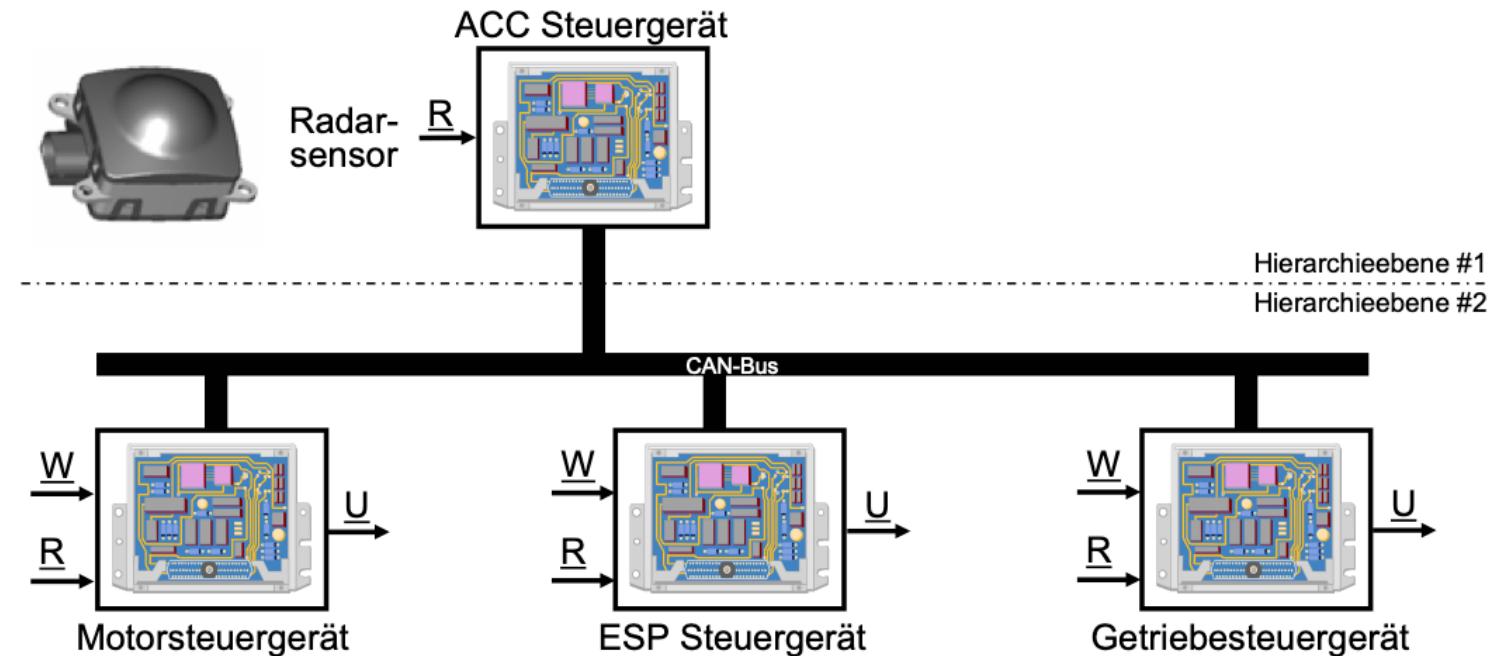
- eingebettete Systeme im Kraftfahrzeug
- Hardware-Software Einheiten, die verbunden über Sensoren, Aktuatoren und Nutzerschnittstellen technische und physikalische Vorgänge überwachen, steuern bzw. regeln



