

# Signale und Systeme 2

FS 24 Prof. Dr. Heinz Mathis

Autoren:

Simone Stitz, Laurin Heitzer

Version:

1.0.20240524

<https://github.com/P4ntomime/signale-und-systeme-2>



## Inhaltsverzeichnis

<b>1 LTI-Systeme (S. 171)</b>	<b>2</b>	<b>6 Ortskurve (Nyquist-Diagramm) (S. 240)</b>	<b>6</b>
1.1 Zusammenhänge zwischen den Größen (S. 174-176)	2	6.1 Nyquistdiagramme mit MatLab	6
1.2 Phasenlaufzeit $\tau_P(\omega)$ (S. 183)	2	<b>7 Stabilität im Nyquist-Diagramm</b>	<b>6</b>
1.3 Gruppenlaufzeit $\tau_G(\omega)$ (S. 182)	2	7.1 Offener und geschlossener Regelkreis	6
1.4 Phasenlaufzeit / Gruppenlaufzeit identisch (S. 186)	2	7.2 Vereinfachtes Nyquist-Kriterium	6
1.5 Verzerrungen (S. 187-188)	2	7.3 Amplitudenrand und Phasenrand (Verstärkungsreserve)	6
1.6 Klirrfaktor (S. 189)	2	7.4 Amplitudenrand und Phasenrand im Nyquist-Diagramm	7
1.7 Verzerrungsfreie Übertragung von Signalen (S. 190)	2	<b>8 Zustandsraumdarstellung (ZRD)</b>	<b>7</b>
1.8 Übertragung stochastischer Signale (S. 193-194)	3	8.1 Vorteile der ZRD (S. 253-254)	7
<b>2 Dämpfung, Verstärkung, Dezibel</b>	<b>3</b>	8.2 Zustandsraumdarstellung (ZRD) im Zeitbereich (S. 255)	7
2.1 Dämpfungsfaktor $D$ (S. 206)	3	8.3 Zustandsraumdarstellung (ZRD) im Laplace-Bereich (S. 264)	7
2.2 Dämpfungsmass $a$ in Dezibel (S. 206)	3	8.4 Ordnung eines Systems (S. 256)	7
2.3 Rechenregeln mit Dezibel	3	8.5 ZRD mit MatLab	7
2.4 Spannungsverstärkungsfaktor (S. 209)	3	8.6 Äquivalente Zustandsraumdarstellung (ZRD) (S. 257)	7
2.5 Umrechnungs-Tabelle Dezibel – Faktor	3	8.7 Matrix $\mathbf{b}\mathbf{m}\mathbf{A}$ diagonalisieren	8
2.6 Relativer und Absoluter Pegel (S. 210)	3	8.8 Einschub – Lineare Algebra: $2 \times 2$ Matrix invertieren	8
<b>3 Frequenzverhalten analoger LTI-Systeme</b>	<b>3</b>	8.9 Lösung der ZRD im Zeitbereich (S. 259-260)	8
3.1 Zusammenhang Frequenzgang – UTF (S. 211)	4	8.10 Fundamentalmatrix (S. 260-263)	8
3.2 Pol- und Nullstellendiagramme (S. 212)	4	8.11 Lösung der ZRD im Zeitbereich – SISO-Systeme (S. 263)	8
3.3 Stabilitätsbetrachtung im Pol- Nullstellendiagramm	4	8.12 Stabilität von ZRDs (S. 275)	8
3.4 Pole in der komplexen Zahlenebene (S. 214)	4	8.13 Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit – Begriffe (S. 277)	9
3.5 Bestimmung Frequenzgang aus UTF (S. 216)	4	8.14 Steuerbarkeit (S. 277)	9
3.6 Bestimmung Frequenzgang aus Pol- / Nullstellendiagramm	4	8.15 Beobachtbarkeit (S. 278)	9
3.7 Vorgehen Frequenzgang aus Pol-NS-Diagramm ermitteln	5	8.16 Standardformen der ZRD (S. 267)	9
3.8 Allpassnetzwerk (S. 220)	5	<b>9 Filter</b>	<b>10</b>
3.9 Minimalphasige- und nicht-minimalphasige Systeme (S. 221)	5	9.1 Grundtypen (S. 291)	10
<b>4 Bodediagramm</b>	<b>5</b>	9.2 Frequenzgang $H(j\omega)$ – Übertragungsfunktion $H(s)$	10
4.1 Bodediagramme mit MatLab	5	9.3 Approximation im Frequenzbereich	10
4.2 Approximationen im Bodediagramm (S. 230)	5	9.4 Ideales Tiefpassfilter (S. 297)	10
4.3 Ergänzung: Konjugiert-komplexe Pole und Nullstellen (S. 228)	6	9.5 Amplitudengang mit char. Funktion $K(\Omega^2)$	10
<b>5 Stabilität im Bodediagramm</b>	<b>6</b>	9.6 Approximation mittels kritisch-gedämpfter Filter (S. 299)	10
5.1 Amplitudenrand und Phasenrand	6	9.7 Standard-Filtertypen – Überblick	10
5.2 Amplitudenrand und Phasenrand im Bodediagramm	6	9.8 Vorgehen Filter dimensionieren / auslegen	11
		9.9 Nomogramme (S. 393)	11
		9.10 Tabellen zum Entwurf von LC-Filtern	11
		9.11 Approximation nach Butterworth (S. 303)	11

## 1 LTI-Systeme (S. 171)

$x(t)$	Eingangssignal
$y(t)$	Ausgangssignal
$\delta(t)$	Dirac-Stoss
$h(t)$	Impulsantwort (Antwort auf Dirac-Stoss)
$H(j\omega)$	Frequenzgang
$ H(j\omega) $	Amplitudengang
$\theta(j\omega)$	Phasengang
$H(s)$	$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)}$ Übertragungsfunktion (UTF)

### 1.1 Zusammenhänge zwischen den Grössen (S. 174-176)

Die Impulsantwort  $h(t)$  und der Frequenzgang  $H(j\omega)$  sind ein **Fourier-Transformationspaar**:



Die Impulsantwort  $h(t)$  und die Übertragungsfunktion  $H(s)$  sind ein **Laplace-Transformationspaar**:

$$h(t) \longleftrightarrow H(s)$$

Das Ausgangssignal berechnet sich als:

$$y(t) = h(t) * x(t) \longleftrightarrow Y(s) = H(s) \cdot X(s)$$

#### 1.1.1 Zusammenhang Impulsantwort - Einheitssprungantwort

$h(t)$	Impulsantwort
$g(t)$	Einheitssprungantwort

$$h(t) = \frac{dg(t)}{dt} \Leftrightarrow g(t) = \int_{-\infty}^t h(\tau) d\tau$$

$$H(s) = s \cdot G(s) \Leftrightarrow G(s) = \frac{1}{s} H(s)$$

#### 1.1.2 Zusammenhang Impulsantwort & Kausalität LTI-System

Damit ein LTI-System kausal ist, muss dessen Impulsantwort  $h(t)$  für alle  $t < 0$  gleich Null sein.

## 1.2 Phasenlaufzeit $\tau_P(\omega)$ (S. 183)

Die Phasenlaufzeit ist nur für **reine Sinus-Schwingungen** exakt bestimmbar!  
Das System ist beschrieben durch:

$$x(t) = A \cdot \sin(\omega_0 t + \gamma)$$

$$H(j\omega) = \alpha \cdot e^{-j\omega t_0} \longleftrightarrow h(t) = \alpha \cdot \delta(t - t_0)$$

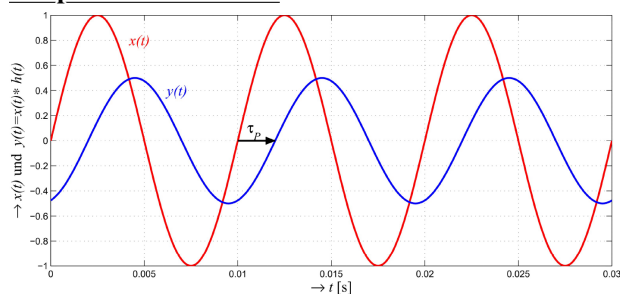
Das Ausgangssignal  $y(t) = x(t) * h(t)$  ist gegenüber dem Eingangssignal  $x(t)$  mit Faktor  $\alpha$  gewichtet und um die Zeit  $t_0$  verzögert.

⇒ Diese Verzögerung wird **Phasenlaufzeit** genannt

$$\tau_P(\omega) = \frac{-\theta(\omega)}{\omega}$$

$\theta(\omega)$  entspricht dem Phasengang des Systems

#### Beispiel: Phasenlaufzeit



#### 1.2.1 Negative Phasenlaufzeit

Eine negative Phasenlaufzeit bedeutet **nicht**, dass ein System **akausal** ist!

## 1.3 Gruppenlaufzeit $\tau_G(\omega)$ (S. 182)

Definiert für Signale mit **mehreren Frequenzanteilen**

Bei amplitudenmodulierten Signalen bestimmt die Gruppenlaufzeit  $\tau_G(\omega)$  die **Verzögerung der Hüllkurve** der AM.

$$\tau_G(\omega) = \frac{-d\theta(\omega)}{d\omega}$$

$\theta(\omega)$  entspricht dem Phasengang des Systems

Die Gruppenlaufzeit kann nur dann als **Laufzeit des Signals** interpretiert werden, wenn im Frequenzbereich des Signales die Gruppenlaufzeit und auch die Dämpfung ungefähr konstant sind.

#### 1.3.1 Negative Gruppenlaufzeit

Bei **Vierpolen** mit **konzentrierten Elementen** ist in bestimmten Frequenzbereichen eine **negative Gruppenlaufzeit** möglich, insbesondere in Frequenzbereichen wo die Dämpfung stark ändert. (z.B. Nullstellen der UTF)

Bei negativer Gruppenlaufzeit erscheint die Wirkung **nicht** vor der Ursache!

⇒ Das System ist **nicht** akausal!

Das Maximum der Hüllkurve am Ausgang kann aber **früher** als am Eingang auftreten.

## 1.4 Phasenlaufzeit / Gruppenlaufzeit identisch (S. 186)

Die **Signalverzögerung**, **Phasenlaufzeit**  $\tau_P(\omega)$  und **Gruppenlaufzeit**  $\tau_G(\omega)$  sind identisch, wenn

$$\theta(\omega) = -\omega \cdot t_0$$

und der **Amplitudengang ebenfalls konstant** ist, d.h.  $H(j\omega) = \alpha \cdot e^{-j\omega t_0}$

Die Signalverzögerung beträgt für **alle Frequenzen**  $t_0 (= \tau_P = \tau_G)$

## 1.5 Verzerrungen (S. 187-188)

Stimmt der zeitliche Verlauf einer Schwingung auf der Empfängerseite nicht mehr mit der Senderseite überein, arbeitet das Übertragungssystem **nicht verzerrungsfrei**.

#### 1.5.1 Lineare Verzerrung

Eine **Dämpfung** eines Signals (z.B. durch einen Tiefpassfilter) entspricht einer **linearen Verzerrung**

#### 1.5.2 Nichtlineare Verzerrung

Nichtlineare Verzerrungen werden durch **Übersteuerung** des Systems (**Kanal**) oder dessen **nichtlineare Kennlinie** hervorgerufen werden.

Durch nichtlineare Verzerrungen treten **neue**, im Ursprungssignal nicht enthaltene **Schwingungen** auf.

