

---

# Stochastische Signale und Systeme

---

**Zusammenfassung Formeln**

Autor: Daniel Thiem - [studium@daniel-thiem.de](mailto:studium@daniel-thiem.de)

Version 0.9.8.4 - 27.09.2012

---



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kombinatorik &amp; reine Stochastik</b>	<b>6</b>
1.1	Mengenlehre	6
1.2	Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	6
1.2.1	Eigenschaften der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion	6
1.2.2	Berechnung bei Abhängigkeit zu anderer Zufallsvariablen	7
1.3	Verteilungsfunktion	7
1.3.1	Eigenschaften der Verteilungsfunktion	7
1.3.2	Wahrscheinlichkeitsrechnung mittels der Verteilungsfunktion	7
1.4	Verteilungen	8
1.4.1	Normalverteilung	8
1.4.2	Rechteckverteilung	8
1.4.3	Exponentialverteilung	8
1.5	Formel von Bayes	9
1.6	Erwartungswerte	9
1.6.1	Erwartungswertberechnung	9
1.6.2	Rechenregeln für Erwartungswerte	10
1.7	Varianz	10
1.7.1	Berechnung der Varianz	10
1.7.2	Rechenregeln für Varianzen	10
1.8	Konvergenz	10
1.8.1	Konvergenz mit Wahrscheinlichkeit eins (Convergence with probability one)	11
1.8.2	Konvergenz im “Mean Square Sense”	11
1.8.3	Convergence in Probability	11
1.8.4	Convergence in Distribution	11
1.8.5	Gewichtung der Konvergenzen	11
<b>2</b>	<b>Discrete-Time-Fourier-Transformation</b>	<b>12</b>
2.1	Abtastung	12
2.1.1	Im Zeitbereich	12
2.1.2	Im Frequenzbereich	12
2.2	Transformation	12
2.2.1	Rücktransformation	12

2.2.2	Zusammenhang $\Omega$ und $n$ . . . . .	13
2.2.3	Dirac-Kamm . . . . .	13
2.2.4	Berechnen einer Übertragungsfunktion im zeitdiskreten Fall . . . . .	13
2.3	Korrespondenzen, welche nicht auf der DSS-Formelsammlung enthalten sind . . . . .	13
2.3.1	Trigonometrische Funktionen im Frequenzbereich . . . . .	13
<b>3</b>	<b>Prozesse</b>	<b>14</b>
3.1	Strikte Stationarität . . . . .	14
3.2	Second order moment function(SOMF) . . . . .	14
3.2.1	Stationär im weiteren Sinne . . . . .	14
3.2.2	Eigenschaften der SOMF . . . . .	14
3.3	Cross-SOMF . . . . .	14
3.3.1	Gemeinsame Statonarität (joint stationary) . . . . .	15
3.3.2	Eigenschaften der Cross-SOMF . . . . .	15
3.3.3	Unkorreliertheit (uncorrelated) anhand der Cross-SOMF . . . . .	15
3.3.4	Orthogonalität . . . . .	15
3.4	Kovarianz (Covariance,Central-SOMF) . . . . .	15
3.4.1	Eigenschaften der Kovarianz . . . . .	16
3.4.2	Kovarianz einer zusammengesetzten Funktion . . . . .	16
3.4.3	Überführung der Central-SOMF in die Varianz . . . . .	16
3.5	Kreuz-Kovarianz (Cross-covariance) . . . . .	16
3.5.1	Eigenschaften der Kreuzkovarianz . . . . .	16
3.5.2	Unkorreliertheit (uncorrelated) anhand der Kreuzkovarianz . . . . .	17
3.6	Komplexe Prozesse . . . . .	17
3.6.1	Erwartungswert eines Komplexen Zufallsprozess . . . . .	17
3.6.2	SOMF eines Komplexen Zufallsprozess . . . . .	17
3.6.3	cross-SOMF komplexer Zufallsprozesse . . . . .	17
3.6.4	Kovarianz (Covariance) eines komplexen Zufallsprozess . . . . .	18
3.6.5	Kreuzkovarianz(cross-covariance) komplexer Zufallsprozesse . . . . .	18
3.6.6	Eigenschaften komplexer Zufallsprozesse . . . . .	18
<b>4</b>	<b>Spektraldichten (Power Spectral Density)</b>	<b>19</b>
4.1	Leistungsdichte . . . . .	19
4.1.1	Leistungsspektraldichte (Power Spectral Density,PSD) . . . . .	19
4.1.2	Durchschnittliche Leistung eines Zufallsprozesses . . . . .	20
4.1.3	Kreuzleistungsdichte (cross-power density) . . . . .	20
4.1.4	Durchschnittliche Kreuzleistung zweier Zufallsprozesse . . . . .	20
4.1.5	Wiener-Khinchine theorem . . . . .	21
4.1.6	Kreuzleistungsdichte durch Cross-SOMF . . . . .	21