Vernetzte Steuergeräte als Steuerungs- und Regelungssysteme



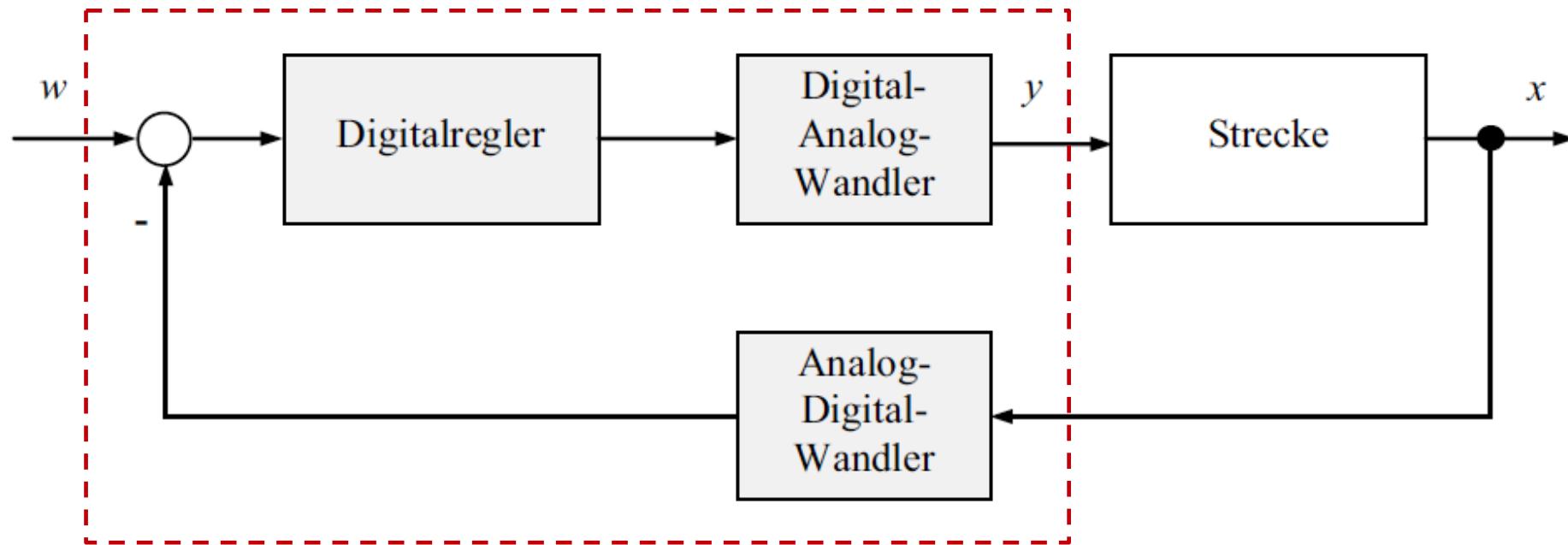
Verkehrsflussangepasste Geschwindigkeitsregelung



→ Warum ist der Regler im Radarsensor integriert und nicht beispielsweise im Motorsteuergerät?

Digitale Implementierung von Reglern

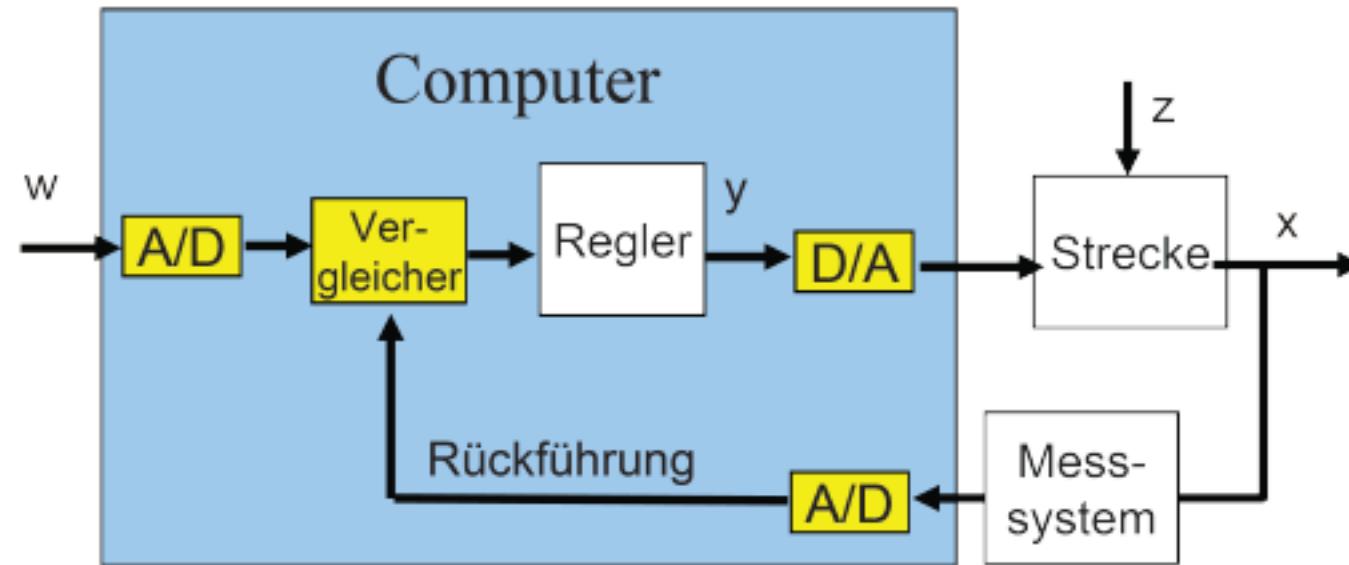
- Der Einsatz von Computern / ECUs bietet eine extrem günstige und flexible Variante von Reglern.
- So können z.B. mehrere Regelkreise mit nur einem **einzigem** Rechner geregelt werden