Ein **Mass** für nichtlineare Verzerrungen ist der **Klirrfaktor**

## 1.6 Klirrfaktor (S. 189)

Verhältnis des **Effektivwerts** der **neu** am Ausgang eines Systems entstandenen **Harmonischen** zum Effektivwert des gesamten Signals

$$k = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2 + U_2^2 + \dots + U_n^2}}$$

$U_1$  entspricht der Grundharmonischen  
⇒ Es gilt:  $1 > k \geq 0$

#### 1.6.1 Klirrdämpfungsmass

$$a_k = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{1}{k} \right)$$

#### 1.6.2 Total Harmonic Distortion (THD)

Wird vor allem im englisch-sprachigen Raum verwendet

$$\text{THD} = \sqrt{\frac{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}{U_1^2}}$$

$U_1$  entspricht der Grundharmonischen  
⇒ Es gilt:  $\infty > \text{THD} \geq 0$

geringe Verzerrungen:  $\text{THD} \approx k$       allgemein:  $\text{THD} > k$

## 1.7 Verzerrungsfreie Übertragung von Signalen (S. 190)

Frequenzgang  $H(j\omega)$  und Impulsantwort  $h(t)$  eines verzerrungsfreien Signals:

$$H(j\omega) = \alpha \cdot e^{-j\omega t_0} = |H(j\omega)| \cdot e^{j\theta(\omega)} \longleftrightarrow h(t) = \alpha \cdot \delta(t - t_0)$$

Damit ein Signal verzerrungsfrei übertragen wird, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Amplitude** konstant (unabhängig von der Frequenz)  $\Leftrightarrow |H(j\omega)| = \text{konstant} = \alpha \neq 0$   
⇒ Keine Amplitudenverzerrung vorhanden
- Phase** proportional zur Frequenz  $\Leftrightarrow \theta(\omega) = -\omega t_0$   
(äquivalenz zu Abschnitt 1.4) ⇒ Keine Phasenverzerrung vorhanden

1.8 Übertragung stochastischer Signale (s. 193-194)

Wird ein stochastisches Signal  $x(t)$  (schwach stationär) durch ein LTI-System mit Impulsantwort  $h(t)$  übertragen, so berechnet sich das Ausgangssignal  $y(t)$  gemäss Abschnitt 1.1 aus:

$$y(t) = h(t) * x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(t - \tau) \, d\tau \longrightarrow Y(s) = H(s) \cdot X(s)$$

1.8.1 Linearer Mittelwert

Der lineare Mittelwert  $Y_0$  des Ausgangssignals  $y(t)$  bei der Frequenz  $\omega = 0$  entspricht

$$Y(j0) = X(j0) \cdot H(j0) \Rightarrow Y_0 = X_0 \cdot H(j0)$$

$H(j\omega)$  = Frequenzgang und  $X_0$  = linearer Mittelwert von  $x(t)$

1.8.2 Autokorrelationsfunktion (AKF) des Ausgangssignals

Da  $\varphi_{yy}(\tau)$  und  $Y_0$  nicht von  $t$  abhängen, ist auch  $y(t)$  schwach stationär.

$$\varphi_{yy}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\alpha) h(\beta) \varphi_{xx}(\tau + \alpha - \beta) \, d\alpha \, d\beta = h(-\tau) * h(\tau) * \varphi_{xx}(\tau)$$

Es gelten folgende Zusammenhänge für die Fourier-Transformationspaare:

$h(-\tau)$

$\longleftrightarrow$

$H^*(j\omega)$

$\varphi_{xx}(\tau)$

$\longleftrightarrow$

$\Phi_{xx}(j\omega)$

$h(\tau)$

$\longleftrightarrow$

$H(j\omega)$

$h(\tau) * h(-\tau)$

$\longleftrightarrow$

$|H(j\omega)|^2$

1.8.3 Leistungsdichtespektrum (PSD)

Die AKF und das PSD sind ein Fourier-Transformationspaar

$\varphi_{yy}(\tau)$

$\longleftrightarrow$

$\Phi_{yy}(j\omega)$

AKF

PSD

Daraus folgt der Zusammenhang der Leistungsdichtespektren  $\Phi(j\omega)$

$$\Phi_{yy}(j\omega) = |H(j\omega)|^2 \Phi_{xx}(j\omega)$$

Für die AKF des Ausgangssignals  $y(t)$  gilt

$$\varphi_{yy}(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(j\omega)|^2 \Phi_{xx}(j\omega) e^{j\omega\tau} \, d\omega$$

Die Leistung  $Y^2$  des Ausgangssignals  $y(t)$  berechnet sich beim Zeitpunkt  $\tau = 0$  als

$$Y^2 = \varphi_{yy}(0) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |H(j\omega)|^2 \Phi_{xx}(j\omega) \, d\omega$$

1.8.4 Kreuzkorrelationen

Die Kreuzkorrelationsfunktionen  $\varphi_{xy}(\tau)$  und  $\varphi_{yx}(\tau)$  des stochastischen, reellen Eingangssignals  $x(t)$  (Klasse 2b) und des stochastischen Ausgangssignals  $y(t)$  eines LTI-Systems hängen folgendermassen zusammen:

$$\varphi_{xy}(\tau) = h(\tau) * \varphi_{xx}(\tau) \longrightarrow \Phi_{xy}(j\omega) = H(j\omega) \cdot \Phi_{xx}(j\omega)$$

$$\varphi_{yx}(\tau) = h(-\tau) * \varphi_{xx}(\tau) \longrightarrow \Phi_{yx}(j\omega) = H^*(j\omega) \cdot \Phi_{xx}(j\omega)$$

Somit gilt:

$$\varphi_{yx}(\tau) = \varphi_{xy}(-\tau) \longrightarrow \Phi_{yx}(j\omega) = \Phi_{xy}(-j\omega) = \Phi_{xy}^*(j\omega)$$

2 Dämpfung, Verstärkung, Dezibel

Hinweis: Neben Dezibel gibt es ein weiteres Dämpfungs-/ bzw. Verstärkungsmass: Neper Np Auf dieses Mass wird allerdings nicht genauer eingegangen.  $\Rightarrow$  Skript: S.207

2.1 Dämpfungsfaktor  $D$  (s. 206)

Das Verhältnis zwischen Eingangs- und Ausgangssignal wird als Dämpfungsfaktor  $D$  bezeichnet

$D_P = \frac{P_1}{P_2}$

$D_U = \frac{U_1}{U_2}$

$D_I = \frac{I_1}{I_2}$

Die Indizes  $U, P, I$  stehen für die **Effektivwerte** von Spannung, Leistung und Strom.

2.2 Dämpfungsmass  $a$  in Dezibel (s. 206)

Durch **logarithmieren** des Dämpfungsfaktors  $D$  erhält man das Dämpfungsmass  $a$

$a_P = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_1}{P_2} \right)$

$a_U = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_1}{U_2} \right)$

$a_I = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{I_1}{I_2} \right)$

2.2.1 Umrechnung Verstärkungsfaktor – Dezibel

$$\text{dB} = 10 \cdot \log_{10}(v) \Leftrightarrow v = 10^{\frac{\text{dB}}{10}}$$

2.3 Rechenregeln mit Dezibel

- Faktoren multiplizieren  $\Rightarrow$  Dezibel-Werte addieren
- Faktoren dividieren  $\Rightarrow$  Dezibel-Werte subtrahieren

2.4 Spannungsverstärkungsfaktor (s. 209)

Hält man sich strikt an die Definition des Verstärkungsfaktors bzw. die Definition der Dezibel, so würde man für Dämpfungen positive Dezibel-Werte erhalten und für Verstärkungen entsprechend negative Dezibel-Werte. Dies ist gegen die Intuition des Ingenieurs. Somit wurde der **Spannungsverstärkungsfaktor**  $T_U$  definiert. Analog zum Dämpfungsmass  $a$  wird ein **Verstärkungsmass**  $g_U$  definiert.

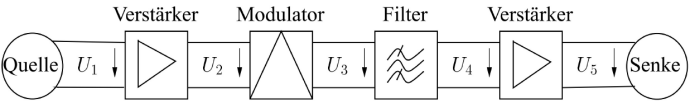
$T_U = \frac{U_2}{U_1}$

$g_U = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_2}{U_1} \right)$

Aus dieser Definition folgt für die Dezibel-Werte:

- **Verstärkung:** ( $U_2 > U_1$ )  $\Rightarrow$  positive Dezibel-Zahl
- **Dämpfung:** ( $U_2 < U_1$ )  $\Rightarrow$  negative Dezibel-Zahl

Beispiel: Kaskadiertes System (s. 209)



$T_{U_{tot}} = \frac{U_2}{U_1} \cdot \frac{U_3}{U_2} \cdot \frac{U_4}{U_3} \cdot \frac{U_5}{U_4} = \frac{U_5}{U_1}$   
 $= \frac{10}{1} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{10}{1} = 50$   
 $a_{U_{tot}} = -20\text{dB} + 3\text{dB} + 3\text{dB} + -20\text{dB} = -34\text{dB}$

Formuliert mit dem Verstärkungsmass  $g$  ergeben sich umgekehrte Vorzeichen:

$$g_{U_{tot}} = -20\text{ dB} + 3\text{ dB} + 3\text{ dB} - 20\text{ dB} = -34\text{ dB}$$

2.5 Umrechnungs-Tabelle Dezibel – Faktor

**Vorgehen:** Gesuchten dB-Wert als Summe / Differenz von bekannten Werten darstellen  $\Rightarrow$  Summanden in Faktoren 'transferieren' und multiplizieren / dividieren

**Vorgehen:** Gesuchten Faktor als Produkt / Quotient von bekannten Werten darstellen  $\Rightarrow$  Faktoren in Summanden 'transferieren' und addieren / subtrahieren

Dezibel	Faktor
20 = 10 + 10	100 = 10 · 10
12	16 = 2 · 2 · 2 · 2
10	10
9 = 3 + 3 + 3	8 = 2 · 2 · 2
8 = 5 – 3	6.4 = 3.2 · 2
7 = 10 – 3	5 = $\frac{10}{2}$
6 = 3 + 3	4 = 2 · 2
5 = 15 – 10	3.2 = $\frac{32}{10} \approx \sqrt{10}$
4 = 10 – 6 = 10 – 3 – 3	2.5 = $\frac{10}{2 \cdot 2}$
3	2
2 = 12 – 10 = 5 – 3	1.6 = $\frac{16}{10}$
1 = 10 – 3 – 3 – 3	1.25 = $\frac{10}{2 \cdot 2 \cdot 2} = \frac{5}{4}$
0	1
–1	0.8 = $\frac{4}{5}$

2.6 Relativer und Absoluter Pegel (s. 210)

Bei den bisher ausgeführten Pegeln handelt es sich um **relative Pegel**. Im Gegensatz dazu beziehen sich **absolute Pegelangaben** immer auf eine Referenzgrösser (erzeugt von einem Normengenerator, siehe Skript).

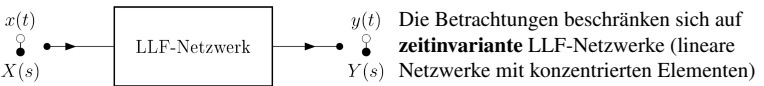
$(L_U)_{\text{rel}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_2}{U_1} \right)$   
 $(L_I)_{\text{rel}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{I_2}{I_1} \right)$   
 $(L_P)_{\text{rel}} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$

$(L_U)_{\text{abs}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{U_2}{774.6\text{ mV}} \right)$   
 $(L_I)_{\text{abs}} = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{I_2}{1.291\text{ mA}} \right)$   
 $(L_P)_{\text{abs}} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_2}{1\text{ mW}} \right)$

2.6.1 Kennzeichnung absoluter Pegel

Notation	Bezugsgrösse	Notation	Bezugsgrösse
dBW	1 W	dBm	1 mW
dBV	1 V	dBμV	1 μW

3 Frequenzverhalten analoger LTI-Systeme



### 3.1 Zusammenhang Frequenzgang – UTF (S. 211)

Alle LTI-Systeme lassen sich mit einer Differentialgleichung der folgenden Form beschreiben:

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m x}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx}{dt} + b_0 x$$

Die Laplace-Transformierte der DGL hat die Form

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{N(s)}{D(s)}$$

$N(s)$	Zählerpolynom mit konstanten, reellen Koeffizienten
$D(s)$	Nennerpolynom mit konstanten, reellen Koeffizienten
$x(t)$	Eingangssignal
$y(t)$	Ausgangssignal

Die Wurzeln der Gleichung  $N(s) = 0$  ergeben  $m$  endliche Nullstellen; die Wurzeln von  $D(s) = 0$  ergeben  $n$  Pole des Systems. **Aus Stabilitätsgründen müssen alle Pole in der linken Halbebene (LHE) liegen!**

#### 3.1.1 Praktische Schreibweise für Pol-/Nullstellen

Um die Pole bzw. Nullstellen des Systems direkt ablesen zu können, wird  $H(s)$  faktorisiert.  
 $\Rightarrow$  Die UTF  $H(s)$  ist durch die Pole, Nullstellen und den Faktor  $K$  **vollständig bestimmt!**

$$H(s) = \underbrace{\frac{b_m}{a_m}}_K \cdot \frac{\prod_{i=1}^m (s - z_i)}{\prod_{j=1}^n (s - p_j)}$$

Da die Wurzeln von Polynomen mit reellen Koeffizienten entweder reell oder konjugiert-komplexe Paare auftreten, ist es meistens sinnvoll, die Systemfunktionen als Produkt von Faktoren 1. und 2. Ordnung mit reellen Koeffizienten darzustellen.

$$H(s) = \underbrace{\frac{b_m}{a_m}}_K \cdot \frac{\prod_{i=1}^r (s^2 + 2\sigma_{zi}s + \omega_{zi}^2) \prod_{i=2r+1}^m (s - z_i)}{\prod_{j=1}^l (s^2 + 2\sigma_{pj}s + \omega_{pj}^2) \prod_{j=2l+1}^n (s - p_j)}$$

**Legende:**

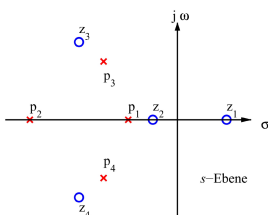
- Beschreibt komplex-konjugierte Nullstellen in der LHE
- Beschreibt reelle Nullstellen in der LHE
- Beschreibt komplex-konjugierte Pole in der LHE
- Beschreibt reelle Pole in der LHE

Alternativ kann  $H(s)$  mittels **Polfrequenzen** und **Polgüten** beschrieben werden:

$$H(s) = \underbrace{\frac{b_m}{a_m}}_K \cdot \frac{\prod_{i=1}^r (s^2 + \frac{\omega_{zi}}{q_{zi}} s + \omega_{zi}^2) \prod_{i=2r+1}^m (s - z_i)}{\prod_{j=1}^l (s^2 + \frac{\omega_{pj}}{q_{pj}} s + \omega_{pj}^2) \prod_{j=2l+1}^n (s - p_j)}$$

$\omega_{pj}$	Polstellenfrequenzen	$\omega_{zi}$	Nullstellenfrequenzen
$q_{pj}$	Polstellengüten	$q_{zi}$	Nullstellengüten

### 3.2 Pol- und Nullstellendiagramme (S. 212)



Werden die Pole und Nullstellen in der komplexen Zahlenebene dargestellt, so spricht man von einem Pol-/Nullstellen-Diagramm.