4.2	Kohärenz (coherence) . . . . .	21
4.2.1	Eigenschaften der Kohärenz . . . . .	21
4.3	Root Mean Square (RMS) und Gleichstrom (DC) Werte . . . . .	22
4.3.1	DC-Values . . . . .	22
4.3.2	Normalisierte DC-Leistung . . . . .	22
4.3.3	RMS-Value . . . . .	22
4.4	Spektrum . . . . .	22
4.4.1	Spektrum eines stationären Zufallsprozesses . . . . .	22
4.4.2	Kreuzspektrum zweier gemeinsam stationärer Zufallsprozesse . . . . .	23
<b>5</b>	<b>Filter</b>	<b>24</b>
5.1	Lineare Filter . . . . .	24
5.1.1	Stabilität . . . . .	24
5.1.2	Eigenschaften eines Linearen Filters . . . . .	24
5.1.3	Instabiler linearer Filter . . . . .	24
5.1.4	Leistungsdichtespektrum des Ausgangs eines Filters . . . . .	25
5.1.5	Spektrum/Kovarianz des Ausgangs eines Filters . . . . .	25
5.1.6	Kreuzkovarianz des Ausgangs des Filters . . . . .	25
5.1.7	Kreuzkovarianz des Ausgangs zweier paralleler Filter . . . . .	25
5.1.8	Kaskade linearer Filter . . . . .	26
5.2	Matched Filter . . . . .	26
5.2.1	Annahmen des Matched Filters . . . . .	26
5.2.2	Ziel des Matched Filters . . . . .	26
5.2.3	Übertragungsfunktion des Matched Filters . . . . .	27
5.2.4	Matched Filter für Weißes Rauschen . . . . .	27
5.3	Wiener Filter . . . . .	27
5.3.1	Ziel des Wiener Filters . . . . .	27
5.3.2	Annahmen des Wiener Filters . . . . .	28
5.3.3	Die Übertragungsfunktion des Wiener Filters . . . . .	28
5.3.4	Mean Square Error des Wiener Filters . . . . .	29
5.3.5	Orthogonalitätsprinzip (Herleitung des Wiener Filters) . . . . .	29
5.3.6	Der Wiener Filter mit additivem Rasuchen . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Sonstiges</b>	<b>30</b>
6.1	Spezielle Funktionen . . . . .	30
6.1.1	Gaussian white noise process . . . . .	30
6.1.2	Kronecker delta function . . . . .	30
6.2	Mathematische nützliche Formeln . . . . .	30
6.2.1	Ungleichung von Schwarz . . . . .	30
6.2.2	Orthogonalitäts- und Normierungsbeziehungen . . . . .	31

---

6.2.3	Betragsquadrat komplexer Funktionen . . . . .	31
6.2.4	Doppelte Faltungssumme . . . . .	31
6.2.5	Einzelne Faltungssumme ohne Differenz im Argument . . . . .	32

---

## **Vorwort**

---

Fehler und Verbesserungen bitte an [studium@daniel-thiem.de](mailto:studium@daniel-thiem.de) senden oder als Issue bei <https://github.com/Tyde/stosigsysfs/issues> melden. Der Quelltext dieser Formelsammlung ist auf <https://github.com/Tyde/stosigsysfs> und darf gerne erweitert werden.

---

# 1 Kombinatorik & reine Stochastik

---

## 1.1 Mengenlehre

---

$$P(\overline{A \cup B}) = P(\bar{A} \cap \bar{B}) \quad (1.1a)$$

$$P(\overline{A \cap B}) = P(\bar{A} \cup \bar{B}) \quad (1.1b)$$

$$P(A \cup (A \cap B)) = P(A) \quad (1.1c)$$

$$P(A \cap (A \cup B)) = P(A) \quad (1.1d)$$

$$P(\bar{\bar{A}}) = P(A) \quad (1.1e)$$

Falls  $A$  und  $B$  stochastisch unabhängig:

$$P(A \cap B) = P(A) \cdot P(B) \quad (1.2)$$

---

## 1.2 Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

---

Sei  $F_X(x)$  die Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen  $X$

$$f(x) = \frac{dF_X(x)}{dx} \quad (1.3)$$

---

### 1.2.1 Eigenschaften der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

---

$$f_X(x) \geq 0 \quad (1.4a)$$

$$f_X(x) = P(X = x) \quad (1.4b)$$

---

## 1.2.2 Berechnung bei Abhängigkeit zu anderer Zufallsvariablen

---

Sei  $Y = g(X)$  und die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von  $Y$ ,  $f_y(t)$ , sei gesucht, während die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion  $f_x(t)$  gegeben ist,

$$f_y(t) = f_x(g^{-1}(t)) \left| \frac{d}{dt} g^{-1}(t) \right| \quad (1.5)$$

---

## 1.3 Verteilungsfunktion

---

$f(t)$  sei die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Zufallsvariablen  $X$

