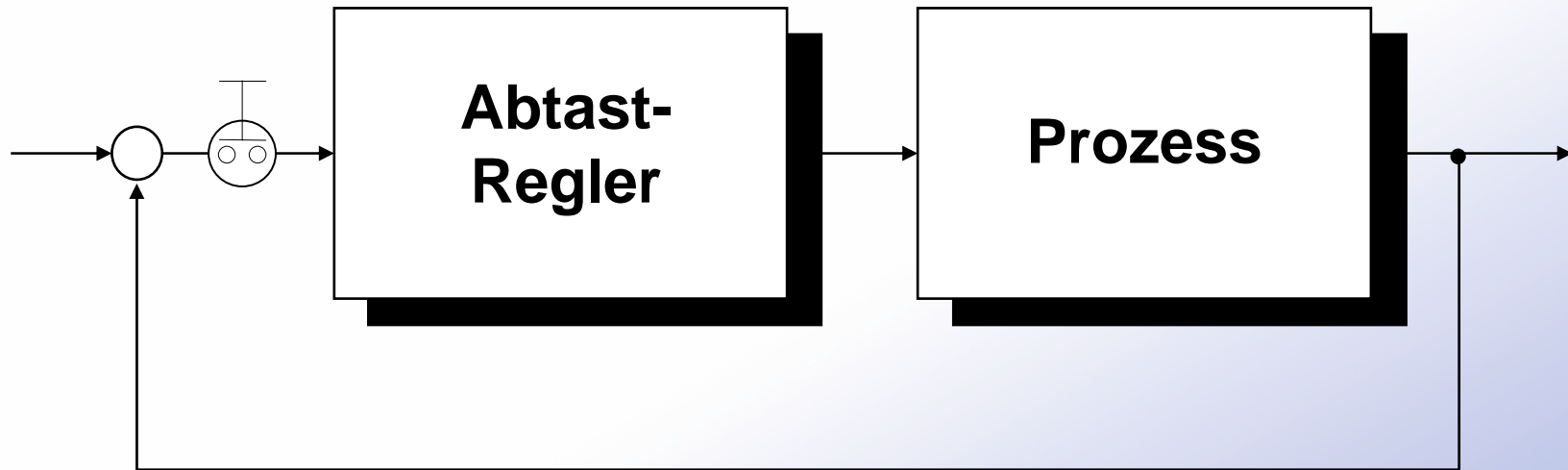


Abtastregelung - Theorie und Praxis



Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Einführung / Historie

- **Historie**

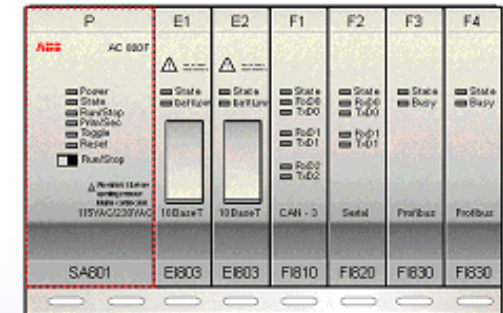
- In den 50er Jahren erstmals Überlegungen zum Einsatz von Digitalrechnern für Regelungszwecke
- Damalige industrielle Digitalrechner hatten Zimmergröße und waren unzuverlässig (Röhrentechnik)
- Regelungen wurden analog ausgeführt (mechanisch, pneumatisch oder auf Basis von analoger Rechentechnik)
- Größere Verbreitung von digitalen Prozessrechnern mit Einführung der Mikroelektronik ab ca. 1970-72
- Heute: Analoge Regelungstechnik in der industriellen Praxis nahezu völlig abgelöst

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Einführung / Abtastregler

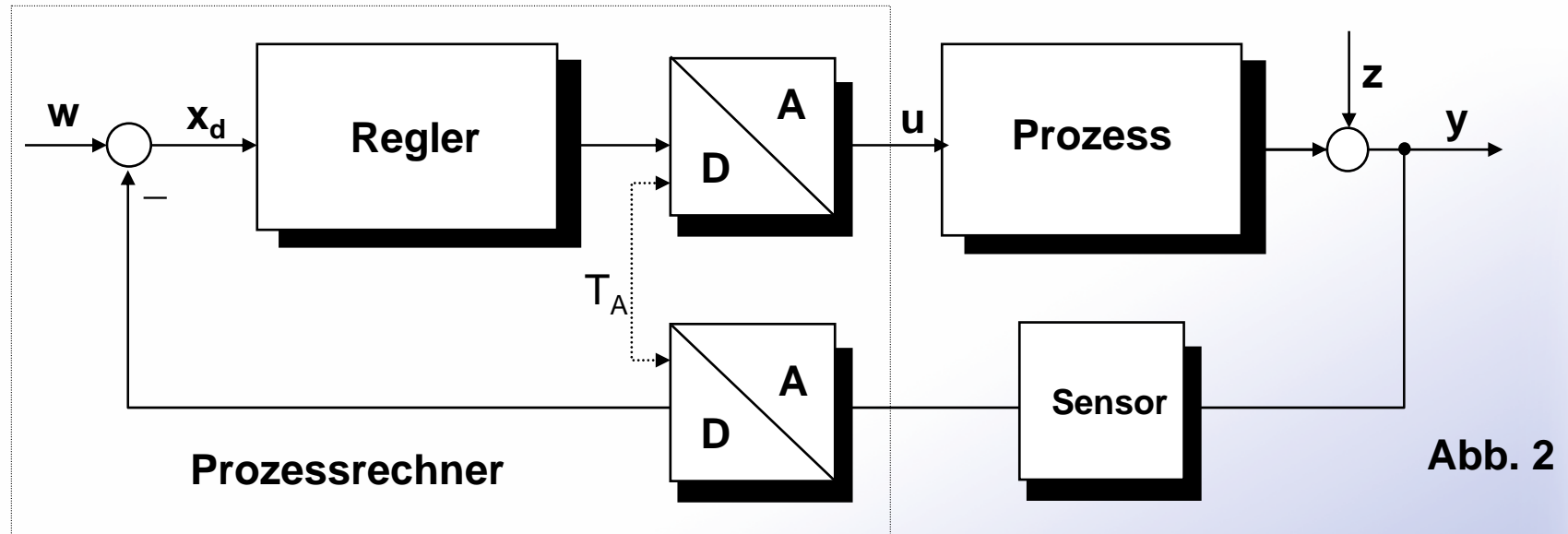
- **Vorteile digitaler Abtastregler (u.a.)**