In Matlab erzeugt der Befehl pzmap einen solchen Plot

Pole	Kreuze
NS	Kreise

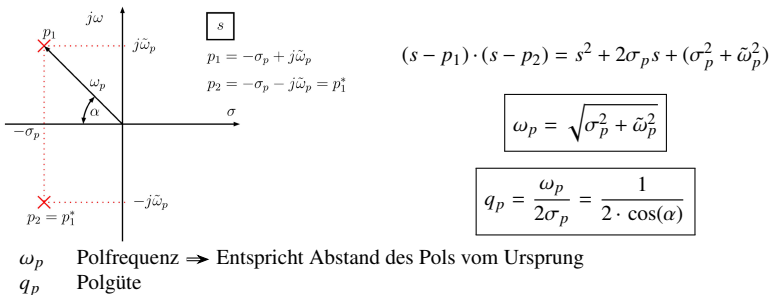
### 3.3 Stabilitätsbetrachtung im Pol- Nullstellendiagramm

Für **Grenzstabilität** gilt eine **UND-Verknüpfung** der aufgeführten Punkte. Für **Stabilität und Instabilität** gilt eine **ODER-Verknüpfung** der aufgeführten Punkte.

- **Stabil:**
  - Alle Polstellen in linker Halbebene (LHE)
  - Keine Polstellen vorhanden
- **Asymptotisch stabil:**
  - Polstellen nur in der linken Halbebene (LHE)
- **Grenzstabil:**
  - **Keine** Polstellen in der rechten Halbebene (RHE)
  - Mindestens eine **einfache Polstelle** auf imaginärer Achse
  - **Keine doppelten** Polstellen auf der imaginären Achse
- **Instabil:**
  - Mindestens eine Polstelle in der rechten Halbebene (RHE)
  - Mindestens eine **mehrfache Polstelle** auf der imaginären Achse

### 3.4 Pole in der komplexen Zahlenebene (S. 214)

#### Beispiel: Polynom 2. Ordnung mit komplex-konjugierten Polen



#### Grenzfälle

$\sigma_p = \omega_p$	Doppelpol auf neg. reeller Achse	$\Rightarrow q_p = \frac{1}{2}$
$\sigma_p = 0$	Polpar auf imaginärer Achse	$\Rightarrow q_p = \infty$

#### 3.4.1 Reelle Pole

$$\omega_p = \sqrt{\sigma_{p1} \cdot \sigma_{p2}}$$

$$q_p = \frac{\sqrt{\sigma_{p1} \cdot \sigma_{p2}}}{\sigma_{p1} + \sigma_{p2}} \leq \frac{1}{2}$$

- $\Rightarrow$  Für einzelne (reelle) Pole ist die Güte  $q_p$  nicht definiert.
- $\Rightarrow$  Die Polfrequenz  $\omega_p$  entspricht dem Abstand zum Ursprung.

#### Identische Werte

$$\sigma_{p1} = \sigma_{p2} \quad |q_p| = \frac{1}{2}$$

#### 3.4.2 Verallgemeinerung des Beispiels (S. 214)



#### Hinweise

- Pole sind als rote Kreuze dargestellt
- Für die NS (Nullstellenfrequenzen, Nullstellengüten) gelten die gleichen geometrischen Beziehungen wie für die Polstellen

### 3.5 Bestimmung Frequenzgang aus UTF (S. 216)

Um den Frequenzgang zu erhalten, kann  $s = j\omega$  eingesetzt werden.

$$H(j\omega) = H(s) \Big|_{s=j\omega} = |H(j\omega)| \cdot e^{j\theta(\omega)}$$

$H(s)$	Übertragungsfunktion (UTF)	$ H(j\omega) $	Amplitudengang
$H(j\omega)$	Frequenzgang	$\theta(\omega)$	Phasengang

Der Frequenzgang bzw. Amplitudengang und Phasengang werden folgendermassen dargestellt:

- **Nyquist-Diagramm**  
 $H(j\omega)$  wird in Polarkoordinaten mit  $\omega$  als Parameter aufgezeichnet
- **Bode-Diagramm**  
 $\alpha_{dB}(\omega)$  und  $\theta(\omega)$  werden je in Funktion von  $\log_{10}(\omega)$  aufgezeichnet

### 3.6 Bestimmung Frequenzgang aus Pol- / Nullstellendiagramm

Durch einsetzen einer beliebigen Auswertungsfrequenz  $j\omega_0$  in die Übertragungsfunktion  $H(s)$  ergibt sich der Frequenzgang  $H(j\omega_0)$  als:

$$H(j\omega_0) = K \cdot \frac{(j\omega_0 - z_1)(j\omega_0 - z_2) \dots (j\omega_0 - z_m)}{(j\omega_0 - p_1)(j\omega_0 - p_2) \dots (j\omega_0 - p_n)} = |H(j\omega_0)| \cdot e^{j\theta(\omega_0)}$$

Die einzelnen Faktoren in Zähler und Nenner können in Betrag und Phase aufgeteilt werden, beispielsweise folgendermassen:

$$(j\omega_0 - p_1) = |j\omega_0 - z_1| \cdot e^{j\theta_{z1}} = A_{z1} \cdot e^{j\theta_{z1}}$$

Angewendet auf alle Faktoren kann der Frequenzgang  $H(j\omega_0)$  in den **Amplitudengang**  $|H(j\omega)|$  und den **Phasengang**  $\theta(\omega)$  separiert werden:

$$H(j\omega_0) = K \cdot \frac{A_{z1} \cdot A_{z2} \dots A_{zm} \cdot e^{j(\theta_{z1} + \dots + \theta_{zm})}}{A_{p1} \cdot A_{p2} \dots A_{pn} \cdot e^{j(\theta_{p1} + \dots + \theta_{pn})}}$$

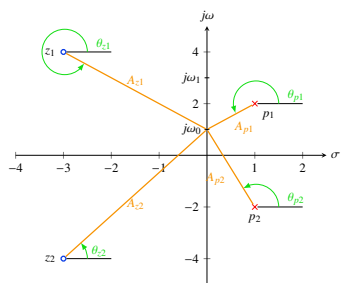
#### Betrag

$$|H(j\omega_0)| = K \cdot \frac{\prod_{i=1}^m A_{zi}}{\prod_{j=1}^n A_{pj}}$$

#### Phase

$$\theta(\omega_0) = \text{Phase von } K + \sum_{i=1}^m \theta_{zi} - \sum_{j=1}^n \theta_{pj}$$

### 3.6.1 Zusammenhang mit Pol- / Nullstellendiagramm



Die Auswertungsfrequenz  $j\omega$  ist variabel und 'wandert' auf der **imaginären Achse**. Für eine bestimmte Auswertungsfrequenz  $j\omega_0$  können die Faktoren von  $H(j\omega_0)$  als **Abstand** und **Phase** zu den Pol- bzw Nullstellen interpretiert werden. Somit kann grafisch aus dem Pol- Nullstellendiagramm ein Rückschluss auf den Amplitudengang gezogen werden.

$$H(j\omega_0) = K \cdot \frac{A_{z1} \cdot A_{z2} \cdot e^{j(\theta_{z1} + \theta_{z2})}}{A_{p1} \cdot A_{p2} \cdot e^{j(\theta_{p1} + \theta_{p2})}}$$

### 3.7 Vorgehen Frequenzgang aus Pol-NS-Diagramm ermitteln

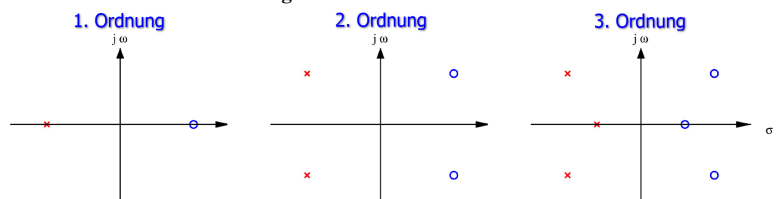
- (Schluss-Steigung = Anzahl Nullstellen – Anzahl Polstellen) · 20 dB/Dek
- Sind im Ursprung **keine** Pole / Nullstellen, so ist die Steigung für tiefe Frequenzen = 0
- Befinden sich am gleichen Ort eine Polstelle **und** eine Nullstelle, so heben sie sich auf
- Einfache reelle Nullstelle: Ab dieser Frequenz Steigung von +20 dB/Dek
- Einfacher reeller Pol: Ab dieser Frequenz Steigung von –20 dB/Dek
- Sind im Pol-NS-Diagramm komplex-konjugierte Polstellen vorhanden, so enthält der Amplitudengang **Überschwinger**
- Sind im Pol-NS-Diagramm komplex-konjugierte Nullstellen vorhanden, so enthält der Amplitudengang **Senken**
- Pole bzw. Nullstellen mit **kleinstem Abstand** zum Ursprung haben am meisten Einfluss

### 3.8 Allpassnetzwerk (S. 220)

Ein Allpass ist ein Netzwerk, bei dem der **Amplitudengang für alle Kreisfrequenzen  $\omega$  konstant** ist

$$|H(j\omega)| = \text{const} \neq 0$$

⇒ Im Pol-Nullstellen-Diagramm ist ein Allpass dargestellt durch eine **zur  $j\omega$ -Achse symmetrische Pol-Nullstellenkonfiguration**



$$\text{UTF Allpass: } H_A(s) = K \cdot \frac{Q(-s)}{Q(s)}$$

Für einen Allpass gilt:

- Ein stabiler Allpass besitzt einen **streng monoton abfallenden** Phasengang
- Jede beliebige (realisierbare) UTF  $H(S)$  kann **immer** in ein allpassfreies Netzwerk  $H_M(s)$  und einen Allpass  $H_A(s)$  **zerlegt** werden (⇒ siehe Beispiel Abschnitt 3.9)

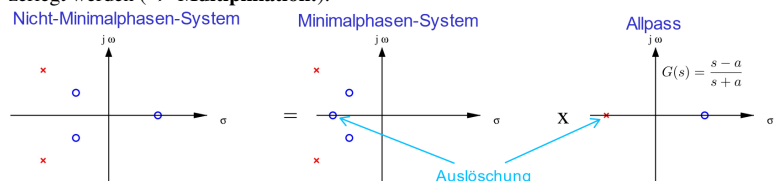
$$H(s) = H_M(s) \cdot H_A(s)$$

### 3.9 Minimalphasige- und nicht-minimalphasige Systeme (S. 221)

- Minimalphasennetzwerke:
  - besitzen **keine Nullstellen in der rechten Halbebene (RHE)**
  - **entweder** ein frei wählbarer Amplituden- **oder** Phasengang
- Nicht-Minimalphasennetzwerke
  - Amplituden- und Phasengang unabhängig voneinander wählbar

#### Beispiel: Zerlegung nicht-minimalphasiges System

Ein nicht-minimalphasiges System kann in ein minimalphasiges System und einen Allpass zerlegt werden (⇒ **Multiplikation!**).