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad (1.6)$$

---

### 1.3.1 Eigenschaften der Verteilungsfunktion

---

$$0 \leq F_X(x) \leq 1 \quad (1.7a)$$

$$F_X(\infty) = 1 \quad (1.7b)$$

$$F_X(-\infty) = 0 \quad (1.7c)$$

$F_X(x)$  ist rechtsstetig, d.h.

$$\lim_{\epsilon \rightarrow 0} F_X(x + \epsilon) = F_X(x) \quad (1.7d)$$

---

### 1.3.2 Wahrscheinlichkeitsrechnung mittels der Verteilungsfunktion

---

$$F(a-) = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} F_X(x - \epsilon) \quad (1.8a)$$

$$P(X = a) = F(a) - F(a-) \quad (1.8b)$$

$$P(a < X \leq b) = F(b) - F(a) \quad (1.8c)$$

$$P(a \leq X < b) = F(b-) - F(a-) \quad (1.8d)$$

$$P(a \leq X \leq b) = F(b) - F(a-) \quad (1.8e)$$

$$P(X > a) = 1 - F(a) \quad (1.8f)$$



---

## 1.4 Verteilungen

---

### 1.4.1 Normalverteilung

---

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1.9)$$

Erwartungswert und Varianz:

$$E[f(x)] = \mu \quad (1.10a)$$

$$\text{Var}[f(x)] = \sigma^2 \quad (1.10b)$$

---

### 1.4.2 Rechteckverteilung

---

$$f(t) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & a < t < b \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (1.11)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & x \in (a, b] \\ 1 & x > b \end{cases} \quad (1.12)$$

Erwartungswert und Varianz:

$$E[f(x)] = \frac{a+b}{2} \quad (1.13a)$$

$$\text{Var}[f(x)] = \frac{(b-a)^2}{12} \quad (1.13b)$$

---

### 1.4.3 Exponentialverteilung

---

$$f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \lambda e^{-\lambda t} & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.14)$$

$$F(x) = \begin{cases} 0 & x < 0 \\ 1 - e^{-\lambda x} & x \geq 0 \end{cases} \quad (1.15)$$

---

Erwartungswert und Varianz:

$$E[f(x)] = \frac{1}{\lambda} \quad (1.16a)$$

$$\text{Var}[f(x)] = \frac{1}{\lambda^2} \quad (1.16b)$$

---

## 1.5 Formel von Bayes

---

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} \Rightarrow P(A_k|B) = \frac{P(A_k) \cdot P(B|A_k)}{\sum_{i=1}^n P(B|A_i) \cdot P(A_i)} \quad (1.17)$$

---

## 1.6 Erwartungswerte

---

---

### 1.6.1 Erwartungswertberechnung

---

---

#### Allgemein

---

Sei  $f(x)$  die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von  $X$

$$E(X) = \int_{-\infty}^{\infty} x \cdot f(x) dx \quad (1.18)$$

---

#### Erweitert

---

Sei  $Y = g(X)$  und  $f(x)$  die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von  $X$

$$E[Y] = E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \cdot f(x) dx \quad (1.19)$$

---

## 1.6.2 Rechenregeln für Erwartungswerte

---

Sei  $A$  eine von  $B$  unabhängige Zufallsvariable

$$E[A \cdot B] = E[A] \cdot E[B] \quad (1.20)$$

Sei  $X$  eine Zufallsvariable und  $a, b$  jeweils Konstanten

$$E[aX + b] = aE[X] + b \quad (1.21)$$

Seien  $X_i$  Zufallsvariablen

$$E\left[\sum_{i=0}^n X_i\right] = \sum_{i=0}^n E[X_i] \quad (1.22)$$

---

## 1.7 Varianz

---

---

### 1.7.1 Berechnung der Varianz

---

$$\text{Var}(X) = E(X^2) - E(X)^2 \quad (1.23)$$

---

### 1.7.2 Rechenregeln für Varianzen

---

$$\text{Var}(aX + b) = a^2 \text{Var}(x) \quad (1.24)$$

Seien  $X_i$  Zufallsvariablen

$$\text{Var}\left[\sum_{i=0}^n X_i\right] = \sum_{i=0}^n \text{Var}[X_i] \quad (1.25)$$