Digitaler Regelkreis

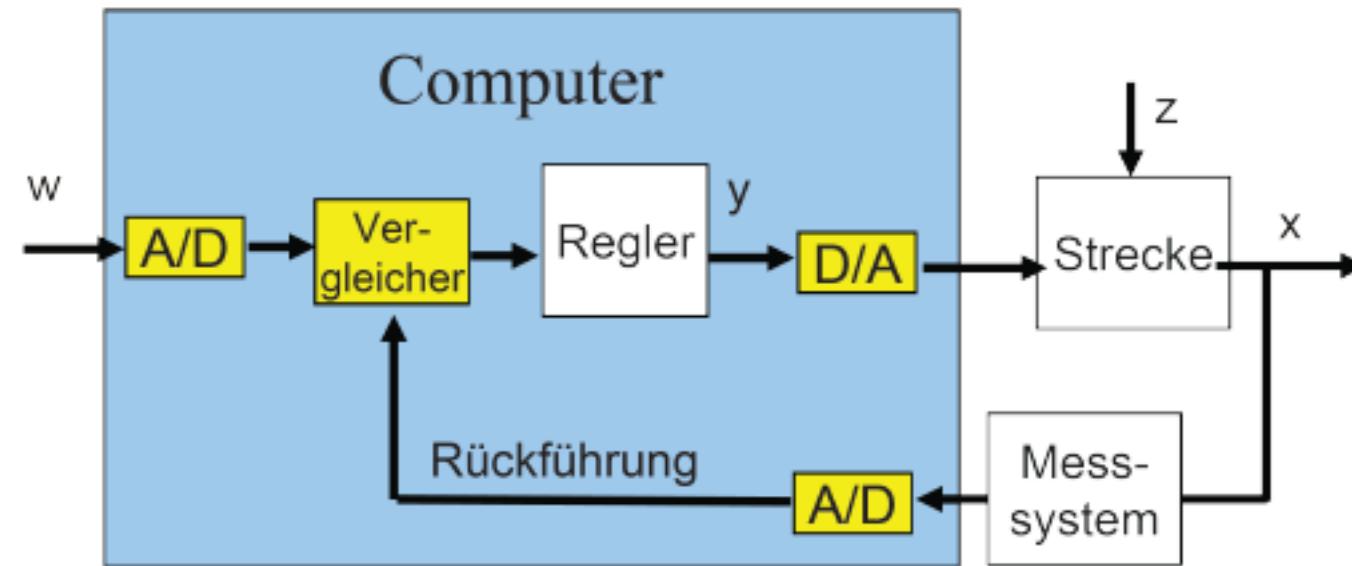
Der digitale Regler besteht aus:

- Regler-Software (das PID-T1-Verhalten wird bspw. durch ein Programm erzeugt)
- Hardware (Computer / Micro Controller)
 - Analog-Digital- und der Digital-Analog-Wandler
 - *Vergleicher*, usw.



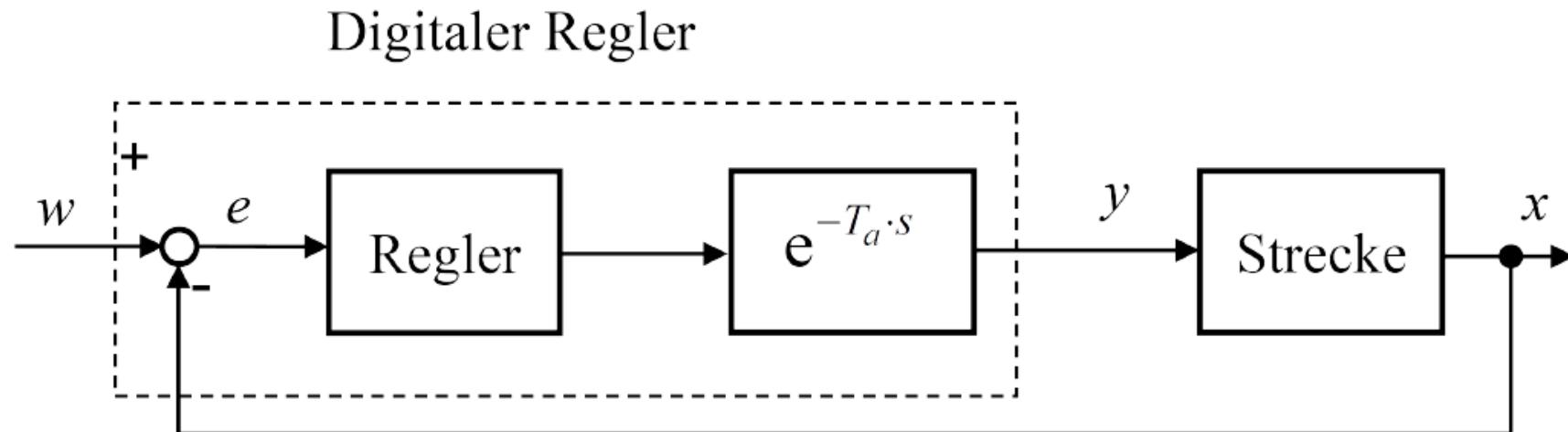
Digitaler Regelkreis

- Gegenüber der bisher behandelten zeitkontinuierlichen Regelungstechnik sind zunächst zwei Wandler im Wirkungsplan hinzugekommen
- Die Regelgröße wird z. B. einmal pro Sekunde gemessen (abgetastet) und gespeichert, d.h. sie steht nur noch zu bestimmten Zeitpunkten exakt zur Verfügung → Totzeit