### 4 Bodediagramm

Beispiele verschiedener Bodediagramme und zugehöriger Pol-Nullstellen-Diagramme siehe Skript, Kapitel 5.4.3 (S. 222)

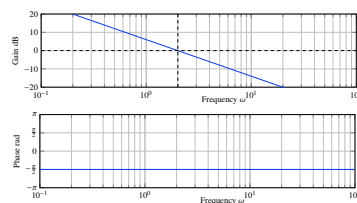
#### 4.1 Bodediagramme mit Matlab

```
1 s = tf('s');
2 G = 1 + 0.1 * s; % UTF des Systems
3 bode(G) % Bode-Plot des Systems
4 bodemag(G) % Amplitudengang des Systems
```

### 4.2 Approximationen im Bodediagramm (S. 230)

#### 4.2.1 Pol im Ursprung

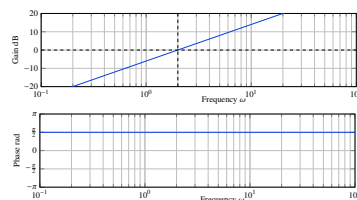
$$H(s) = \frac{\alpha}{s} = \frac{2}{s}$$



- Betrag = Gerade mit Steigung –20 dB/Dek, Schnittpunkt mit 0 dB-Linie bei  $\omega = \alpha$
- Phase  $-\frac{\pi}{2} = \text{const}$

#### 4.2.2 Nullstelle im Ursprung

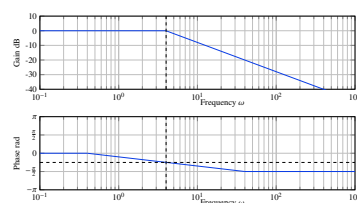
$$H(s) = \alpha \cdot s = 3 \cdot s$$



- Betrag = Gerade mit Steigung +20 dB/Dek, Schnittpunkt mit 0 dB-Linie bei  $\omega = \frac{1}{\alpha}$
- Phase  $+\frac{\pi}{2} = \text{const}$

#### 4.2.3 Reeller Pol

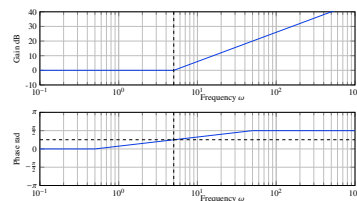
$$H(s) = \frac{\alpha}{s + \alpha} = \frac{1}{\frac{s}{\alpha} + 1} = \frac{4}{s + 4}$$



- Betrag = Konstante mit Wert 0 dB von  $\omega = 0$  bis  $\omega = \alpha$ ; für  $\omega > \alpha$  Gerade mit Steigung –20 dB/Dek durch Punkt mit Amplitude 0 dB und  $\omega = \alpha$
- Phase = Konstante mit Wert 0 bis  $\omega < \frac{\alpha}{10}$ ; für  $\omega > 10\alpha$  Konstante mit Wert  $-\frac{\pi}{2}$ ; dazwischen eine Gerade (bei  $\omega = \alpha$  beträgt Phase  $-\frac{\pi}{4}$ )

#### 4.2.4 Reelle Nullstelle

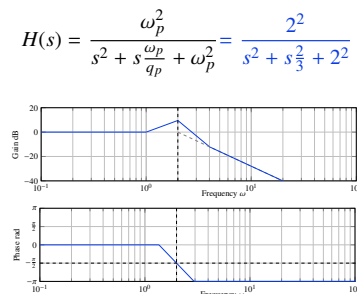
$$H(s) = \frac{s + \alpha}{\alpha} = \frac{s}{\alpha} + 1 = \frac{s + 5}{5}$$



- Betrag = Konstante mit Wert 0 dB von  $\omega = 0$  bis  $\omega = \alpha$ ; für  $\omega > \alpha$  Gerade mit Steigung +20 dB/Dek durch Punkt mit Amplitude 0 dB und  $\omega = \alpha$
- Phase = Konstante mit Wert 0 bis  $\omega < \frac{\alpha}{10}$ ; für  $\omega > 10\alpha$  Konstante mit Wert  $+\frac{\pi}{2}$ ; dazwischen eine Gerade (bei  $\omega = \alpha$  beträgt Phase  $+\frac{\pi}{4}$ )

#### 4.2.5 Konjugiert-komplexe Pole

$$\text{Voraussetzung: } |q_p| > \frac{1}{2}$$



Betrag zeichnen

1. 0 dB von  $\omega = 0$  bis  $\omega = \frac{\omega_p}{2}$
2.  $-40 \frac{\text{dB}}{\text{Dek}}$  fein einzeichnen ab  $\omega_p$   
→ stark zeichnen ab  $\omega = 2 \cdot \omega_p$
3. Maximalwert =  $20 \cdot \log_{10}(q_p)$  bei  $\omega_p$
4. Gerade von  $\omega = \frac{\omega_p}{2}$  zu Maximalwert
5. Gerade von Maximalwert zu  $\omega = 2 \cdot \omega_p$

Phase zeichnen

1. 0 bis  $\omega < \frac{\omega_p}{10^{2q_p}}$
2.  $-\pi$  ab  $\omega > \omega_p \cdot 10^{2q_p}$
3. Gerade zwischen 0 und  $\pi$  Geraden
4.  $(-\frac{\pi}{2})$  bei  $\omega = \omega_p$



4.2.6 Konjugiert-komplexe Nullstellen

Voraussetzung:  $|q_z| > \frac{1}{2}$

$$H(s) = \frac{s^2 + s \frac{\omega_z}{q_z} + \omega_z^2}{\omega_z^2} = \frac{s^2 + s \frac{2}{3} + 2^2}{2^2}$$

Gain dB

Phase rad

Frequency  $\omega$

Betrag zeichnen

- 0 dB von  $\omega = 0$  bis  $\omega = \frac{\omega_z}{2}$
- +40  $\frac{\text{dB}}{\text{Dek}}$  fein einzeichnen ab  $\omega_z$   
→ stark zeichnen ab  $\omega = 2 \cdot \omega_z$
- Minimalwert =  $-20 \cdot \log_{10}(q_z)$  bei  $\omega_z$
- Gerade von  $\omega = \frac{\omega_z}{2}$  zu Minimalwert
- Gerade von Minimalwert zu  $\omega = 2 \cdot \omega_z$

Phase zeichnen

- 0 bis  $\omega < \frac{\omega_z}{10 \cdot 2q_z}$
- + $\pi$  ab  $\omega > \omega_z \cdot 10 \frac{1}{2q_z}$
- Gerade zwischen 0 und  $-\pi$  Geraden
- ( $\frac{\pi}{2}$  bei  $\omega = \omega_z$ )

Hinweis: Berechnungs-Tabelle aus Skript, S. 235

$q_p$	0.5	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10	20	50	100
$10^{\frac{1}{20}q_p}$	10	3.16	2.15	1.78	1.47	1.33	1.26	1.21	1.15	1.12	1.06	1.02	1.01
$10^{-\frac{1}{20}q_p}$	0.1	0.316	0.464	0.562	0.681	0.750	0.794	0.825	0.866	0.891	0.944	0.977	0.989

4.2.7 Konstanter Faktor

- $H(s) = \alpha \cdot e^{j\beta} = 3 \cdot e^{j\frac{\pi}{2}}$ 
  - Betrag =  $20 \cdot \log_{10}(\alpha) = \text{const}$
  - Phase =  $\beta = \text{const}$

4.2.8 Weitere Bemerkungen

- Inverser Frequenzgang:**
  - Amplitudengang an 0 dB-Linie spiegeln
  - Phasengang an 0 rad- bzw. 0°-Linie spiegeln
- Serieschaltung von mehreren Teilsystemen**
  - Erfolgt durch **grafische Addition** der einzelnen Systeme
- Bei Knickpunkten ist Approximationsfehler am grössten

4.3 Ergänzung: Konjugiert-komplexe Pole und Nullstellen (S. 228)

Ein Tiefpass 2. Ordnung enthält eine Überhöhung und somit ein absolutes Maximum.

UTF Tiefpass 2. Ordnung:  $H(s) = \frac{\omega_p^2}{s^2 + s \frac{\omega_p}{q_p} + \omega_p^2}$

Frequenz beim Maximum:  $\omega_{\max} = \omega_p \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{2q_p^2}} = \sqrt{\omega_p^2 - 2\sigma_p^2}$

Höhe des Maximums:  $|H(\omega_{\max})| = \frac{q_p}{\sqrt{1 - \frac{1}{4q_p^2}}}$

⇒ Es gilt:  $\omega_{\max} \leq \omega_p$

4.3.1 Spezialfall  $q = 1$

Frequenz:  $\omega_{\max} = \omega_p \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{2}} = \frac{\omega_p}{\sqrt{2}}$

Höhe:  $|H(\omega_{\max})| = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{4}}} = 1.15$

4.3.2 Spezialfall  $q = \frac{1}{2}$

Frequenz:  $\omega_{\max} = \omega_p \cdot \sqrt{1 - \frac{1}{2(\frac{1}{2})^2}} = \omega_p \cdot \sqrt{1 - 2} \in \mathbb{C}$

Höhe:  $|H(\omega_{\max})| = \infty$

4.3.3 Spezialfall  $q = \frac{1}{\sqrt{2}}$

Frequenz:  $\omega_{\max} = 0$

Höhe:  $|H(\omega_{\max})| = q_p = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow 3 \text{ dB}$

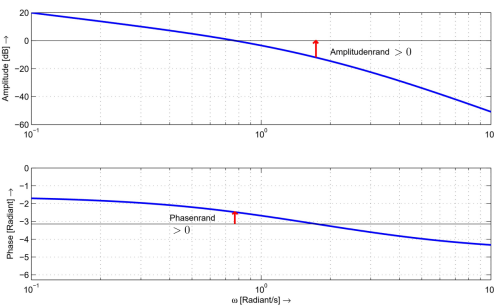
5 Stabilität im Bodediagramm

Es gilt, dass wenn der **offene** Regelkreis  $H(s)$  nur Pole in der linken  $s$ -Halbebene hat (und höchstens zwei Pole im Ursprung bei  $s = 0$ ), der **geschlossene** Regelkreis genau dann **asymptotisch stabil** ist, wenn  $H(j\omega)$  für die **Durchgangsfrequenz**  $\omega_D$  bei der die Amplitude  $20 \cdot \log_{10}(|H(j\omega_D)|) = 0 \text{ dB}$  ist, und eine Phase  $> -\pi$  hat.  
⇒ Amplitudenrand und Phasenrand müssen  $> 0$  sein, damit das System stabil ist!

5.1 Amplitudenrand und Phasenrand

- Amplitudenrand (Verstärkungsreserve)**
  - Abstand des Amplitudengangs zur 0 dB-Linie bei der Kreisfrequenz  $\omega$ , bei der die Phase gleich  $-\pi$  bzw.  $-180^\circ$  ist.
- Phasenrand (Phasenreserve)**
  - Abstand des Phasengangs zur  $-\pi$ -Linie bei der Kreisfrequenz  $\omega$ , bei der die Amplitude gleich 0 dB ist.

5.2 Amplitudenrand und Phasenrand im Bodediagramm



Das System ist **stabil**, da sowohl Amplitudenrand als auch Phasenrand  $> 0$  sind.

6 Ortskurve (Nyquist-Diagramm) (S. 240)

Bei der Ortskurve werden alle komplexen Werte des Frequenzganges in Abhängigkeit der Frequenz  $f$  (aufsteigende Werte von  $f$ ) in der **komplexen Ebene** eingetragen. Ortskurven werden vor allem in der Regelungstechnik dazu verwendet, um die **Stabilität** eines geschlossenen Regelkreises abzuschätzen.  
Auf die Konstruktion von Ortskurven wird im Modul Regelungstechnik 2 im Detail eingegangen. Darum soll hier nur auf die Beschreibung im Skript (S. 240 - 242) verwiesen werden.

6.1 Nyquistdiagramme mit MatLab

```
1 s = tf('s');  
2 G = 1 + 1/s; % UTF des Systems  
3 nyquist(G)
```

7 Stabilität im Nyquist-Diagramm

Die Idee des Nyquist-Kriteriums ist es, anhand der **Ortskurve**  $H(s)$  (**offener Regelkreis**) einen Aussage über die **Stabilität** des (**geschlossenen Regelkreises**) zu machen.  
Ausserdem kann mittels **Amplitudenrand** und **Phasenrand** eine **relative Aussage** über die Stabilität des Systems gemacht werden.

7.1 Offener und geschlossener Regelkreis

$$H_{\text{geschlossen}}(s) = \frac{H(s)}{1 + H(s)} = \frac{N(s)}{D(s) + N(s)}$$

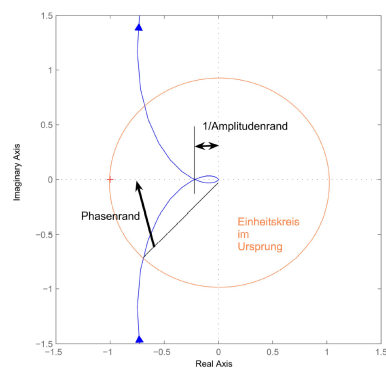
7.2 Vereinfachtes Nyquist-Kriterium

Ist der **offene** Regelkreis  $H(s)$  **asymptotisch stabil** (alle Pole in der LHE), so ist der **geschlossene** Regelkreis  $\frac{H(s)}{1+H(s)}$  asymptotisch stabil, wenn die **Ortskurve** des **offenen** Regelkreises den kritischen Punkt  $(-1, j0)$  mit wachsender Frequenz weder umkreist noch durchläuft, sondern 'links liegen lässt'.