- Preiswerte Standard-Hardware verfügbar (oft z.B. auf PC- oder SPS-Basis)
- Mehrere Regelkreise pro Prozessrechner
- Wiederverwendung erprobter Algorithmen
- Einfache Fehlerdiagnose durch weltweite Fernwartung
- Komplexeste Algorithmen preiswert implementierbar
 - Identifikation / Adaption
 - Strukturumschaltung
- Höhere Reglerentwurfsverfahren einsetzbar
 - Moderne Mehrgrößenregelungen
- Schnelle Entwicklungszyklen durch Einsatz höherer Entwicklungswerkzeuge (z.B. MATLAB/Simulink)



Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Typischer Aufbau eines Abtastregelkreis



- **Prozessrechner ersetzt den analogen Regler**
- **Kommunikation mit dem Prozess**
 - A/D (analog/digital) Wandlung zur Istwert-Erfassung
 - D/A (digital/analog) Wandlung zur Stellgrößen-Ausgabe
 - Synchroner „Abtastung“

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Der Abtastregelkreis im Detail

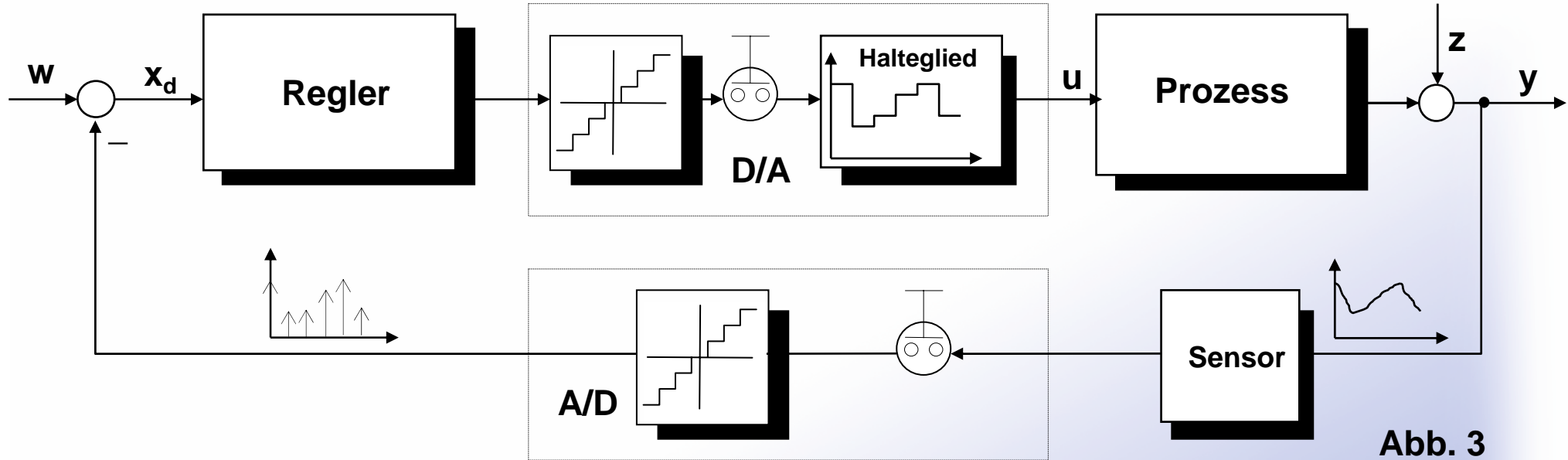


Abb. 3

- Zeitdiskretisierung
- Halteglied sorgt für zeitliche Verzögerungen
- Amplitudendiskretisierung (Quantisierung, meist vernachlässigt)

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Beispiel: Drehzahlregelung (analog)

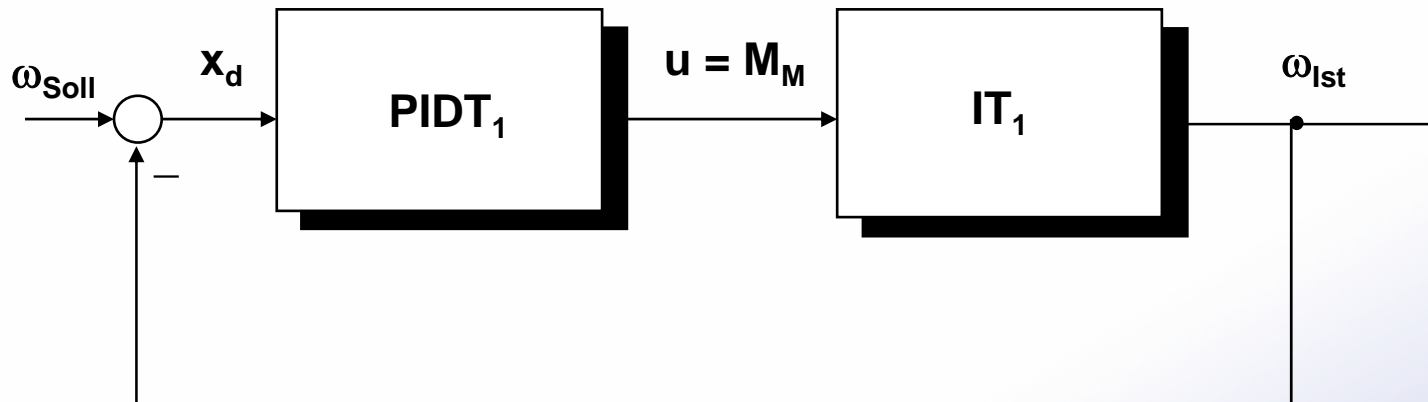


Abb. 5

- **$PIDT_1$ – Regler**

$$F(s) = K_R \frac{1 + T_n s + T_n T_v s^2}{T_n s (1 + T_1 s)}$$

- **IT_1 -Strecke**

$$F(s) = \frac{1}{\theta_s s (1 + T_{S1} s)}$$

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Beispiel: Drehzahlregelung (analog)