Digitaler Regelkreis

- Beispiel: Ersatzschaltbild eines quasianalogen digitalen Regelkreises mit der Berücksichtigung der Abtast- Zykluszeit T_a als Totzeit



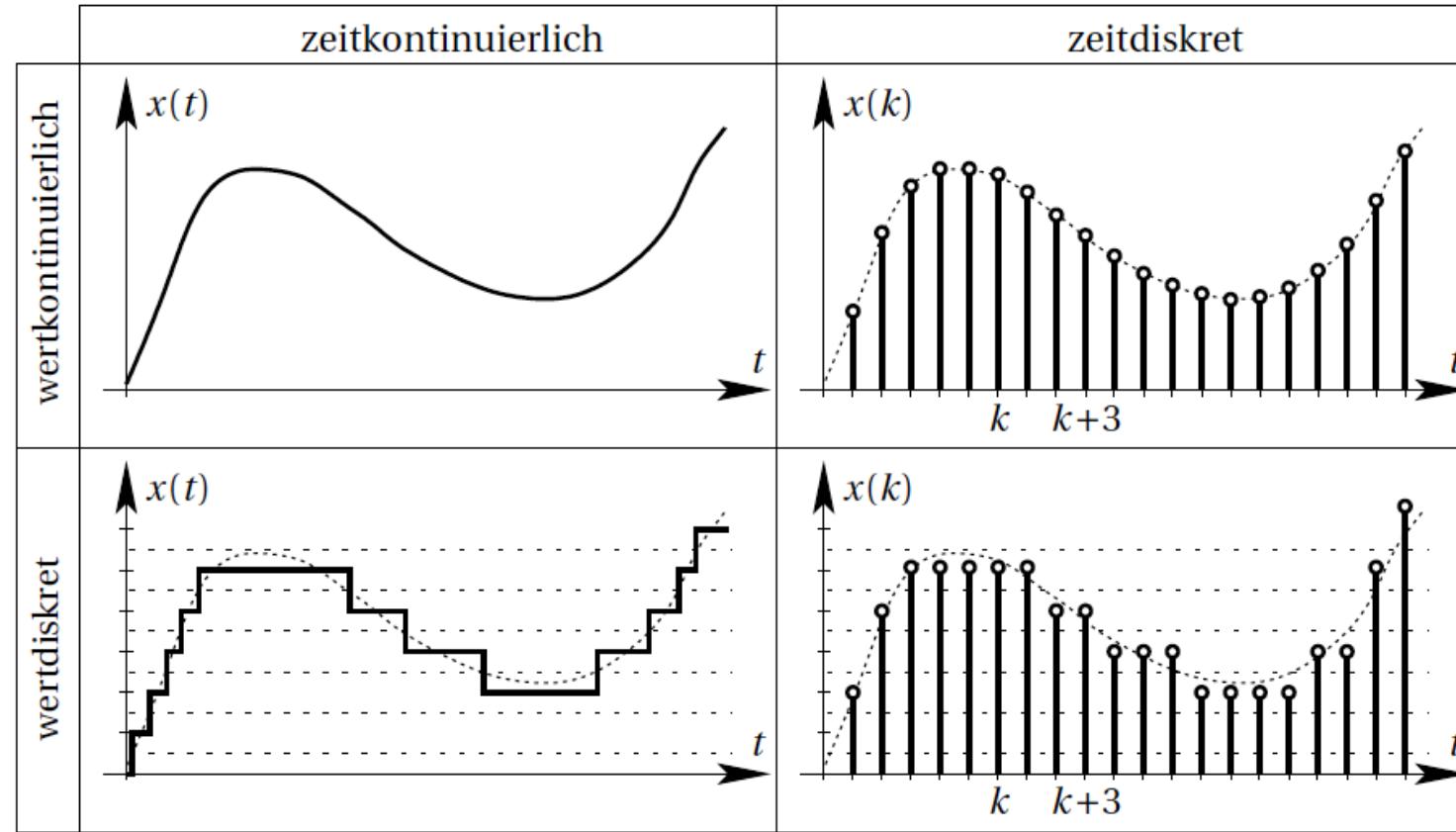
Auswahl der Hardware zur Regelung eines Regelkreis

Welche Aspekte des digitalen Reglers beeinflussen die Güte der Regelung?