7.3 Amplitudenrand und Phasenrand (Verstärkungsreserve)

- Mit dem Amplitudenrand und dem Phasenrand kann ausgesagt werden, um wieviel entweder die **Verstärkung** oder die **Phase** erhöht werden kann, bis der geschlossene Regelkreis **instabil** (bzw. **grenzstabil**) wird.
- Amplitudenrand (Verstärkungsreserve)**
    - Frequenz, bei welche die **negative** reelle Achse geschnitten wird:  $\omega_\pi$
    - Bei  $\omega_\pi$ :  $\frac{1}{\text{Amplitudenrand}}$  = Abstand zum Ursprung
  - Phasenrand (Phasenreserve)**
    - Frequenz, bei welche Eintritt in den Einheitskreis erfolgt:  $\omega_D$
    - Bei  $\omega_D$ : Winkel bis zu  $180^\circ$

## 7.4 Amplitudenrand und Phasenrand im Nyquist-Diagramm



Das System ist **stabil**, da der kritische Punkt  $(-1, j0)$  'links' liegen gelassen wird, wenn man sich mit aufsteigender Frequenz auf der Ortskurve bewegt.

Es kann auch argumentiert werden, dass das System stabil ist, da sowohl Amplitudenrand als auch Phasenrand  $> 0$  sind.

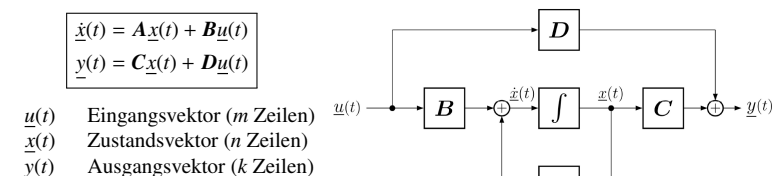
## 8 Zustandsraumdarstellung (ZRD)

**Grundidee:** Differentialgleichung  $n$ . Ordnung eines Systems durch ein **Differentialgleichungssystem** von  $n$  Gleichungen 1. Ordnung darzustellen.

### 8.1 Vorteile der ZRD (S. 253-254)

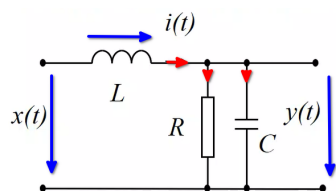
- Innere Systemstabilitäten können erkannt werden, die bei der Untersuchung der UTF nicht festgestellt werden können  $\Rightarrow$  Einblick in den **inneren Aufbau** eines Systems
- Wichtig in der Regelungstechnik
- ZRD hat Vorteile bei der **numerischen** Behandlung von Systemen
- Beschreibung durch **Energiespeicher**, in der Elektrotechnik  $L$  und  $C$
- Nur Integratoren** werden verwendet, keine Differentiatoren

### 8.2 Zustandsraumdarstellung (ZRD) im Zeitbereich (S. 255)



- obere Gleichung: **Zustandsgleichung**
- untere Gleichung: **Ausgangsgleichung**
- A Systemmatrix** ( $n \times n$ -Matrix)  
Sie bestimmt das Verhalten des **ungestörten Systems** ( $\underline{u}(t) = 0$ ) und bestimmt z.B. die innere Stabilität des gesamten Systems.
- B Eingangsmatrix (Steuermatrix)** ( $n \times m$ -Matrix)  
Sie bestimmt die Wirkung der **Steuergrößen**  $\underline{u}(t)$  auf die **Zustandsgrößen**  $\underline{x}(t)$
- C Ausgangsmatrix (Beobachtungsmatrix)** ( $k \times n$ -Matrix)  
Sie kennzeichnet die Abhängigkeit des **Zustandes**  $\underline{x}(t)$  von der beobachtbaren Ausgangsgrösse  $\underline{y}(t)$
- D Durchgangsmatrix** ( $k \times m$ -Matrix)  
Sie bestimmt die unmittelbare Wirkung der Eingangsgrösse  $\underline{u}(t)$  auf den Ausgang  $\underline{y}(t)$

### Beispiel: ZRD aus Schaltung aufstellen



- DGL Induktivität:  $\frac{di_L(t)}{dt} = \frac{u_L(t)}{L}$   
 $\Rightarrow u_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt}$
- DGL Kapazität:  $\frac{du_C(t)}{dt} = \frac{i_C(t)}{C}$   
 $\Rightarrow u_C(t) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i(\tau) d\tau$

Beide Gleichungen in ihre differentielle Form bringen (zweite Gleichung ableiten)

Gleichungen umformen, sodass die ZRD aufgestellt werden kann

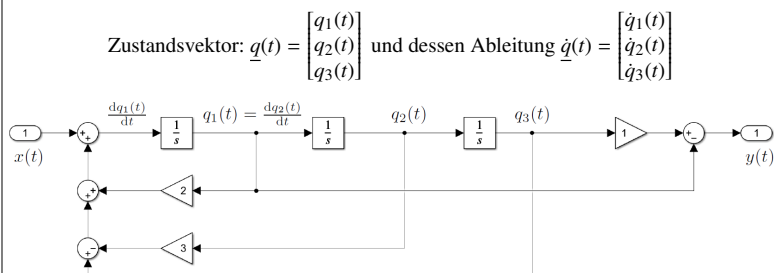
Zustände:  $i(t), y(t)$   
 Eingang:  $x(t)$   
 Ausgang:  $\tilde{y}(t) = y(t)$

$$\begin{bmatrix} \dot{i}'(t) \\ \dot{y}'(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}}_A \cdot \begin{bmatrix} i(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}}_B \cdot x(t)$$

$$\tilde{y}(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \cdot \begin{bmatrix} i(t) \\ y(t) \end{bmatrix} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}}_D \cdot x(t)$$

## Beispiel: ZRD aus Signalfussdiagramm aufstellen

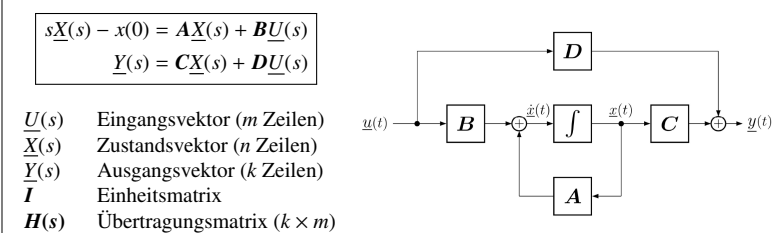
Das ZRD zu folgendem System soll aufgestellt werden. Dazu müssen die Matrizen  $A, B, C$  und  $D$  gefunden werden.



$$\begin{bmatrix} \dot{q}_1(t) \\ \dot{q}_2(t) \\ \dot{q}_3(t) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 2 & -3 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{bmatrix}}_{\underline{q}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_B \cdot x(t)$$

$$y(t) = \underbrace{\begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} q_1(t) \\ q_2(t) \\ q_3(t) \end{bmatrix}}_{\underline{q}(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix}}_D \cdot x(t)$$

### 8.3 Zustandsraumdarstellung (ZRD) im Laplace-Bereich (S. 264)



Mit Anfangsbedingungen  $\underline{x}(0) = 0$  ergibt sich folgender Zusammenhang, was der Übertragungsfunktion (UTF) entspricht, aber im allgemeinen Fall eine **Matrix** ist.

$$\underline{Y}(s) = \underbrace{(\underline{C}(\underline{s}\underline{I} - \underline{A})^{-1}\underline{B} + \underline{D})}_{\underline{H}(s)} \underline{U}(s)$$

**Hinweis:** Aus einem Signalfussdiagramm (SFD) ist es meist sehr einfach, die gesuchten Größen der ZRD zu finden.

### 8.3.1 Übertragungsmatrix und Übertragungsfunktion (S. 266)

- | Übertragungsmatrix   | Übertragungsfunktion   |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>MIMO-Systeme</li> <li>Beschreibung in Matrizenform</li> </ul>                                     | <ul style="list-style-type: none"> <li>SISO-Systeme</li> <li>Matrix-Form wird zu 'normaler' Gleichung</li> </ul> |
| $Y(s) = H(s) \cdot U(s)$   | $Y(s) = H(s) \cdot U(s)$   |
| <ul style="list-style-type: none"> <li><math>H(s)</math> hat gleiche Grösse (Dimensionen) wie Durchgangsmatrix <math>D</math></li> </ul> |  |

### 8.4 Ordnung eines Systems (S. 256)

Die **Ordnung** eines Systems definiert die **kleinste Anzahl von Zustandsgrößen**  $x(t)$ . Äquivalent dazu kann die Ordnung eines Systems auch als die **Anzahl der unabhängigen Energiespeicher** definiert werden.

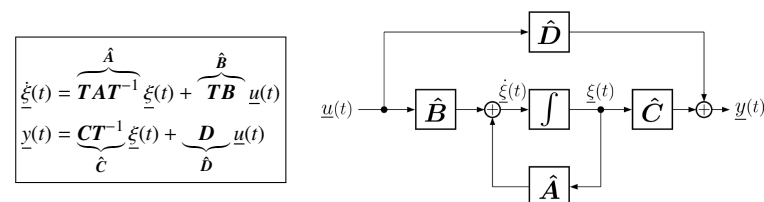
### 8.5 ZRD mit Matlab

$$H(s) = \frac{b_i s^i + b_{i-1} s^{i-1} \dots b_1 s^1 + b_0}{a_i s^i + a_{i-1} s^{i-1} \dots a_1 s^1 + a_0}$$

- `[b, a] = ss2tf(A,B,C,D)` %  $H(s)$  aus Matrizen berechnen
- `(A,B,C,D) = tf2ss(b, a)` % Matrizen aus  $H(s)$  berechnen

### 8.6 Äquivalente Zustandsraumdarstellung (ZRD) (S. 257)

Mit einer **Transformationsmatrix**  $T$  ( $n \times n$ -Matrix, nicht singular,  $TT^{-1} = I = T^{-1}T$ ) kann man **verschiedenste Zustandsgrößen und Zustandsraumdarstellungen** erhalten, die aber alle ein **identisches Systemverhalten** aufweisen.



Die obige ZRD ist **äquivalent** zur ZRD aus Abschnitt 8.2 bezüglich  $\underline{y}(t)$  und  $\underline{u}(t)$ . Die bedeutet, dass die **Zustandsgrößen**  $\underline{\xi}(t)$  und  $\underline{x}(t)$  **willkürlich** gewählt werden können, solange  $\mathbf{T}$  nicht singular ist (Determinante von  $\mathbf{T} \neq 0$ )

Physikalisch sinnvolle Zustandsgrößen sind:

- Spannungen über Kapazitäten
- Ströme durch Induktivitäten

8.7 Matrix A diagonalisieren

Oft wird die **Systemmatrix**  $\mathbf{A}$  diagonalisiert, um **entkoppelte Zustände** zu erhalten. Anstelle der Matrix  $\hat{\mathbf{A}} = \mathbf{TAT}^{-1}$  wird dann üblicherweise  $\mathbf{A}_{\text{diag}}$  verwendet.