---

## 1.8 Konvergenz

---

Es wird eine Konvergenz von Zufallsvariablen  $X_k$  mit  $k = 0, 1, 2, \dots$  betrachtet:

---

### 1.8.1 Konvergenz mit Wahrscheinlichkeit eins (Convergence with probability one)

---

$$P\left(\lim_{k \rightarrow \infty} |X_k - X| = 0\right) = 1 \quad (1.26)$$

---

### 1.8.2 Konvergenz im "Mean Square Sense"

---

$$\lim_{k \rightarrow \infty} E\left[|X_k - X|^2\right] = 0 \quad (1.27)$$

---

### 1.8.3 Convergence in Probability

---

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P(|X_k - X| > \epsilon) = 0 \quad (1.28)$$

---

### 1.8.4 Convergence in Distribution

---

$$\lim_{k \rightarrow \infty} F_{X_k}(x) = F_X(x) \quad \text{Für alle stetigen punkte } x \text{ aus } F_X \quad (1.29)$$

---

### 1.8.5 Gewichtung der Konvergenzen

---

- Convergence with probability 1 (1.8.1) implies convergence in probability (1.8.3)
- Convergence with probability 1 (1.8.1) implies convergence in the MSS (1.8.2), provided second order moments exist.
- Convergence in the MSS (1.8.2) implies convergence in probability (1.8.3).
- Convergence in probability (1.8.3) implies convergence in distribution (1.8.4).

---

# 2 Discrete-Time-Fourier-Transformation

---

## 2.1 Abtastung

---

---

### 2.1.1 Im Zeitbereich

---

Sei  $x_c(t)$  das zu abtastende Signal und  $T_s = \frac{1}{f_s}$  die Abtastdauer bzw. Abtastfrequenz

$$x_s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_c(nT_s) \delta(t - nT_s) \quad (2.1)$$

---

### 2.1.2 Im Frequenzbereich

---

$$\begin{aligned} X_s(e^{j\omega}) &= \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_c(j(\Omega - \frac{2\pi k}{T_s})) \\ &= \frac{1}{T_s} \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_c(j\Omega - k j\Omega_s) \quad \text{mit} \quad \Omega_s = \frac{2\pi}{T_s} \end{aligned} \quad (2.2)$$

---

## 2.2 Transformation

---

---

### 2.2.1 Rücktransformation

---

$$x[n] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} X(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (2.3)$$

---

## 2.2.2 Zusammenhang $\Omega$ und $n$

---

ACHTUNG: Dieser Zusammenhang ist in SSS etwas anders im Gegensatz zu dem Hilfsblatt von DSS

$$\omega = \Omega T_s \quad (2.4)$$

---

## 2.2.3 Dirac-Kamm

---

$$\eta(\omega) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} \delta(\omega + 2\pi l) \quad (2.5)$$

---

## 2.2.4 Berechnen einer Übertragungsfunktion im zeitdiskreten Fall

---

1. Zeitkontinuierliches  $H(j\Omega) = \frac{Y(j\Omega)}{X(j\Omega)}$  berechnen
2. Formel aus (2.2.2) einsetzen, um  $H(e^{j\omega})$  zu erreichen

---

## 2.3 Korrespondenzen, welche nicht auf der DSS-Formelsammlung enthalten sind

---

---

### 2.3.1 Trigonometrische Funktionen im Frequenzbereich

---

$$\cos(\omega) \quad \bullet \text{---} \circ \quad \frac{1}{2}(\delta(n-1) + \delta(n+1)) \quad (2.6a)$$

$$\sin(\omega) \quad \bullet \text{---} \circ \quad \frac{j}{2}(\delta(n-1) - \delta(n+1)) \quad (2.6b)$$

---

## 3 Prozesse

---

### 3.1 Strikte Stationarität

---

$$F_x(x_1, \dots, x_N; n_1, \dots, n_N) = F_x(x_1, \dots, x_N; n_1 + n_0, \dots, n_N + n_0) \quad \text{mit } N \rightarrow \infty \quad (3.1)$$

---

### 3.2 Second order moment function(SOMF)

---

$$r_{XX}(n_1, n_2) = E[X(n_1)X(n_2)] \quad (3.2)$$

---

#### 3.2.1 Stationär im weiteren Sinne

---

$$E[X(n)] = \text{const.} \quad (3.3a)$$

$$r_{XX}(n_1, n_2) = r_{XX}(\kappa) = E[X(n + \kappa) \cdot X(n)] \quad \text{mit } \kappa = |n_2 - n_1| \quad (3.3b)$$