1. Auflösung des AD/DA-Wandlers: Sie gibt an, wie fein der stetige analoge Wertebereich in Digitalschritten gerastert wird. Übliche Werte liegen bei 12 bzw. 16 Bit.
2. Abtastrate vom Wandler: Sie gibt die Frequenz an, mit der die Daten gemessen und gewandelt werden. Schnelle Veränderung der Messwerte müssen erkannt werden (**Totzeit**).
3. Zykluszeit des Rechners: Jeder Digitalrechner arbeitet in Taktzyklen. Die Taktrate des Rechners bzw. Programms muss so hoch sein, dass in der Zwischenzeit keine signifikanten Änderungen in der Strecke passieren. SPS und übliche PCs haben Taktzeiten im **ms-Bereich!**

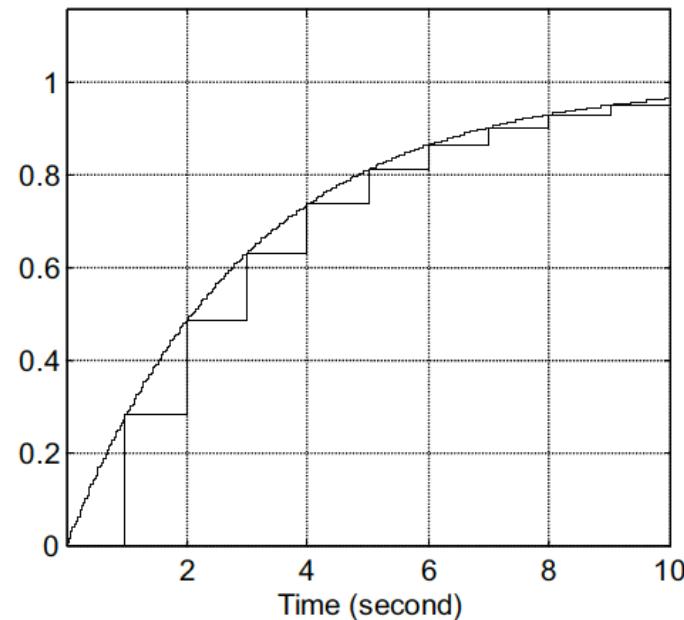
Einteilung von Signalen nach ihren Eigenschaften

- Von einem Digitalsignal spricht man, wenn dieses **zeitdiskret** und **wertdiskret** ist



Analog-Digital-Wandlung

- Abtastung führt im Fall der Zwischenspeicherung zu einem Stufensignal bzw. zu einer Treppenfunktion
- Je kürzer die Abtastzeit ist, desto genauer erfolgt die Nachbildung des zeitlichen Verlaufs der analogen Größe



Quantisierung

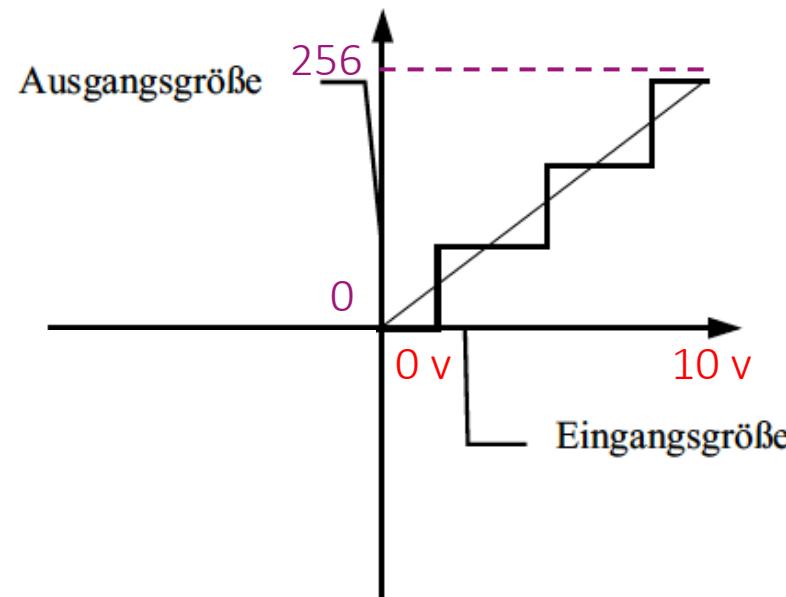
- Die Angabe der Datenbreite db (z. B. 8 oder 12 Bit) des AD-Wandlers ist ein Maß für die Gute der Quantisierung
- Die Quantisierungseinheit q ergibt sich gemäß:

$$q = \frac{1}{2^{db}}$$

Quantisierungskennlinie

Beispiel:

- Ein 8-Bit-Wandler bietet die Möglichkeit, eine analoge Spannung in 256 verschiedene Digitalzahlen umzuwandeln bzw. zu verschlüsseln
- Ein Spannungsbereich von 0 bis 10 Volt wird mit der Quantisierungsstufe von 39 mV aufgelöst.