- $\lambda_i$  Eigenwerte der Matrix  $\mathbf{A}$
- $\vec{v}_i$  Eigenvektoren der Matrix  $\mathbf{A}$
- $\mathbf{V}$  Matrix mit Eigenvektoren von  $\mathbf{A}$
- $\mathbf{A}_{\text{diag}} = \mathbf{\Lambda}$  Diagonalisierte Matrix  $\mathbf{A}$  mit Eigenwerten  $\lambda_i$  auf Diagonale
- $\mathbf{T}$  Transformationsmatrix

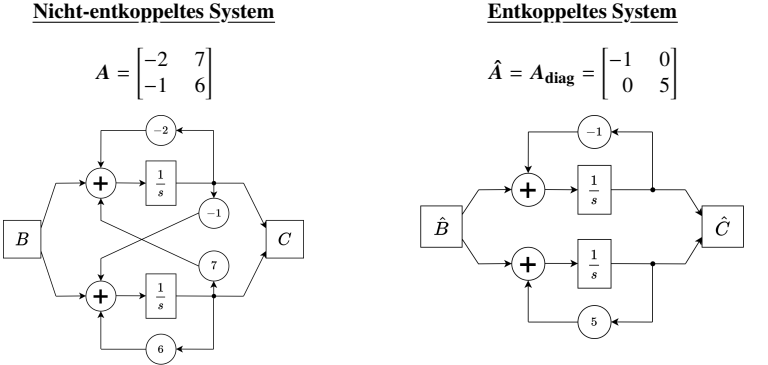
$$\mathbf{A}_{\text{diag}} = \mathbf{\Lambda} = \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{V}$$

$$\begin{matrix} \mathbf{T} = \mathbf{V}^{-1} \\ \mathbf{T}^{-1} = \mathbf{V} \end{matrix}$$

8.7.1 Vorgehen Matrix diagonalisieren

- Ansatz:  $\mathbf{A} \cdot \vec{v} = \lambda \cdot \vec{v} \Rightarrow (\mathbf{A} - \lambda \mathbf{I}) \cdot \vec{v} = \vec{0}$  bzw.  $(\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}) \cdot \vec{v} = \vec{0}$
- Determinante des charakteristischen Polynoms Null setzen:  $|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}| = 0 \Rightarrow$  Eigenwerte  $\lambda_i$
- Für jeden gefundenen Eigenwert müssen Eigenvektoren  $\vec{v}_i$  gefunden werden:
  - Eigenwert  $\lambda_i$  in Gleichungssystem  $(\lambda_i \mathbf{I} - \mathbf{A}) \cdot \vec{v}_i = \vec{0}$  einsetzen
  - Einen Wert von  $\vec{v}_i = 1$  wählen und Eigenvektor  $\vec{v}_i$  als Spaltenvektor schreiben
- Matrix  $\mathbf{V}$  aus Eigenvektoren 'zusammenbauen'
- Matrix  $\mathbf{\Lambda}$  'zusammenbauen', indem man Eigenwerte  $\lambda_i$  auf Diagonale schreibt

8.7.2 Entkoppeltes vs. nicht-entkoppeltes System



8.8 Einschub – Lineare Algebra: 2x2 Matrix invertieren

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \qquad \mathbf{A}^{-1} = \frac{1}{\det(\mathbf{A})} \cdot \begin{bmatrix} d & -b \\ -c & a \end{bmatrix} \quad \text{mit } \det(\mathbf{A}) = ad - bc$$

Beispiel: Matrix-Diagonalisierung (S. 258)

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -2 & 7 \\ -1 & 6 \end{bmatrix} \qquad |\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}| = \begin{vmatrix} \lambda + 2 & -7 \\ 1 & \lambda - 6 \end{vmatrix} = (\lambda + 2) \cdot (\lambda - 6) - 7 \cdot (-1) = 0$$

$\Rightarrow$  Mitternachtsformel liefert die Eigenwerte  $\lambda_1 = -1$  und  $\lambda_2 = 5$

Ersten Eigenwert  $\lambda_1 = -1$  in  $(\lambda_1 \mathbf{I} - \mathbf{A}) \cdot \vec{v}_1 = \vec{0}$  einsetzen

$$1 \cdot v_{11} - 7 \cdot v_{21} = 0$$
$$1 \cdot v_{11} - 7 \cdot v_{21} = 0$$

Wähle  $v_{21} = 1 \Rightarrow \vec{v}_1 = \begin{bmatrix} 7 \\ 1 \end{bmatrix}$

Gleichen Vorgehen für zweiten Eigenvektor  $\vec{v}_2$

$$\mathbf{\Lambda} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 \\ 0 & \lambda_2 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{V} = \begin{bmatrix} \vec{v}_1 & \vec{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} \\ v_{21} & v_{22} \end{bmatrix}$$

8.9 Lösung der ZRD im Zeitbereich (S. 259-260)

Die Zustandsgleichung  $\dot{\underline{x}}(t) = \mathbf{A}\underline{x}(t) + \mathbf{B}\underline{u}(t)$  ist eine Differentialgleichung. Sie soll mit dem Ansatz einer Exponentialfunktion gelöst werden. Für Systeme mit nur einem Zustand würde man den Ansatz  $\underline{x}(t) = e^{at}$  wählen. Da im Allgemeinen Systeme mit mehreren Zuständen betrachtet werden, wird der folgende Ansatz gewählt:

$$e^{At} = \mathbf{I} + \mathbf{A}t + \frac{\mathbf{A}^2}{2!}t^2 + \dots + \frac{\mathbf{A}^k}{k!}t^k + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\mathbf{A}^k t^k}{k!}$$

Der Ansatz ist beschrieben als desser **Taylor-Reihe**. Durch einsetzen des Ansatzes in die Zustandsgleichung ergibt sich für den Ausgangsvektor  $\underline{y}(t)$  die folgende Lösung der ZRD im Zeitbereich

$$\underline{y}(t) = \mathbf{C} \mathbf{\Phi}(t) \underline{x}(0) + \int_0^t \mathbf{C} \mathbf{\Phi}(t - \tau) \mathbf{B} \underline{u}(\tau) \, d\tau + \mathbf{D} \underline{u}(t)$$

**Hinweis:**  $\mathbf{\Phi}(t) = e^{At}$  heisst **Fundamentalmatrix**.

8.10 Fundamentalmatrix (S. 260-263)

Die Fundamentalmatrix (auch Transitionsmatrix genannt) ist definiert als

$$e^{\mathbf{A} \cdot t} = \mathbf{\Phi}(t)$$

Sie wird benötigt, um die Zustandsraumdarstellung im **Zeitbereich** zu lösen. Es gibt mehrere Methoden, die quadratische ( $n \times n$ ) Fundamentalmatrix zu bestimmen

8.10.1 Methode 1 – Inverse Laplace-Transformation

$$\mathbf{\Phi}(t) = \mathcal{L}^{-1}\left\{ (s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \right\}$$

Beispiel: Methode 1 – Inverse Laplace-Transformation

Mit der **Systemmatrix**  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}$  ergibt sich  $(s\mathbf{I} - \mathbf{A}) = \begin{bmatrix} s+1 & 0 \\ -1 & s+2 \end{bmatrix}$

Somit ist  $(s\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} = \frac{\begin{bmatrix} s+1 & 0 \\ -1 & s+2 \end{bmatrix}}{(s+1)(s+2)} \circ \bullet \begin{bmatrix} e^{-t} & 0 \\ e^{-t} - e^{-2t} & e^{-2t} \end{bmatrix} = \mathbf{\Phi}(t)$

8.10.2 Methode 2 – Diagonalisierung von  $\mathbf{\Phi}(t)$

$$\mathbf{\Phi}(t) = e^{\mathbf{A} \cdot t} = \underbrace{\begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t} & \dots & 0 \\ & e^{\lambda_2 t} & \vdots \\ 0 & \dots & e^{\lambda_n t} \end{bmatrix}}_{\mathbf{\Phi}_{\text{diag}}(t)} \cdot \mathbf{V}^{-1}$$

Wenn  $\mathbf{A}_{\text{diag}} = \mathbf{V}^{-1} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{V}$  ist und  $\lambda_i$  die Eigenwerte von  $\mathbf{A}$  sind

8.10.3 Methode 3 – Spektrale Zerlegung

$\Rightarrow$  Nicht in Vorlesung behandelt

8.10.4 Methode 4 – Satz von Cayley-Hamilton

$\Rightarrow$  Nicht in Vorlesung behandelt

8.10.5 Methode 5 – Definition der Reihenentwicklung

Die Matrix  $\mathbf{A}$  sei definiert als eine **Dreiecksmatrix** mit Parametern  $a$  und  $c$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 1 & c \end{bmatrix}$$

Die Potenz der Matrix wird berechnet aus

$$\mathbf{A}^k = \begin{bmatrix} a & 0 \\ 1 & c \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} a^k & 0 \\ \sum_{l=0}^{k-1} a^{k-l-1} & c^k \end{bmatrix}$$

8.10.6 Eigenschaften der Fundamentalmatrix  $\mathbf{\Phi}(t)$

$\mathbf{\Phi}(0) = \mathbf{I}$	$e^{\mathbf{A} \cdot 0} = \mathbf{I}$
$\mathbf{\Phi}^{-1}(t) = \mathbf{\Phi}(-t)$	$(e^{\mathbf{A} \cdot t})^{-1} = e^{-\mathbf{A} \cdot t}$
$\mathbf{\Phi}^k(t) = \mathbf{\Phi}(kt)$	$(e^{\mathbf{A} \cdot t})^k = e^{\mathbf{A} \cdot k \cdot t}$
$\mathbf{\Phi}(t_1) \cdot \mathbf{\Phi}(t_2) = \mathbf{\Phi}(t_1 + t_2)$	$e^{\mathbf{A} \cdot t_1} \cdot e^{\mathbf{A} \cdot t_2} = e^{\mathbf{A}(t_1+t_2)}$
$\mathbf{\Phi}(t_2 - t_1) \cdot \mathbf{\Phi}(t_1 - t_0) = \mathbf{\Phi}(t_2 - t_0)$	$e^{\mathbf{A}(t_2-t_1)} \cdot e^{\mathbf{A}(t_1-t_0)} = e^{\mathbf{A}(t_2-t_0)}$

**Hinweis:**  $(\mathbf{\Phi}(t))$  ist stets invertierbar)

8.10.7 Fundamentalmatrix in Matlab

1

syms t

% t als symbolischer Wert

2

A = [0 6; 1 5];

% Matrix A

3

expm(A\*t)

% Fundamentalmatrix

8.11 Lösung der ZRD im Zeitbereich – SISO-Systeme (S. 263)

Die Impulsantwort  $h(t)$  eines SISO-Systems ist gegeben durch

$$\begin{matrix} y(t) = \mathbf{C} \mathbf{\Phi}(t) \mathbf{B} * u(t) + \mathbf{D} u(t) = h(t) * u(t) \\ h(t) = \mathbf{C} \mathbf{\Phi}(t) \mathbf{B} + \mathbf{D} \delta(t) \end{matrix}$$

8.12 Stabilität von ZRDs (S. 275)

Ein LTI-System ist **asymptotisch stabil**, wenn alle Pole in der linken Halbebene liegen (bzw. einen negativen Realteil haben). Unter Betrachtung der ZRD wird diese Bedingung interpretiert als: Wenn alle **Eigenwerte** der **Systemmatrix**  $\mathbf{A}$  einen **negativen Realteil** besitzen, ist das System **asymptotisch stabil**.

$$|\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}| = 0 \quad \rightarrow \quad \forall \lambda \quad \text{Re}\{\lambda\} < 0$$

**Achtung: Umgekehrt gilt diese Aussage nicht!** Ein asymptotisch stabiles LTI-System bedeutet **nicht**, dass alle Eigenwerte der Systemmatrix  $\mathbf{A}$  des Systems einen negativen Realteil besitzen.  
 $\Rightarrow$  Pol-/Nullstellenkürzungen



8.13 Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit – Begriffe (S. 277)

Beobachtbarkeit der Zustände

- Ein System ist **beobachtbar**, wenn wir, gegeben das Eingangssignal  $\underline{u}(t)$  und das Ausgangssignal  $y(t)$ , über eine endliche Zeitspanne  $0 \geq t \geq t_1$  die Zustände  $\underline{x}(t)$  eindeutig bestimmen können.
- Ein System ist **nicht beobachtbar**, wenn es Zustände  $\underline{x}(t)$  gibt, die **keinen** Einfluss auf die Ausgänge  $y(t)$  haben.  
⇒ Man kann aus dem Verhalten von  $\underline{y}(t)$  **nicht** auf die Zustände  $\underline{x}(t)$  schliessen.

Steuerbarkeit der Zustände

- Ein System ist **steuerbar**, wenn es für jeden Anfangszustand  $\underline{x}_0$  und jeden Endzustand  $\underline{x}_1$  eine Steuerfunktion  $\underline{u}(t)$  gibt, die das System in einer endlichen Zeitspanne  $0 \geq t \geq t_1$  von  $\underline{x}_0$  zu  $\underline{x}_1$  bringt, d.h.  $\underline{x}(t_1) = \underline{x}_1$ .
- Ein System ist **nicht steuerbar**, wenn es Zustände  $\underline{x}(t)$  gibt, die nicht von den Eingängen  $\underline{u}(t)$  beeinflusst werden.

Bemerkungen:

- System  $(A, B, C, D)$  ist bekannt
- Äquivalent reicht es, wenn wir  $\underline{x}(0)$  bestimmen können

8.14 Steuerbarkeit (S. 277)

Gemäss der äquivalenten ZRD-Darstellung (siehe Abschnitt 8.6) werden die Matrizen  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\hat{C}$  und  $\hat{D}$  mit einer Matrix  $V$  diagonalisiert, sodass  $\hat{A} = A_{\text{diag}} = V^{-1}AV$ ,  $\hat{B} = V^{-1}B$ ,  $\hat{C} = CV$  und  $\hat{D} = D$

Ein SISO-System mit **einfachen Eigenwerten** ist genau dann **vollständig steuerbar**, wenn nach der Transformation auf **Diagonalform** bzw. Parallelform ( $A_{\text{diag}} = \hat{A} = V^{-1}AV$ ), **alle** Elemente von  $\hat{B} = V^{-1}B$  **ungleich Null** sind.