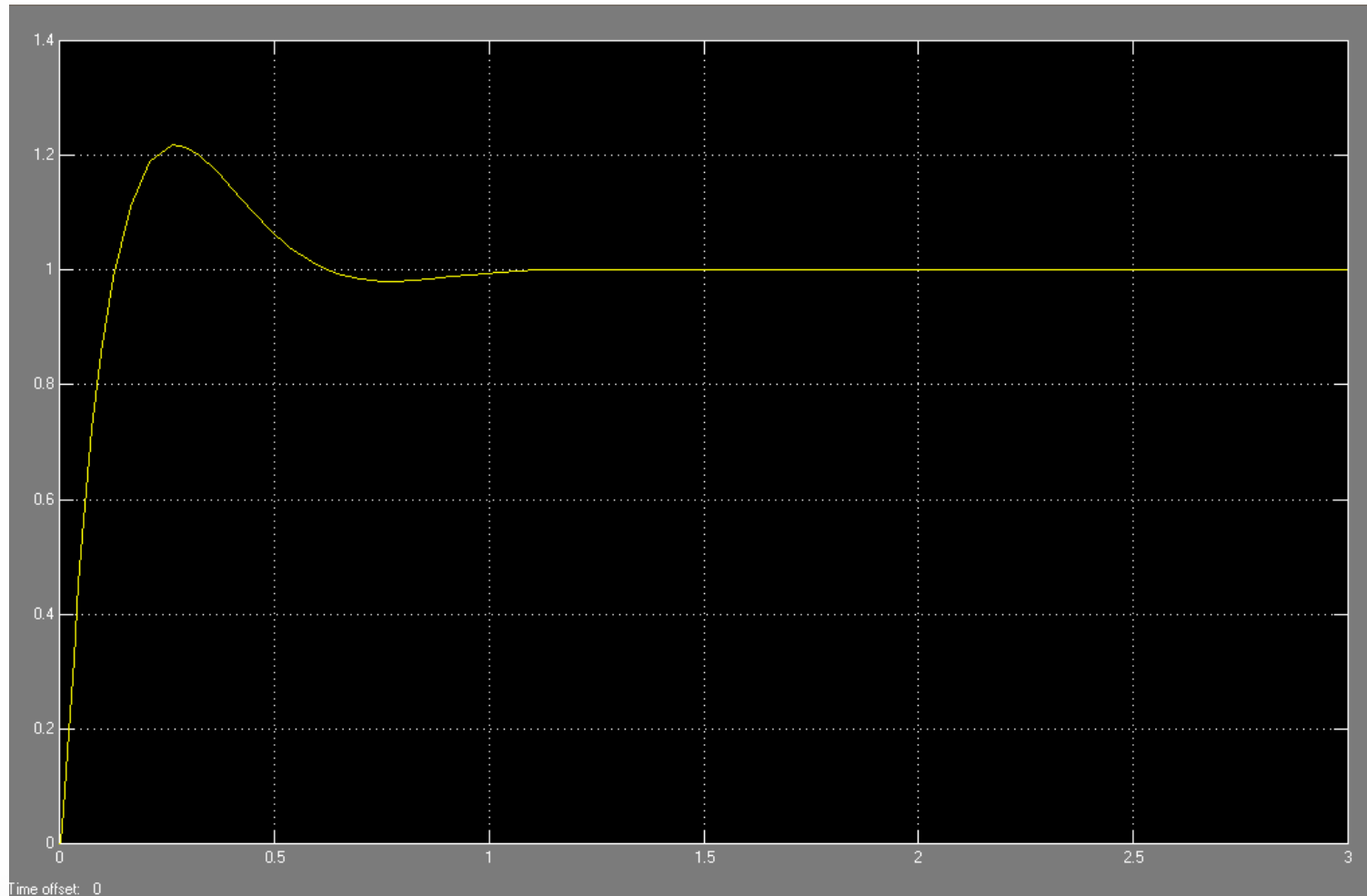


Abb. 6

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Beispiel: Diskretisierung des Reglers

Nach *Tustin (bilineare Transformation)* gilt der Näherungsansatz:

$$s \approx \frac{2}{T_A} \frac{z-1}{z+1}$$

Nach Einsetzen in die s-Übertragungsfunktion des Reglers

$$F(s) = K_R \frac{1 + T_n s + T_n T_v s^2}{T_n s (1 + T_1 s)} = \frac{u(s)}{x_d(s)}$$

Erhält man die z-Übertragungsfunktion:

$$F(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2}} = \frac{u(z)}{x_d(z)}$$

a_i, b_j abhängig von K_R, T_n, T_v, T_1 und T_A

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Beispiel: Diskretisierung des Reglers

Auflösen der Gleichung nach $u(z)$ liefert:

$$u(z) = b_0 x_d(z) + b_1 x_d(z) z^{-1} + b_2 x_d(z) z^{-2} - a_1 u(z) z^{-1} - a_2 u(z) z^{-2}$$

Rechtsverschiebungssatz der z-Transformation liefert die Differenzengleichung des PIDT₁-Abtastreglers

$$u(k) = b_0 x_d(k) + b_1 x_d(k-1) + b_2 x_d(k-2) - a_1 u(k-1) - a_2 u(k-2)$$

- **Linearkombination aktueller und vergangener Ein- und Ausgangsgrößen**
- **Direkt auf einem Prozessrechner implementierbar**
- **Ordnung der Diff.-Gleichung in z gleich der Ordnung der s-Übertragungsfunktion**

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Beispiel: Drehzahlregelung ($T_A = 10\text{msec}$)