---

#### 3.2.2 Eigenschaften der SOMF

---

$$r_{XX}(0) = E[X(n)^2] = \sigma_X^2 + \mu_X^2 \quad (3.4a)$$

$$r_{XX}(\kappa) = r_{XX}(-\kappa) \quad (3.4b)$$

$$r_{XX}(0) \geq |r_{XX}(\kappa)| \quad , |\kappa| > 0 \quad (3.4c)$$

---

### 3.3 Cross-SOMF

---

$$r_{XY}(n_1, n_2) = E[X(n_1) \cdot Y(n_2)] \quad (3.5)$$

---

---

### 3.3.1 Gemeinsame Stationarität (joint stationary)

---

Sei  $X(n)$  und  $Y(n)$  nach (3.2.1) *stationär*, dann sind die Prozesse gemeinsam stationär, wenn gilt:

$$r_{XY} = r_{XY}(n_1 - n_2) = r_{XY}(\kappa) \quad \text{mit} \quad \kappa = n_1 - n_2 \quad (3.6)$$

---

### 3.3.2 Eigenschaften der Cross-SOMF

---

$$r_{XY}(-\kappa) = r_{YX}(\kappa) \quad (3.7a)$$

$$|r_{XY}(\kappa)| \leq \sqrt{r_{XX}(0) \cdot r_{YY}(0)} \quad (3.7b)$$

$$|r_{XY}(\kappa)| \leq \frac{1}{2}(r_{XX}(0) + r_{YY}(0)) \quad (3.7c)$$

---

### 3.3.3 Unkorreliertheit (uncorrelated) anhand der Cross-SOMF

---

$$r_{XY}(\kappa) = \mu_x \cdot \mu_y = E[X(n + \kappa)]E[Y(n)] \quad (3.8)$$

---

### 3.3.4 Orthogonalität

---

$$r_{XY}(\kappa) = 0 \quad (3.9)$$

---

## 3.4 Kovarianz (Covariance, Central-SOMF)

---

$$c_{XX}(n + \kappa, n) = E[(X(n + \kappa) - E[X(n + \kappa)]) \cdot (X(n) - E[X(n)])] \quad (3.10a)$$

$$c_{XX}(n + \kappa, n) = r_{XX}(n + \kappa, n) - E[X(n + \kappa)]E[X(n)] \quad (3.10b)$$



---

### 3.4.1 Eigenschaften der Kovarianz

---

Falls  $X$  zumindest *stationär im weiteren Sinne*(3.2.1) ist, gilt

$$c_{XX}(\kappa) = r_{XX}(\kappa) - (E[X(n)])^2 \quad (3.11)$$

---

### 3.4.2 Kovarianz einer zusammengesetzten Funktion

---

Falls  $Y(n) = X(n) + V(n)$  und  $X(n)$  ist von  $V(n)$  statistisch unabhängig und einer der beiden Prozesse mittelwertfrei, dann gilt:

$$c_{YY}(\kappa) = C_{XX}(\kappa) + C_{VV}(\kappa) \quad (3.12a)$$

Ist  $X(n)$  jedoch abhängig von  $V(n)$ , so gilt:

$$c_{YY}(\kappa) = C_{XX}(\kappa) + C_{VV}(\kappa) + C_{XV}(\kappa) + C_{VX}(\kappa) \quad (3.12b)$$

---

### 3.4.3 Überführung der Central-SOMF in die Varianz

---

$$c_{XX}(0) = \text{Var}(X) \quad (3.13)$$

---

## 3.5 Kreuz-Kovarianz (Cross-covariance)

---

$$c_{XY}(n + \kappa, n) = E[(X(n + \kappa) - E[X(n + \kappa)]) \cdot (Y(n) - E[Y(n)])] \quad (3.14a)$$

$$c_{XY}(n + \kappa, n) = r_{XY}(n + \kappa, n) - E[X(n + \kappa)]E[Y(n)] \quad (3.14b)$$

---

### 3.5.1 Eigenschaften der Kreuzkovarianz

---

Falls  $X$  und  $Y$  zumindest *gemeinsam stationär im weiteren Sinne* (3.3.1) sind, gilt:

$$c_{XY}(\kappa) = r_{XY}(\kappa) - E[X(n)]E[Y(n)] \quad (3.15)$$

---

### 3.5.2 Unkorreliertheit (uncorrelated) anhand der Kreuzkovarianz

---

$$c_{XY}(\kappa) = 0 \quad (3.16)$$

---

## 3.6 Komplexe Prozesse

---

Seien  $X(n)$  und  $Y(n)$  reale Zufallsprozesse, so ist

$$Z(n) \triangleq X(n) + jY(n) \quad (3.17)$$

ein Komplexer Zufallsprozess

---

### 3.6.1 Erwartungswert eines Komplexen Zufallsprozess

---

$$E[Z(n)] = E[X(n)] + jE[Y(n)] \quad (3.18)$$

---

### 3.6.2 SOMF eines Komplexen Zufallsprozess

---

$$r_{ZZ}(n_1, n_2) = E[Z(n_1) \cdot Z(n_2)^*] \quad (3.19)$$

---

#### Besondere Eigenschaften

---

Für einen komplexen Zufallsprozess, welcher *stationär im weiteren Sinne* (3.2.1) ist, gilt