Ein MIMO-System ( $m > 1$ ) mit **einfachen Eigenwerten** ist genau dann **vollständig steuerbar**, wenn nach der Transformation auf **Parallelform** ( $A_{\text{diag}} = \hat{A} = V^{-1}AV$ ), in **jeder Zeile** von  $\hat{B} = V^{-1}B$  **mindestens ein Element ungleich Null** ist.

8.14.1 Steuerbarkeitsmatrix

Ein System ist **vollständig steuerbar**, wenn

- Der **Rang** der Steuerbarkeitsmatrix gleich der **Ordnung**  $n$  des Systems
- Falls nur **ein Eingang** ( $m = 1$ ): Die **Determinante** von  $Q_{\text{Steuerbarkeit}}$  **ungleich Null** ist

$$Q_{\text{Steuerbarkeit}} = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix}$$

Dimension:  $n \times n \cdot m$

$A$	Systemmatrix ( $n \times n$ )	$n$	Zustände
$B$	Eingangsmatrix ( $n \times m$ )	$m$	Eingänge

Steuerbarkeitsmatrix in Matlab

```
1 ctrb(A, B);           % Steuerbarkeitsmatrix
2 rank(ctrb(A, B))      % Rang der Steuerbarkeitsmatrix
```

8.15 Beobachtbarkeit (S. 278)

Gemäss der äquivalenten ZRD-Darstellung (siehe Abschnitt 8.6) werden die Matrizen  $\hat{A}$ ,  $\hat{B}$ ,  $\hat{C}$  und  $\hat{D}$  mit einer Matrix  $V$  diagonalisiert, sodass  $\hat{A} = A_{\text{diag}} = V^{-1}AV$ ,  $\hat{B} = V^{-1}B$ ,  $\hat{C} = CV$  und  $\hat{D} = D$

Ein SISO-System mit **einfachen Eigenwerten** ist genau dann **vollständig beobachtbar**, wenn nach der Transformation auf **Diagonalform** bzw. Parallelform ( $A_{\text{diag}} = \hat{A} = V^{-1}AV$ ), **alle** Elemente von  $\hat{C} = CV$  **ungleich Null** sind.

Ein MIMO-System ( $m > 1$ ) mit **einfachen Eigenwerten** ist genau dann **vollständig beobachtbar**, wenn nach der Transformation auf **Parallelform** ( $A_{\text{diag}} = \hat{A} = V^{-1}AV$ ), in **jeder Spalte** von  $\hat{C} = CV$  **mindestens ein Element ungleich Null** ist.

8.15.1 Beobachtbarkeitsmatrix

Ein System ist **vollständig beobachtbar**, wenn

- Der **Rang** der Beobachtbarkeitsmatrix gleich der **Ordnung**  $n$  des Systems
- Falls nur **ein Eingang** ( $m = 1$ ): Die **Determinante** von  $Q_{\text{Beobachtbarkeit}}$  **ungleich Null** ist

$$Q_{\text{Beobachtbarkeit}} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix}$$

Dimension:  $k \cdot n \times n$

$A$	Systemmatrix ( $n \times n$ )
$C$	Beobachtungsmatrix ( $k \times m$ )
$n$	Zustände
$m$	Eingänge
$k$	Ausgänge

Beobachtbarkeitsmatrix in Matlab

```
1 obsv(A, C);          % Beobachtbarkeitsmatrix
2 rank(obsv(A, C))     % Rang der Beobachtbarkeitsmatrix
```

8.16 Standardformen der ZRD (S. 267)

Die allgemeine Differentialgleichung von SISO-Systemen der Form

$$a_n \frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} u}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{du}{dt} + b_0 u$$

ergibt mit der Laplace-Transformation und mit  $m \leq n$

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0}$$

Diese UTF  $H(s)$  kann mit verschiedenen ZRDs (**Normalformen**) abgebildet werden.  
**Wichtig:** Für alle folgenden Normalformen werden die Zustände  $x_i$  im blockdiagramm **unmittelbar nach den Integratoren** verwendet.

8.16.1 Regelungsnormalform (S. 267-268)

Die Regelungsnormalform kann **direkt aus der UTF**  $H(s)$  aufgestellt werden.  
Für  $m = n$  gilt sieht die Regelungsnormalform folgendermassen aus:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u(t)$$
$$y(t) = \begin{bmatrix} b_0 - a_0 b_n & b_1 - a_1 b_n & \dots & b_{n-1} - a_{n-1} b_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_n \end{bmatrix} \cdot u(t)$$

In den meisten Fällen ist  $m < n$  und die **Ausgangsgleichung** vereinfacht sich zu:

$$y(t) = \begin{bmatrix} b_0 & b_1 & \dots & b_m & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \cdot u(t)$$

8.16.2 Beobachtungsnormalform (S. 269-270)

Ein System, welches in Beobachtungsnormalform dargestellt werden kann, ist **beobachtbar!** ür  $m = n$  gilt sieht die Regelungsnormalform folgendermassen aus:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & -a_0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -a_1 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & -a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 - a_0 b_n \\ b_1 - a_1 b_n \\ b_2 - a_2 b_n \\ \vdots \\ b_{n-1} - a_{n-1} b_n \end{bmatrix} \cdot u(t)$$
$$y(t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_n \end{bmatrix} \cdot u(t)$$

In den meisten Fällen ist  $m < n$  und die **Zustandsgleichung** vereinfacht sich zu:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \dots & -a_0 \\ 1 & 0 & 0 & \dots & -a_1 \\ 0 & 1 & 0 & \dots & -a_2 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & -a_{n-1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_{n-1} \end{bmatrix} \cdot u(t)$$

8.16.3 Regelungsnormalform ⇔ Beobachtungsnormalform

Die beiden Formen sind **dual** und weisen folgende Zusammenhänge auf (**Transposition**):

- $A$  ist an der Hauptdiagonalen gespiegelt
- $B$  und  $C$  sind vertauscht
- $D$  bleibt gleich

8.16.4 Jordan-Normalform (S. 271-273)

Die UTF wird mittels einer **Partialbruchzerlegung** dargestellt. Die Parameter der Partialbruchzerlegung können dann direkt in die Matrix  $A = A_{\text{diag}}$  eingetragen werden.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = b_n + \frac{\alpha_1}{s - p_1} + \frac{\alpha_2}{s - p_2} + \dots + \frac{\alpha_n}{s - p_n}$$

Die Diagonalform für **einfache, reelle Pole** mit  $m = n$  ist:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1}(t) \\ \dot{x}_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & p_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & p_3 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & p_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot u(t)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_n \end{bmatrix} \cdot u(t)$$

**Hinweis:** Mit  $m < n$  vereinfacht sich die **Ausgangsgleichung** zu:

$$y(t) = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \alpha_2 & \cdots & \alpha_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ \vdots \\ x_{n-1}(t) \\ x_n(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \cdot u(t)$$

### 8.16.5 Diagonalform (S. 271-273)

Eine weitere Darstellungsform der Diagonalform ergibt sich mittels **Transposition** der Jordan-Normalform:

- **A** ist an der Hauptdiagonalen gespiegelt (ergibt wiederum **A**)
- **B** und **C** sind vertauscht
- **D** bleibt gleich

## 9 Filter

### 9.1 Grundtypen (S. 291)

Filter sind mehrheitlich **frequenzselektive, lineare Netzwerke**, welche gewisse Frequenzbereiche übertragen und andere dämpfen. Die fünf **frequenzselektiven Grundtypen** sind:

- Tiefpass (TP)
- Bandpass (BP)
- Allpass
- Hochpass (HP)
- Bandsperre, Notch (BS)

### 9.2 Frequenzgang $H(j\omega)$ – Übertragungsfunktion $H(s)$ (S. 294)

Für den Frequenzgang  $H(j\omega)$  und die Übertragungsfunktion  $H(s)$  gelten die folgenden Zusammenhänge

$$|H(j\omega)|^2 = H(j\omega) \cdot H^*(j\omega) = H(j\omega) \cdot H(-j\omega) = H(s) \cdot H(-s) \Big|_{s=j\omega}$$

$$H(s) \cdot H(-s) = |H(j\omega)|^2 \Big|_{\omega^2 = -s^2}$$

**Hinweis:**  $|H(j\omega)|^2$  ist immer eine Funktion in  $\omega^2$ , da der Amplitudengang eine gerade Funktion ist!

Da in der Praxis **jeweils nur  $H(s)$  interessant** ist, muss  $H(s)$  aus  $|H(j\omega)|^2$  'isoliert' werden. Dies ist durch den folgenden Zusammenhang möglich.

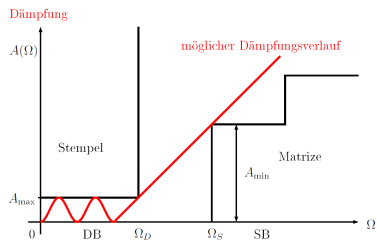
$$\frac{N(s)}{D(s)} \cdot \frac{N(-s)}{D(-s)} = |H(j\omega)|^2 \Big|_{\omega^2 = -s^2}$$

**Hinweis:**  $D(s)$  muss aus Stabilitätsgründen ein Hurwitz-Polynom sein!

### 9.3 Approximation im Frequenzbereich

Die wichtigste Aufgabe der Filtertheorie ist die **Bestimmung der Übertragungsfunktion**, die einen **vorgegebenen Frequenzgang** gewährleistet. Zuerst soll der **Amplitudengang**  $|H(j\omega)|$  im Frequenzbereich approximiert werden. Der vorgeschriebene Phasengang wird dann allenfalls mit zusätzlichen Allpass-Filtern erreicht.

#### 9.3.1 Toleranzschema (Stempel und Matritze) – Filterspezifikation



Die Anforderungen an ein Filter werden häufig im **Toleranzschema beschrieben**. Dieses steht jeweils 'auf dem Kopf'.

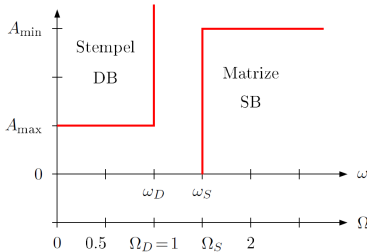
- Im **Durchlassbereich (DB)** bestimmt der Stempel die maximal zulässige **Dämpfung  $A_{\max}$**
- Im **Sperrbereich (SB)** bestimmt die Matritze die minimal nötige **Dämpfung  $A_{\min}$**

#### 9.3.2 Frequenznormierung

Um möglichst kompakte **Tabellen** zu haben, wird auf Frequenzen normiert. Grundsätzlich kann auf eine beliebige Frequenz normiert werden. Allerdings gilt grundsätzlich:

- **HP / TP:** Normierung bezüglich **Grenzfrequenz** des Durchlassbereichs  $\omega_r = \omega_D$
- **BP / BS:** Normierung bezüglich der Mittenfrequenz  $\omega_r = \omega_m$

$A(\omega), A(\Omega)$

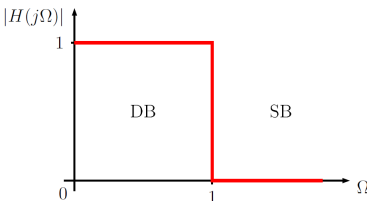


#### Normierte Grössen

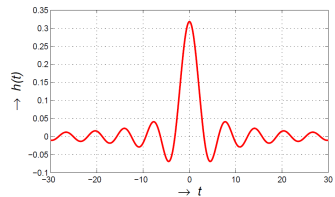
$$S = \frac{s}{\omega_r} \quad \Omega = \frac{\omega}{\omega_r} \quad \sigma' = \frac{\sigma}{\omega_r}$$

**Hinweis:** Zur Entnormierung wird jeweils **S** in der normierter Funktion durch  $\frac{s}{\omega_r}$  ersetzt.

### 9.4 Ideales Tiefpassfilter (S. 297)



- DB: keine Dämpfung
- SB: kein Ausgangssignal



- Akausale Impulsantwort  $h(t)$

⇒ Ideales Tierpass ist physikaltisch nicht realisierbar. ⇒ **Approximationen**

### 9.5 Amplitudengang mit char. Funktion $K(\Omega^2)$

Um Wurzelausdrücke zu vermeiden, wird der folgenden Ansatz verwendet

$$|H(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + K(\Omega^2)}$$

Im Fall des (idealen) Tiefpasses gilt füt die charakteristische Funktion  $K(\Omega^2)$

- Durchlassbereich (DB)  $0 \leq K(\Omega^2) \ll 1$  für  $0 \leq \Omega < 1 \Rightarrow |H(j\Omega)|^2 \approx 1$
- Sperrbereich (SB)  $K(\Omega^2) \gg 1$  für  $\Omega > 1 \Rightarrow |H(j\Omega)|^2 \approx 0$

### 9.6 Approximation mittels kritisch-gedämpfter Filter (S. 299)

Tiefpassfilter  $n$ . Ordnung mit kritischer Dämpfung haben jeweiligen einen  **$n$ -fachen Pol** auf der **negativen  $\sigma$ -Achse**.