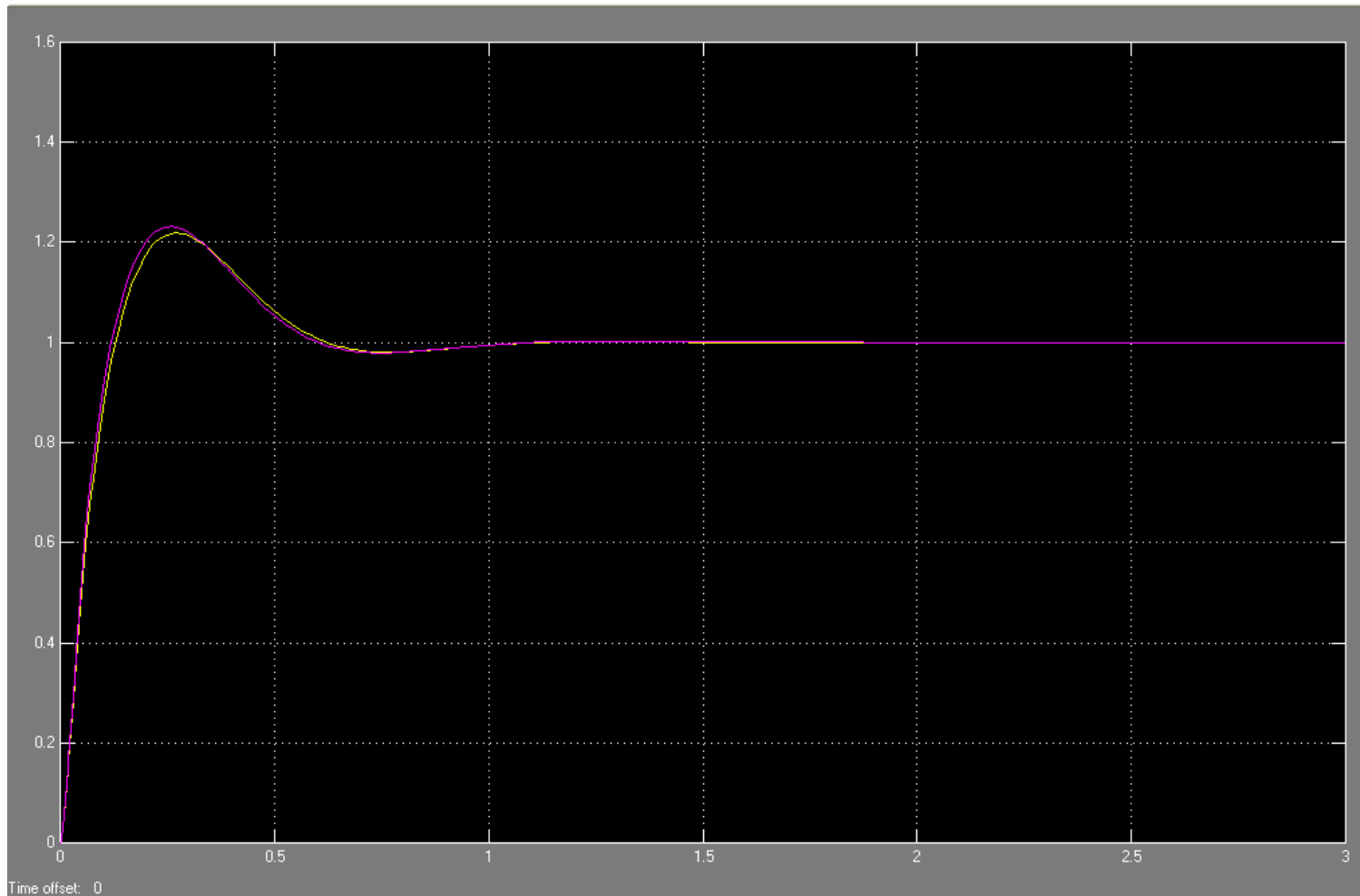


Abb. 7

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Beispiel: Drehzahlregelung ($T_A = 100\text{msec}$)