$$r_{ZZ}(-\kappa) = r_{ZZ}(\kappa)^* \quad (3.20)$$

---

### 3.6.3 cross-SOMF komplexer Zufallsprozesse

---

$$r_{Z_1 Z_2}(n_1, n_2) = E[Z_1(n_1) \cdot Z_2(n_2)^*] \quad (3.21)$$

---

### 3.6.4 Kovarianz (Covariance) eines komplexen Zufallsprozess

---

$$c_{ZZ}(n + \kappa, n) = E[(Z(n + \kappa) - E[Z(n + \kappa)]) \cdot (Z(n) - E[Z(n)])^*] \quad (3.22)$$

---

### 3.6.5 Kreuzkovarianz(cross-covariance) komplexer Zufallsprozesse

---

$$c_{Z_1 Z_2}(n + \kappa, n) = E[(Z_1(n + \kappa) - E[Z_1(n + \kappa)]) \cdot (Z_2(n) - E[Z_2(n)])^*] \quad (3.23)$$

---

### 3.6.6 Eigenschaften komplexer Zufallsprozesse

---

*Unkorreliertheit* verhält sich wie (3.5.2), genauso wie *Orthogonalität* (3.3.4)

---

## 4 Spektraldichten (Power Spectral Density)

---

### 4.1 Leistungsdichte

---

---

#### 4.1.1 Leistungsspektraldichte (Power Spectral Density, PSD)

---

$$S_{XX}(e^{j\omega}, \xi) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E} \left[ \left| X_N(e^{j\omega}, \xi) \right|^2 \right]}{2M + 1} \quad (4.1)$$

mit

$$X_N(e^{j\omega}, \xi) = \sum_{n=-M}^M x_N(n, \xi) e^{-j\omega n} \quad (4.2)$$

---

#### Eigenschaften der Leistungsspektraldichte

---

$$S_{XX}(e^{j\omega})^* = S_{XX}(e^{j\omega}) \quad \text{mit } X(n) \in \mathbb{C} \quad (4.3a)$$

$$S_{XX}(e^{j\omega}) \geq 0 \quad \text{mit } X(n) \in \mathbb{C} \quad (4.3b)$$

$$S_{XX}(e^{-j\omega}) = S_{XX}(e^{j\omega}) \quad \text{mit } X(n) \in \mathbb{R} \quad (4.3c)$$

---

## 4.1.2 Durchschnittliche Leistung eines Zufallsprozesses

---

$$P_{XX} = \int_{-\pi}^{\pi} S_{XX}(e^{j\omega}) \frac{d\omega}{2\pi} = r_{XX}(0) \quad (4.4a)$$

$$= \lim_{M \rightarrow \infty} \int_{-\pi}^{\pi} \frac{\mathbb{E} \left[ \left| X_N(e^{j\omega}, \xi) \right|^2 \right]}{2M+1} \frac{d\omega}{2\pi} \quad (4.4b)$$

---

## 4.1.3 Kreuzleistungsdichte (cross-power density)

---

$$S_{XY}(e^{j\omega}, \xi) = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{\mathbb{E} \left[ X_N(e^{j\omega}, \xi) Y_N(e^{j\omega}, \xi)^* \right]}{2M+1} \quad (4.5)$$

---

### Eigenschaften der Kreuzleistungsdichte

---

$$S_{XY}(e^{j\omega})^* = S_{YX}(e^{j\omega}) \quad \text{mit } X(n), Y(n) \in \mathbb{C} \quad (4.6a)$$

$$S_{XY}(e^{j\omega})^* = S_{YX}(-e^{j\omega}) \quad \text{mit } X(n), Y(n) \in \mathbb{R} \quad (4.6b)$$

$$\Re\{S_{XY}(e^{j\omega})\} \text{ und } \Re\{S_{YX}(e^{j\omega})\} \quad \text{sind gerade, wenn } X(n), Y(n) \in \mathbb{R} \quad (4.6c)$$

$$\Im\{S_{XY}(e^{j\omega})\} \text{ und } \Im\{S_{YX}(e^{j\omega})\} \quad \text{sind ungerade, wenn } X(n), Y(n) \in \mathbb{R} \quad (4.6d)$$

$$S_{XY}(e^{j\omega}) = S_{YX}(e^{j\omega}) = 0 \quad \text{wenn } X(n) \text{ und } Y(n) \text{ orthogonal (3.3.4)} \quad (4.6e)$$