Mathematische Beschreibung des Abtastvorgangs

- Durch die Abtastung der Regelgröße oder der Regeldifferenz kommen neue Bedingungen für den Reglerentwurf hinzu, z. B. das **Abtasttheorem von Shannon**
- die durch die **Auflösung des AD-Wandlers** stattfindende Quantisierung des Wertebereichs spielt dabei eine Rolle, ist aber häufig vernachlässigbar ist
- die zeitliche **Diskretisierung** stellt jedoch eine erhebliche Änderung des Signals und des Systemverhaltens dar

Abtasttheorem von Shannon

- Eine sinusförmige Größe mit der Kreisfrequenz ω ist nur dann aus den gleichmäßig abgetasteten Amplitudenwerten eindeutig rekonstruierbar, wenn pro Periode ($T = 2\pi/\omega$) mindestens zwei Abtastungen vorliegen.
- In diesem Fall ist der Vorzeichenwechsel und damit die Frequenz detektierbar. Es gilt für die **Abtastzeit**:

$$T_0 \leq \frac{\pi}{\omega}$$

Abtasttheorem von Shannon

- Eine sinusförmige Größe mit der Kreisfrequenz ω ist nur dann aus den gleichmäßig abgetasteten Amplitudenwerten eindeutig rekonstruierbar, wenn pro Periode ($T = 2\pi/\omega$) mindestens zwei Abtastungen vorliegen.
- In diesem Fall ist der Vorzeichenwechsel und damit die Frequenz detektierbar. Es gilt für die **Abtastzeit**:

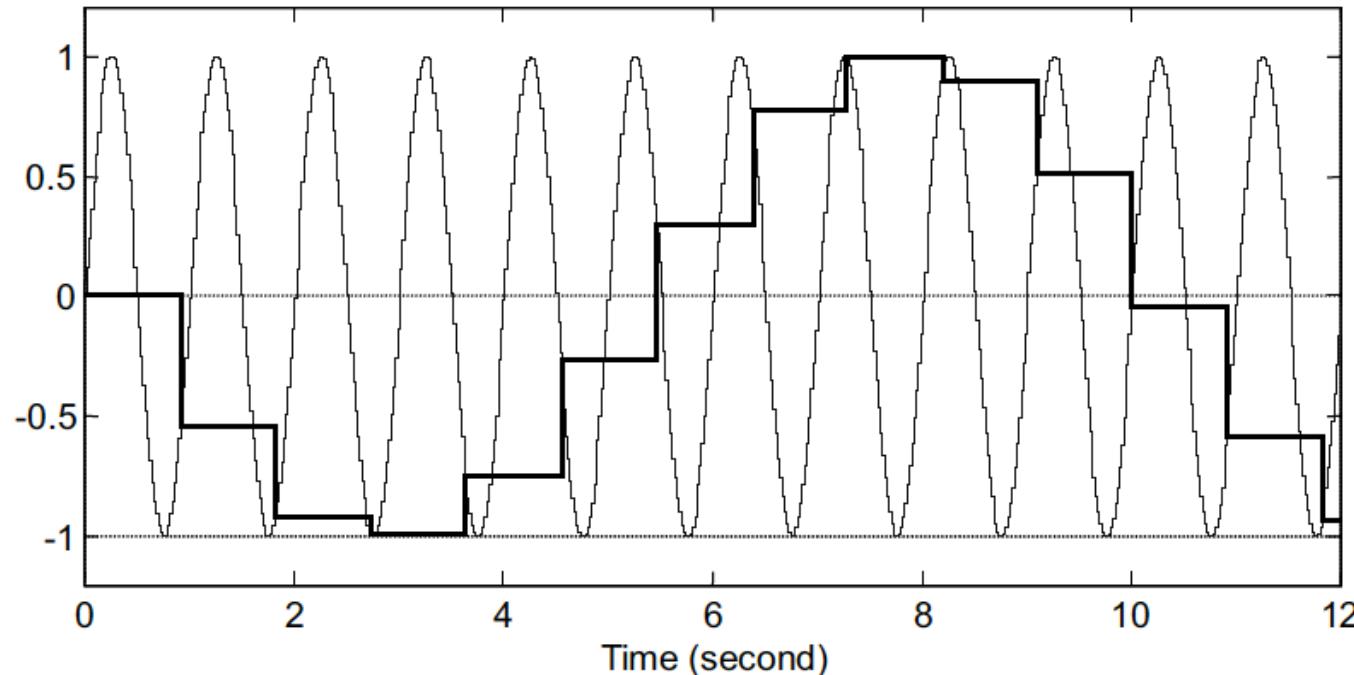
$$T_0 \leq \frac{\pi}{\omega}$$

- oder mit anderen Worten: Die Abtastfrequenz muss größer als die zweifache Signalfrequenz sein. Gemäß **Shannon** existiert die **Grenzfrequenz**

$$\omega_{Sh} = \frac{\pi}{T_0}$$

Aliasing-Effekt

- Beispiel: Verletzung des Abtasttheorems
 - ein Signal von einem Hertz wird mit der 1,1-fachen Frequenz abgetastet
 - Ergebnis → sinusförmige Scheinfunktion mit der Frequenz von 0,1 Hertz



Daumenregeln

In der Praxis findet man folgende Daumenregeln

- Die Abtastfrequenz sollte 6–10mal der Bandbreite des Regelkreises entsprechen
- In der Anregelzeit des Regelkreises sollten 4–10 Abtastungen liegen
- Das Abtasthalteglied sollte weniger als $5\text{--}15^\circ$ Phasenabsenkung bewirken bei der Durchtrittsfrequenz des zeitkontinuierlichen Systems durch die 0dB-Linie.