- Impuls- und Sprungantwort können nicht oszillieren
- Geringe Flankensteilheit im Übergangsbereich

Die Übertragungsfunktion  $H(s)$  ergibt sich als:

$$H(s) = \frac{1}{\left(1 + \frac{s}{\omega_c}\right)^n} \quad \begin{matrix} n & \text{Ordnung des Filters} \\ \omega_c & 3 \text{ dB-Punkt jedes der } n \text{ Teilfilter} \end{matrix}$$

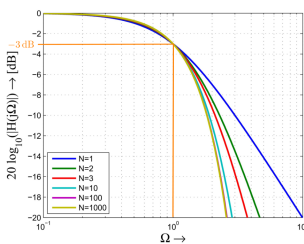
Will man bei der Kreisfrequenz  $\omega_D$  eine Dämpfung von  $\alpha$  dB haben, so muss  $\omega_c$  (der  $n$  identischen Teilfilter) gewählt werden als

$$\omega_c = \frac{\omega_D}{\sqrt{10^{\frac{\alpha}{20n}} - 1}}$$

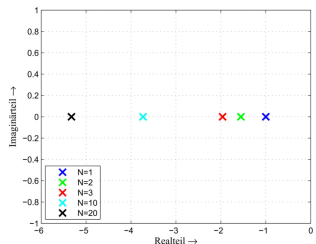
#### 9.6.1 Eigenschaften kritisch-gedämpfte Filter

- Alle Pole am **gleichen Ort** auf negativer  $\sigma$ -Achse ⇒ Allpolfilter
- Für  $\Omega = 0$  ist für sämtliche  $n$ :  $|H(0)| = H_{\max} = 1$
- Für  $\Omega = 1$  ist für sämtliche  $n$ :  $|H(j)| = \frac{H_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow 3 \text{ dB Dämpfung}$
- Für  $\Omega \gg 1$  wird  $|H(j\Omega)| \approx \frac{1}{\Omega^n} \Rightarrow -n \cdot 20 \text{ dB/Dekade}$
- Amplitudengang bei  $\Omega = 0$  maximal flach, da alle Ableitungen = 0 sind
- Amplitudengang ist streng-monoton fallend ⇒ keine Welligkeit
- Pole verschieben sich bei höherer Ordnung in Richtung imaginäre Achse
- Gruppenlaufzeit konstant bis  $\omega_D$

#### Amplitudengänge



#### Pol-Lagen



### 9.7 Standard-Filtertypen – Überblick

- **Butterworth**
  - + **Kein Rippel** im Durchlass- und Sperrbereich
  - + Im Durchlassbereich ist der Amplitudengang **maximal flach**
  - Überhöhung in der Gruppenlaufzeit der Grenzfrequenz
  - Braucht **hohe Ordnung** für steilen Übergang von Durchlass- zu Sperrbereich
- **Bessel**
  - + **Flachster Übergang** von Durchlass- und Sperrbereich von allen Filtern
  - + Konstante Gruppenlaufzeit
  - Für steile Filter im Durchlass- und Sperrbereich nicht geeignet

## Tschebyscheff-I

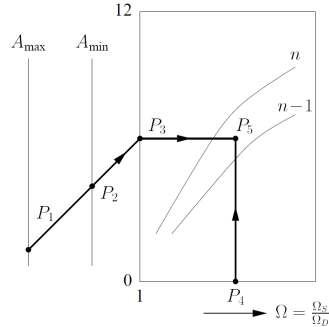
- + Schon für kleine Ordnungen **relativ steil** im Übergang von Durchlass- und Sperrbereich
- **Rippel** im Durchlassbereich
- Keine konstante Gruppenlaufzeit

## 9.8 Vorgehen Filter dimensionieren / auslegen

1. Gemäss Anforderungen geeigneten Filtertyp wählen (⇒ 9.7)
2. Toleranzschema gemäss Anforderungen erstellen inkl. Normierung (⇒ 9.3.1)
3. Ordnung des Filters bestimmen (Formel oder Nomogramm ⇒ 9.9)
4. Übertragungsfunktion bestimmen (⇒ Matlab)
5. Komponenten mittels Entnormierung bestimmen (Tabellen ⇒ 9.10)

## 9.9 Nomogramme (s. 393)

Nomogramme können verwendet werden, um die **Ordnung eines Filters** zu bestimmen.



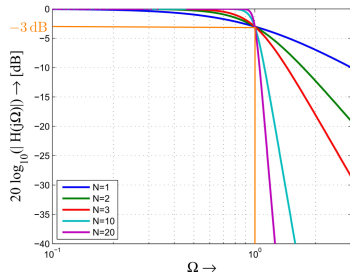
### Benutzung von Nomogrammen

1.  $P_1$ : Verbindung von  $A_{\max}$  zu  $A_{\min}$
2.  $P_2$ : Verlängerung von  $P_1$  bis zum 'Diagramm-Rand'
3.  $P_3$ : Horizontale Linie vom Rand in Diagramm hinein
4.  $P_4$ : Bei  $\Omega = \frac{\Omega_S}{\Omega_D} = \frac{\omega_S}{\omega_D} = \frac{f_S}{f_D}$  vertikale Linie ziehen
5.  $P_5$ : Schnittpunkt: 'hochfahren' zur nächsten Kurve ⇒ Ordnung  $n$  der Kurve ablesen

## 9.10 Tabellen zum Entwurf von LC-Filtern (s. 409)

**Achtung:** Normierung der Widerstände beachten!

## 9.11 Approximation nach Butterworth (s. 303)



Die charakteristische Funktion wird bei der Butterworth-Approximation als  $K(\Omega^2) = (\Omega^2)^n = \Omega^{2n}$  gewählt. Der Amplitudengang  $|H(j\Omega)|$  folgt somit der Gleichung

$$|H(j\Omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega^{2n}}}$$

### 9.11.1 Eigenschaften der Butterworth-Approximation (s. 303)

#### Durchlassbereich

- Für  $\Omega = 0$  ist für sämtliche  $n$ :  $|H(0)| = H_{\max} = 1$
- Für  $\Omega = 1$  ist für sämtliche  $n$ :  $|H(j)| = \frac{H_{\max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow 3 \text{ dB Dämpfung}$
- Amplitudengang bei  $\Omega = 0$  maximal flach, da alle Ableitungen = 0 sind

#### Sperrbereich

- Für  $\Omega \gg 1$  wird  $|H(j\Omega)| \approx \frac{1}{\Omega^n} \Rightarrow -n \cdot 20 \text{ dB/Dekade}$

#### Allgemein

- Amplitudengang ist streng-monoton fallend ⇒ keine Welligkeit

### 9.11.2 Bestimmung von $H(s)$ aus $|H(j\Omega)|$ (s. 304)

Aus dem Ansatz

$$|H(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + K(\Omega^2)} \Big|_{\Omega^2 = -s^2} = \frac{1}{s + (-s^2)^n} = H(s) \cdot H(-s) = \frac{1}{D(s)} \cdot \frac{1}{D(-s)}$$

kann der folgende Teil isoliert betrachtet werden ( $D(s)$  ist ein Hurwitz-Polynom):

$$D(s) \cdot D(-s) = 1 + (-s^2)^n$$

Mit dem Ansatz

$$D(s) = \prod_{j=1}^l (s^2 + a_j \cdot s + b_j) \prod_{j=2l+1}^n (s - c_j)$$

wird das Produkt  $D(s) \cdot D(-s)$  bestimmt. Anschliessend wird ein Koeffizientenvergleich durchgeführt.

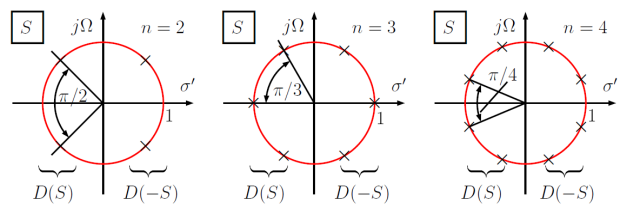
### 9.11.3 Bestimmung der Pol-Lage (s. 307)

Der Zusammenhang aus Abschnitt 9.11.2 kann für die Bestimmung der Pole auf Null gesetzt werden:

$$D(s) \cdot D(-s) = 1 + (-s^2)^n \stackrel{!}{=} 0$$

Durch Auflösen der Gleichung nach  $s$  kommen die Pole auf dem **Einheitskreis** zu liegen.

- Abstand zwischen den Polen:  $\frac{\pi}{n}$
- Ordnung  $n$  gerade: keine reellen Pole
- Ordnung  $n$  ungerade: zwei reelle Pole bei  $\pm 1$
- Für Nennerpolynom  $D(s) = \frac{1}{H(s)}$  müssen nur Pole in der linken Halbebene berücksichtigt werden!

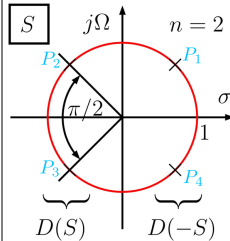


## Beispiel: Butterworth 2. Ordnung – $H(s)$ und Pol-Lage bestimmen

$$\text{Ansatz: } H(s) \cdot H(-s) = \frac{1}{D(s)} \cdot \frac{1}{H(s)} = \frac{1}{1 + (-s^2)^n}$$

Für die Ordnung  $n = 2$  ergibt sich das Nennerpolynom zu:

$$D(s) \cdot D(-s) = 1 + s^4 \Leftrightarrow s^4 = -1 \Leftrightarrow e^{j(\frac{\pi}{4} + k\frac{\pi}{2})}$$



Aufgelöst nach  $s$  liegen die Nullstellen auf dem Einheitskreis mit Abstand  $\frac{\pi}{4}$  verteilt.

#### Rechte Halbebene

$$P_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} + j \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$P_4 = \frac{1}{\sqrt{2}} - j \frac{1}{\sqrt{2}}$$

#### Linke Halbebene

$$P_2 = -\frac{1}{\sqrt{2}} + j \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$P_3 = -\frac{1}{\sqrt{2}} - j \frac{1}{\sqrt{2}}$$

⇒ Für die Übertragungsfunktion  $H(s)$  sind nur die Nullstellen in der **linken Halbebene** relevant!

Die Übertragungsfunktion  $H(s)$  ergibt sich aus

$$H(s) = \frac{1}{D(s)} = \frac{1}{(s - P_2) \cdot (s - P_3)} = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}$$

Alternativ kann die Übertragungsfunktion  $H(s)$  auch mittels folgendem Ansatz für  $D(s)$  und anschliessendem Koeffizientenvergleich von  $D(s) \cdot D(-s)$  bestimmt werden.

$$\text{Ansatz: } D(s) = s^2 + a_1 s + b_1$$

$$\text{Koeffizientenvergleich: } D(s) \cdot D(-s) = s^4 + (2b_1 - a_1^2)s + b_1^2 \stackrel{!}{=} s^4 + 1$$

$$\Rightarrow a_1 = \sqrt{2} \text{ und } b_1 = 1 \Rightarrow s^2 + \sqrt{2}s + 1 \Rightarrow H(s) = \frac{1}{D(s)} = \frac{1}{s^2 + \sqrt{2}s + 1}$$

### 9.11.4 Bestimmung der Filterordnung (s. 308)

Aus dem Toleranzschema lassen sich für die 'Ecken' die folgenden beiden Bedingungen aufstellen:

$$A(\Omega_D) = 10 \cdot \log_{10}(1 + \Omega_D^{2n}) = A_{\max}$$

$$A(\Omega_S) = 10 \cdot \log_{10}(1 + \Omega_S^{2n}) = A_{\min}$$

Mittels Umformungen und aufgelöst nach  $n$  ergibt sich die Filter-Ordnung als

[.] bedeutet 'aufrunden auf ganze Zahl'

$$n = \left\lceil \frac{\log_{10}\left(\frac{10^{A_{\min}/10} - 1}{10^{A_{\max}/10} - 1}\right)}{2 \cdot \log_{10}\left(\frac{\Omega_S}{\Omega_D}\right)} \right\rceil$$

⇒ Alternativ kann die Ordnung  $n$  auch mit dem Nomogramm bestimmt werden.