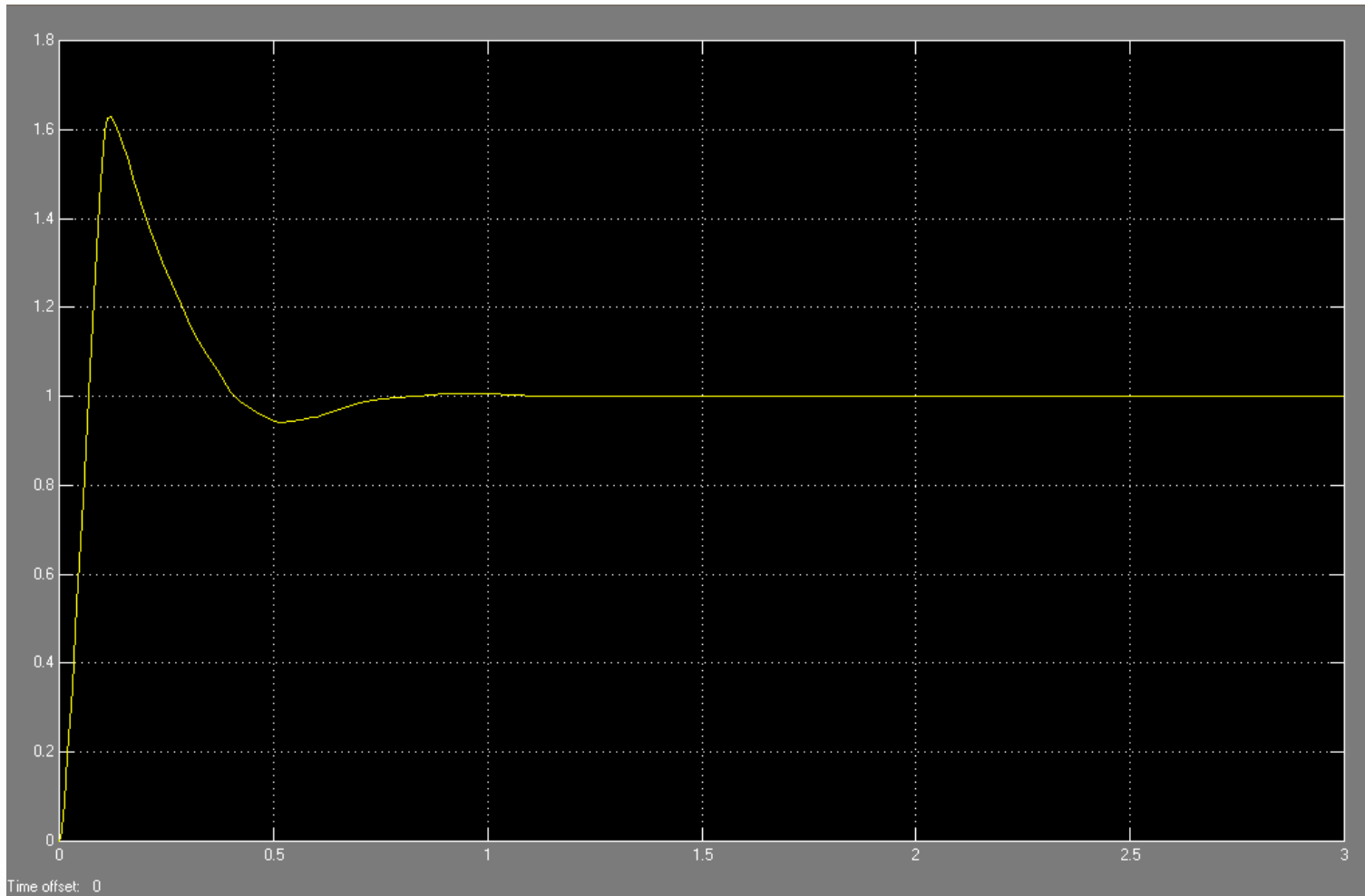


Abb. 8

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Aliasing / Abtastung ($f_A = 5 \cdot f_S$)

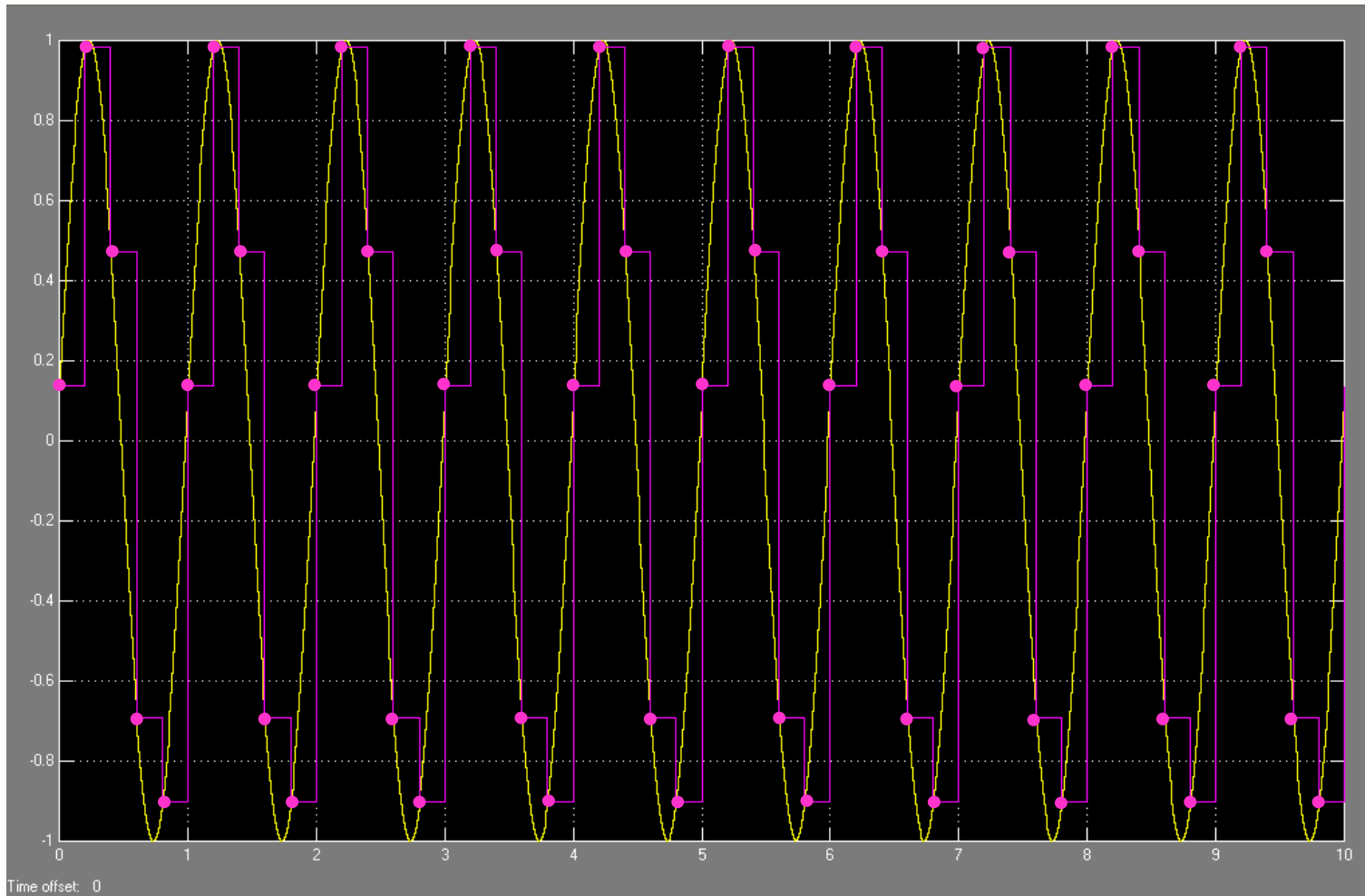


Abb. 12

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Aliasing / Abtastung ($f_A = 2 \cdot f_S$)