---

## 4.1.4 Durchschnittliche Kreuzleistung zweier Zufallsprozesse

---

$$P_{XY} = \int_{-\pi}^{\pi} S_{XY}(e^{j\omega}) \frac{d\omega}{2\pi} \quad (4.7)$$

---

### 4.1.5 Wiener-Khinchine theorem

---

Ist  $X(n)$  ein *im weiteren Sinne stationärer* (3.2.1) Zufallsprozess, so kann die *Leistungsspektraldichte* (4.1.1) aus der Fourier-Transformation der *Momentenfunktion zweiter Ordnung* (SOMF) (3.2) gewonnen werden:

$$S_{XX}(e^{j\omega}) = \mathcal{F}\{r_{XX}(\kappa)\} = \sum_{\kappa=-\infty}^{\infty} r_{XX}(\kappa) e^{-j\omega\kappa} \quad (4.8a)$$

und invers

$$r_{XX}(\kappa) = \mathcal{F}^{-1}\{S_{XX}(e^{j\omega})\} = \int_{-\pi}^{\pi} S_{XX}(e^{j\omega}) (e^{j\omega\kappa}) \frac{d\omega}{2\pi} \quad (4.8b)$$

---

### 4.1.6 Kreuzleistungsdichte durch Cross-SOMF

---

$$S_{XY}(e^{j\omega}) = \mathcal{F}\{r_{XY}(\kappa)\} = \sum_{\kappa=-\infty}^{\infty} r_{XY}(\kappa) e^{-j\omega\kappa} \quad (4.9)$$

---

## 4.2 Kohärenz (coherence)

---

$$\text{Coh}_{XY}(e^{j\omega}) = \frac{|S_{XY}(e^{j\omega})|^2}{S_{XX}(e^{j\omega}) S_{YY}(e^{j\omega})} \quad (4.10)$$

---

### 4.2.1 Eigenschaften der Kohärenz

---

Die Kohärenz zwischen den Zufallsprozessen  $X(n)$  und  $Y(n)$  besagt, wie gut  $X$  zu  $Y$  bei einer gegebenen Frequenz  $\omega$  korrespondiert.

$$0 \leq \text{Coh}_{XY}(e^{j\omega}) \leq 1 \quad (4.11)$$

---

## 4.3 Root Mean Square (RMS) und Gleichstrom (DC) Werte

---

---

### 4.3.1 DC-Values

---

$$X_{dc} = \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^M X(n) = E[X(n)] = \mu_X \quad (4.12)$$

---

### 4.3.2 Normalisierte DC-Leistung

---

$$P_{dc} = \left[ \lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^M X(n) \right]^2 = E[X(n)]^2 = X_{dc}^2 \quad (4.13)$$

---

### 4.3.3 RMS-Value

---

$$X_{RMS} = \sqrt{\lim_{M \rightarrow \infty} \frac{1}{2M+1} \sum_{n=-M}^M X(n)^2} = \sqrt{r_{XX}(0)} = \sqrt{\int_{-\pi}^{\pi} S_{XX}(e^{j\omega}) \frac{d\omega}{2\pi}} \quad (4.14)$$

---

## 4.4 Spektrum

---

---

### 4.4.1 Spektrum eines stationären Zufallsprozesses

---

Ist  $X(n)$  ein *stationärer* (3.1) Zufallsprozess, so ist sein Spektrum die Fouriertransformierte der *Kovarianzfunktion* (3.4)

$$C_{XX}(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{xx}(n) e^{-j\omega n} \quad (4.15)$$

---

## Eigenschaften des Spektrums

---

1. Wenn  $\sum_n |c_{XX}(n)| < \infty$ , dann existiert  $C_{XX}$  und ist begrenzt und stetig
2.  $C_{XX}$  ist Real,  $2\pi$ -Periodisch und  $C_{XX} \geq 0$
- 3.

$$c_{XX}(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} C_{XX}(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (4.16)$$

---

### 4.4.2 Kreuzspektrum zweier gemeinsam stationärer Zufallsprozesse

---

Ist  $X(n)$  und  $Y(n)$  *gemeinsam stationär* (3.3.1), dann ist das Kreuzspektrum definiert durch

$$C_{XY}(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_{XY}(n) e^{-j\omega n} \quad (4.17)$$