Z-Transformation

Einleitung

- Die Z-Transformation wird in der Regelungstechnik verwendet, um Differenzengleichungen zu lösen, die bei der Verarbeitung von abgetasteten Signalen auftreten.
- Die Transformation wird ausführlich in der Ingenieurliteratur, einschließlich spezialisierter Bücher über Ingenieurmathematik, beschrieben.

z-Transformation

- Gegeben ist die Übertragungsfunktion im **s-Bereich**:

$$G(s) = \frac{X(s)}{W(s)}$$

- Gesucht ist die Übertragungsfunktion im **z-Bereich**:

$$G(z) = \frac{x(kT)}{w(kT)}$$

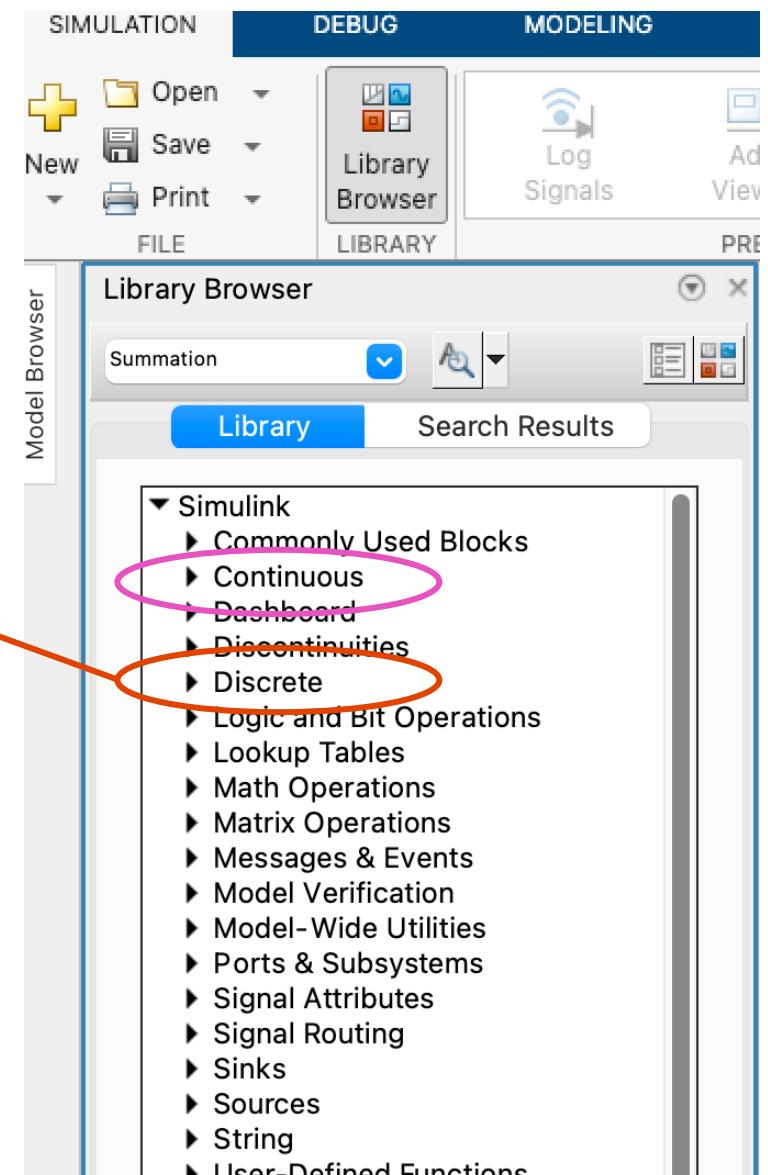
- und daraus abgeleitet, die Differenzengleichung:

$$x_{k+1} = f(x_k, x_{k-1}, \dots, w_{k+1}, w_k, w_{k-1}, \dots)$$

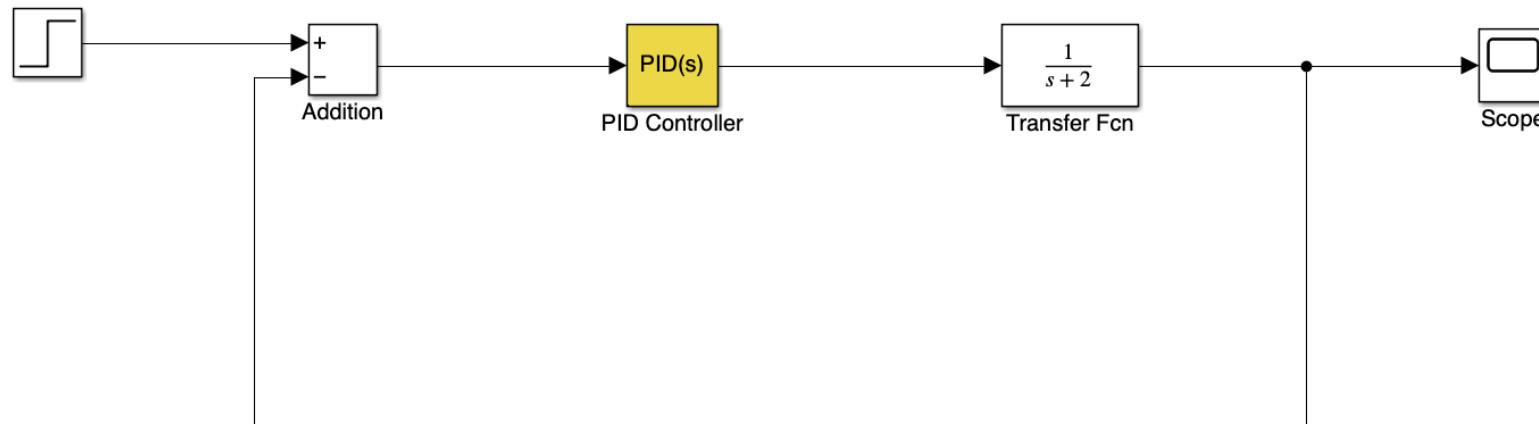
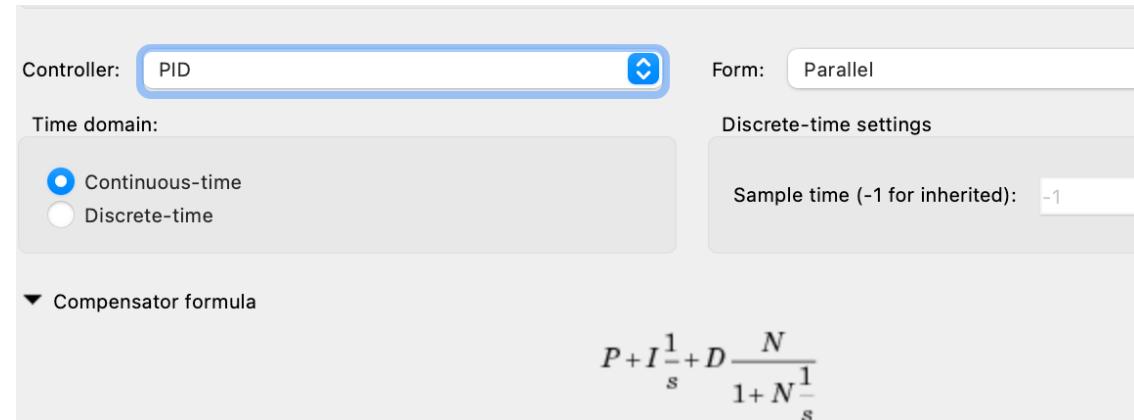
Korrespondenztabelle z-Transformation Näherungen

Nr.	s -Bildbereich	Zeitbereich	Abtastfolgen	z -Bildbereich
	$\hat{f}(s)$	$f(t)$	(f_k)	$f_z(z)$
I	1	$\delta(t)$	$\delta_k = \begin{cases} 1 & \text{für } k = 0 \\ 0 & \text{für } k > 0 \end{cases}$	1
II	$\frac{1}{s}$	$\sigma(t)$	(1^k)	$\frac{z}{z - 1}$
III	$\frac{1}{s^2}$	t	(kT_a)	$\frac{T_a z}{(z - 1)^2}$
IV	$\frac{1}{s - a}$	e^{at}	(e^{akT_a})	$\frac{z}{z - e^{aT_a}}$
V	$\frac{n!}{(s - a)^{n+1}}$	$t^n e^{at}$	$((kT_a)^n e^{akT_a})$	$\frac{\partial^n}{\partial a^n} \frac{z}{z - e^{aT_a}}$
VI	$\frac{b}{s^2 + b^2}$	$\sin(bt)$	$(\sin(bkT_a))$	$\frac{z \sin(bT_a)}{z^2 - 2z \cos(bT_a) + 1}$
VII	$\frac{s}{s^2 + b^2}$	$\cos(bt)$	$(\cos(bkT_a))$	$\frac{z(z - \cos(bT_a))}{z^2 - 2z \cos(bT_a) + 1}$
VIII	$\frac{b}{(s - a)^2 + b^2}$	$e^{at} \sin(bt)$	$(e^{akT_a} \sin(bkT_a))$	$\frac{z e^{aT_a} \sin(bT_a)}{z^2 - 2z e^{aT_a} \cos(bT_a) + e^{2aT_a}}$
IX	$\frac{s - a}{(s - a)^2 + b^2}$	$e^{at} \cos(bt)$	$(e^{akT_a} \cos(bkT_a))$	$\frac{z(z - e^{aT_a} \cos(bT_a))}{z^2 - 2z e^{aT_a} \cos(bT_a) + e^{2aT_a}}$

Platzieren von diskreten Blöcke



PID Reglerentwurf in Simulink



PID Reglerentwurf in Simulink