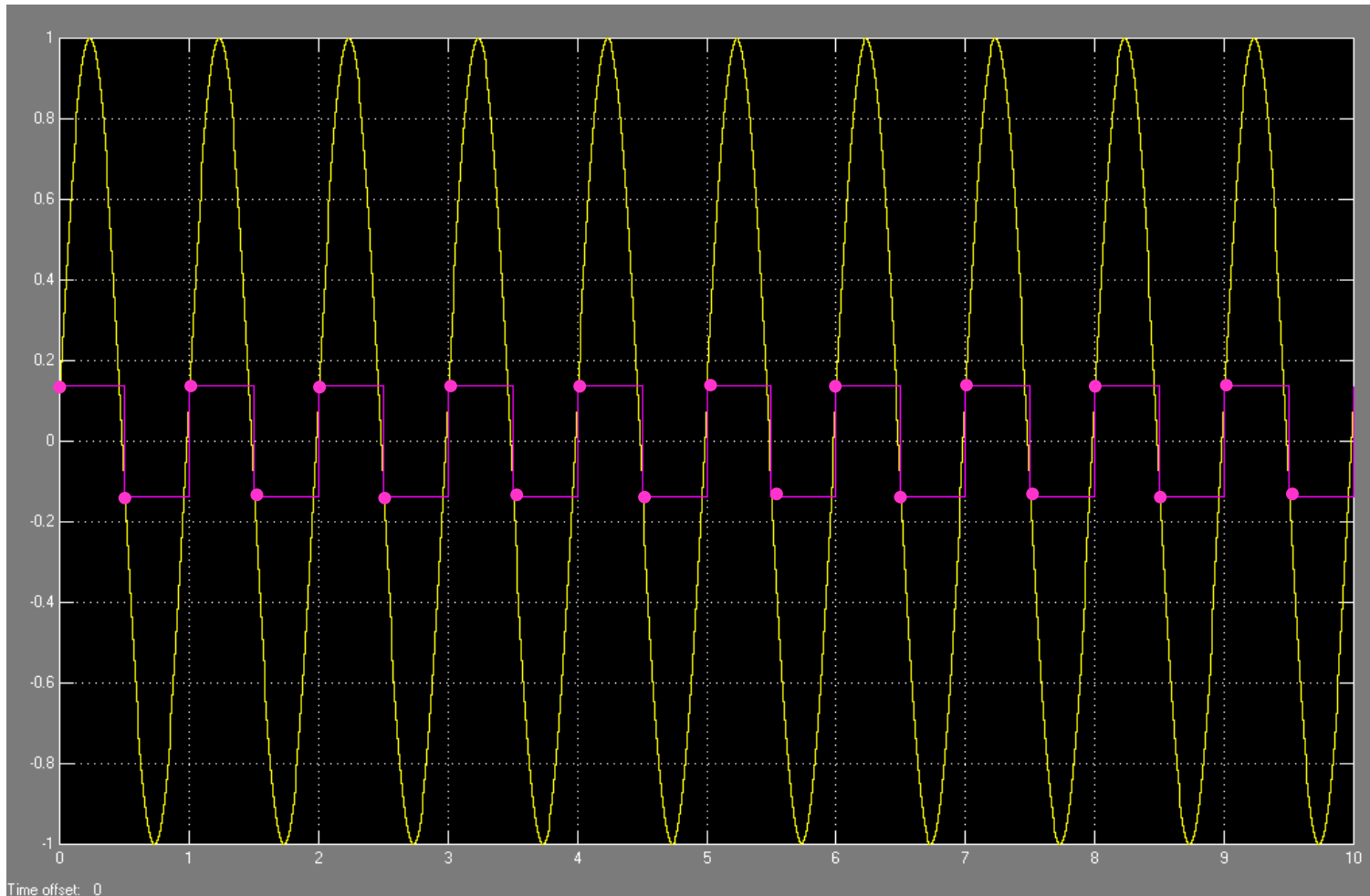


Abb. 13

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Aliasing / Abtastung ($f_A = f_S$)

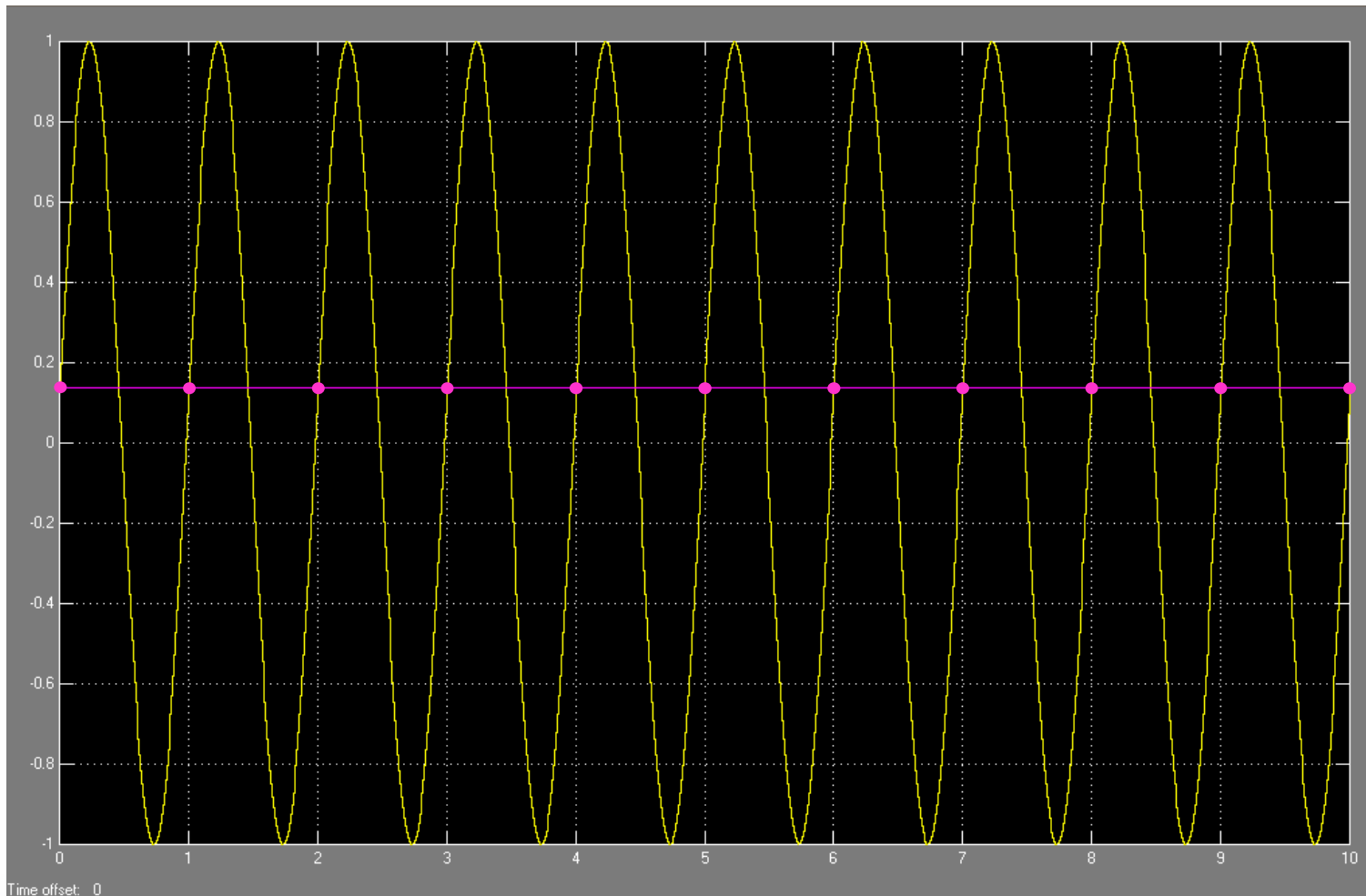


Abb. 14

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Aliasing / Abtastung ($f_A = 0,8 \cdot f_S$)

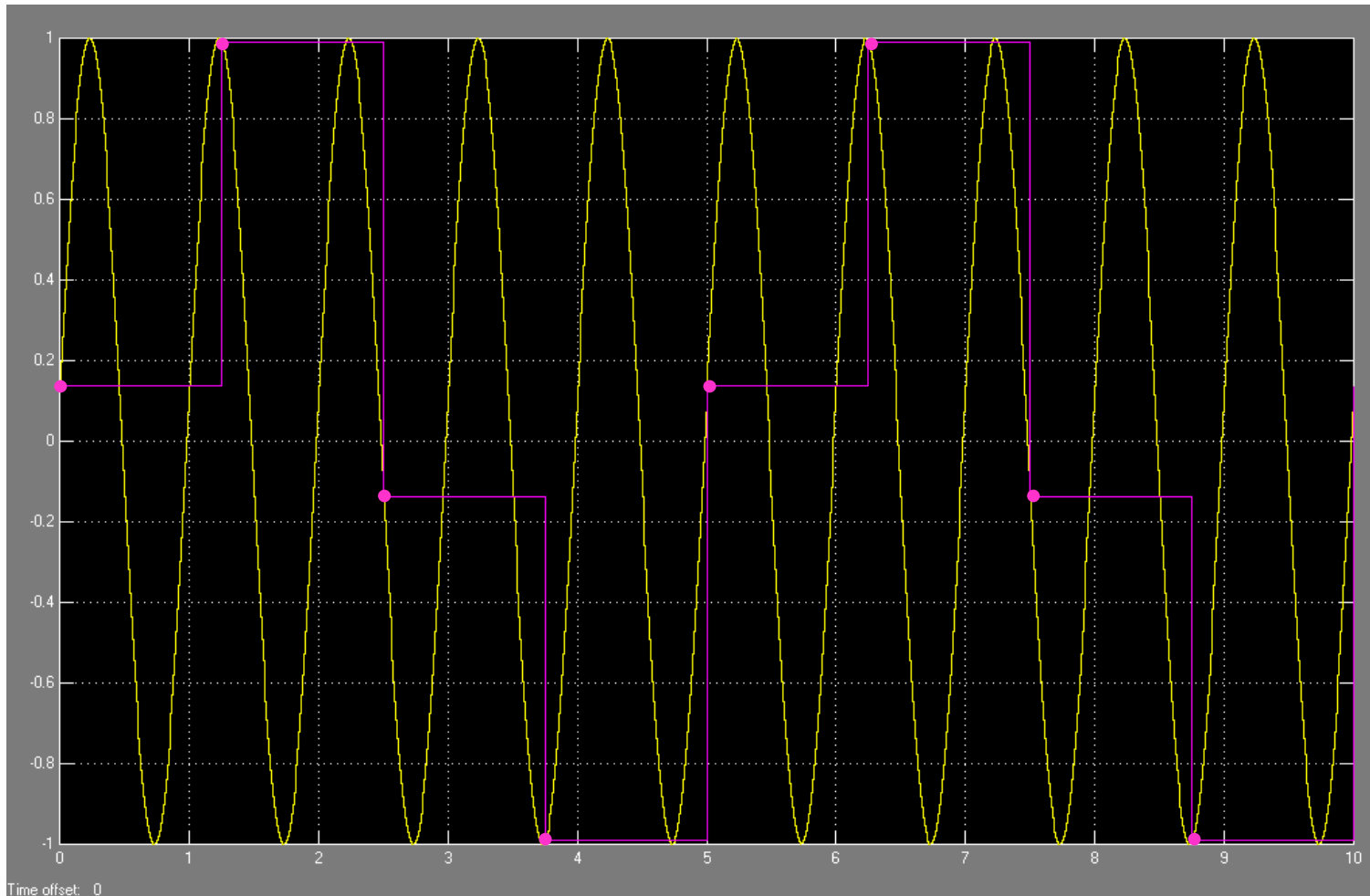


Abb. 15

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Aliasing / Shannon'sches Abtasttheorem

- Ein Signal $s(t)$ sei bandbeschränkt und besitze eine maximale Frequenz f_s
- Durch die Abtastung des Signals geht genau dann keine Information verloren, wenn gilt:

$$f_A \geq 2 * f_s$$

Die Abtastfrequenz muss daher mindestens doppelt so groß sein wie die höchste im Signal enthaltene Frequenz

- Für $f_A = 2 * f_s$ (Shannon'scher Grenzfall) ist bereits die Amplitude nicht mehr eindeutig rekonstruierbar

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Das Anti-Aliasing-Filter

- **Problem: Messsignal enthält mittel- und hochfrequente Signalfrequenzen $> 2 \cdot f_A$ (z.B. Sensorrauschen)**
- **Lösung: Ein Anti-Aliasing-Tiefpassfilter (AAF)**
 - Angepasstes **analoges** Tiefpassfilter mit $f_F < f_A/2$

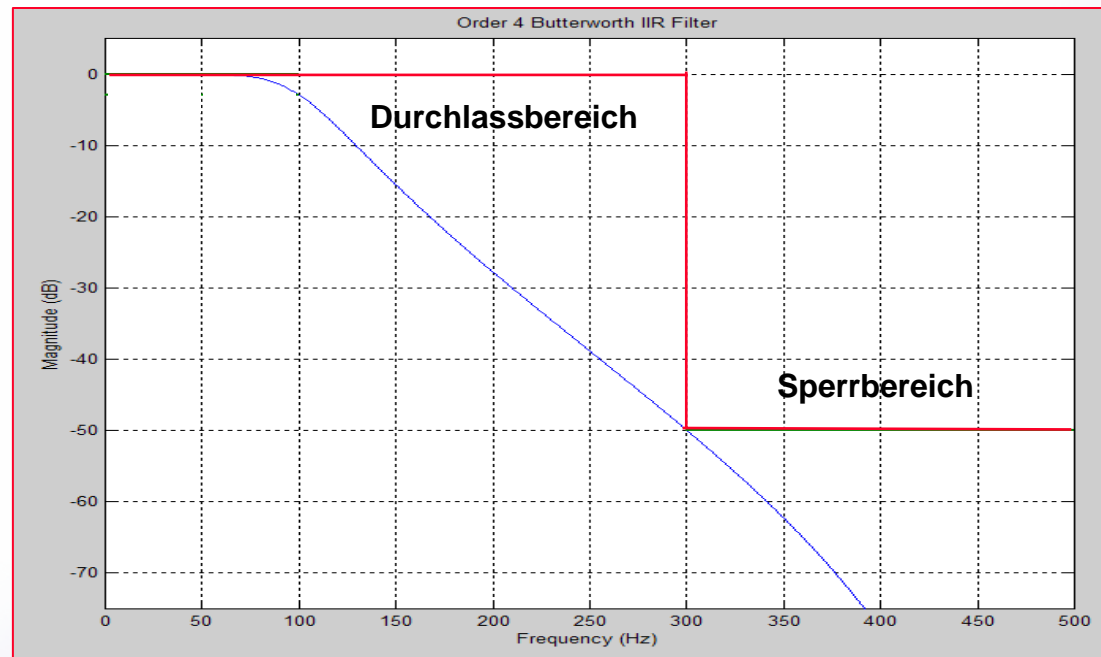


Abb. 16

- **Kein digitales Filter kann Alias-Frequenzen wieder entfernen !!**

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Wahl der Abtastzeit einer Abtastregelung

- **Orientierung an den dominanten Zeitkonstanten (langsamen Polen) oder Totzeit der Regelstrecke**
- **Shannon'sches Abtasttheorem beachten / Anti-Aliasing-Filter**
- **Vermeidung zu kleiner Abtastzeiten**
 - Numerische Stabilität
- **Faustregel:** $5 \cdot f_s < f_A < 50 \cdot f_s$
- **Typische Abtastzeiten**
 - Temperaturregelungen: 1 – 10 sec
 - Verfahrenstechnik: 100 – 1000 msec
 - Dynamische Antriebsregelungen: 0,1 – 10 msec

Abtastregelung - Theorie und Praxis

- Wahl der Abtastzeit einer Abtastregelung

f_p Eigenfrequenz des Regelkreises [s^{-1}]

T_i Laufzeit, Totzeit [s]

T_{95} Einschwingzeit bis zu 95 % des Übergangsfunktionsendwertes [s]

T_u Verzugszeit [s]

	<i>Kriterium</i>	<i>Ermittlung</i>	<i>Bemerkungen</i>
a)		$T_0 \approx \left(\frac{1}{8} \cdots \frac{1}{16}\right) \frac{1}{f_p}$	
b)		$T_0 \approx \left(\frac{1}{4} \cdots \frac{1}{8}\right) T_i$	Prozesse mit dominierender Totzeit
c)	15 % größere Einschwingzeit als kontinuierlicher Regelkreis mit PI-Regler	$T_0 \approx (1,2 \cdots 0,35) T_u$ $T_0 \approx (0,35 \cdots 0,22) T_u$	$0,1 \leq \frac{T_u}{T} \leq 1,0$ $1,0 \leq \frac{T_u}{T} \leq 10$
d)	für quasikontinuierliche Regelkreise	$T_0 \leq 0,1 \cdot T_G$	Lutz, Wendt: Taschenbuch der Regelungstechnik, 11.3.2
e)	Ausregeln von Störungen bis ω_{max}	$T_0 \approx \frac{\pi}{\omega_{max}}$ (Shannon)	ω_{max} so gewählt, dass für Prozess gilt: $ G(\omega_{max}) \approx 0,01 \cdots 0,1$
f)	für Simulationen	$T_0 \approx \left(\frac{1}{6} \cdots \frac{1}{15}\right) T_{95}$	
g)	zur Identifikation des Prozessmodells	$T_0 \approx \left(\frac{1}{5} \cdots \frac{1}{15}\right) T_{95}$	

© R. Isermann: Digitale Regelsysteme, Band I; Springer 1988; S. 159