---

### Eigenschaften der Kreuzspektrums

---

Das Spektrum eines Realen Zufallsprozesses ist komplett im Intervall  $[0, \pi]$  bestimmt

$$C_{XY}(e^{j\omega}) = C_{YX}(e^{j\omega})^* \quad (4.18a)$$

$$c_{XY}(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} C_{XY}(e^{j\omega}) e^{j\omega n} d\omega \quad (4.18b)$$

Wenn  $X(n), Y(n) \in \mathbb{R}$  dann

$$C_{XX}(e^{j\omega}) = C_{XX}(e^{-j\omega}) \quad (4.18c)$$

$$C_{XY}(e^{j\omega}) = C_{XY}(e^{-j\omega})^* = C_{YX}(e^{-j\omega}) = C_{YX}(e^{j\omega})^* \quad (4.18d)$$



---

# 5 Filter

---

## 5.1 Lineare Filter

---

Wenn  $X(n)$  und  $Y(n)$  *stationär* (3.1) sind,  $h(n)$  eine Impulsantwort eines LTI-Systems ist und das Filter *stabil* (5.1.1) ist, existiert mit *Wahrscheinlichkeit eins* (1.8.1) das lineare Filter mit:

$$Y(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)X(n-k) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(n-k)X(k) \quad (5.1)$$

---

### 5.1.1 Stabilität

---

Die Stabilität eines Filters ist gegeben, wenn:

$$\sum |h(n)| < \infty \quad (5.2)$$

*Alternativ:* Sei  $H(z)$  die z-Transformation des Filters  $h(n)$ . Dann ist das Filter stabil, falls die Polstellen von  $H(z)$  innerhalb des Einheitskreises liegen

---

### 5.1.2 Eigenschaften eines Linearen Filters

---

Die folgenden Eigenschaften gelten nur, wenn das Filter *stabil* (5.1.1) ist

- Ist  $X(n)$  *stationär* (3.1) und  $E[|X(n)|] < \infty$ , dann ist  $Y(n)$  *stationär*
- $Y(n)$  wird linearer Prozess genannt (linear process)

---

### 5.1.3 Instabiler linearer Filter

---

Ist das Filter nicht *stabil* (5.1.1), aber  $\int |H(e^{j\omega})| d\omega < \infty$  trifft zu und für  $X(n)$   $\sum |c_{XX}(n)| < \infty$ , sodann existiert im *Mean-Square-Sense* (1.8.2) die Formel (5.1) und  $Y(n)$  ist *stationär im weiteren Sinne* (3.2.1) mit

$$\mu_Y = E[Y(n)] = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)E[X(n-k)] = \mu_X H(e^{j0}) \quad (5.3)$$

---

### 5.1.4 Leistungsdichtespektrum des Ausgangs eines Filters

---

Sei die Übertragungsfunktion des Filters  $H(e^{j\omega}) = \frac{Y(e^{j\omega})}{X(e^{j\omega})}$ , und das Leistungsdichtespektrum von  $X(n)$  sei  $S_{XX}(e^{j\omega})$ , dann gilt:

$$S_{YY}(e^{j\omega}) = |H(e^{j\omega})|^2 S_{XX}(e^{j\omega}) \quad (5.4)$$

---

### 5.1.5 Spektrum/Kovarianz des Ausgangs eines Filters

---

Sei die Übertragungsfunktion des Filters  $H(e^{j\omega}) = \frac{Y(e^{j\omega})}{X(e^{j\omega})}$ , und das Sepektrum von  $X(n)$  sei  $C_{XX}(e^{j\omega})$ , dann gilt:

$$C_{YY}(e^{j\omega}) = |H(e^{j\omega})|^2 C_{XX}(e^{j\omega}) \quad (5.5a)$$

$$c_{YY}(\kappa) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} h(k)h(l) \cdot c_{XX}(\kappa - k + l) \quad (5.5b)$$

---

### 5.1.6 Kreuzkovarianz des Ausgangs des Filters

---

Sei  $X(n)$  das Eingangssignal und  $Y(n)$  das Ausgangssignal

$$c_{YX} = \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k)c_{XX}(\kappa - k) \quad (5.6a)$$

$$C_{YX}(e^{j\omega}) = H(e^{j\omega}) C_{XX}(e^{j\omega}) \quad (5.6b)$$

$$c_{YX} = \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega}) C_{XX}(e^{j\omega}) e^{-j\omega\kappa} \frac{d\omega}{2\pi} \quad (5.6c)$$

---

### 5.1.7 Kreuzkovarianz des Ausgangs zweier paralleler Filter

---

$$c_{Y_1 Y_2}(\kappa) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} h_1(k)h_2(l) \cdot c_{X_1 X_2}(\kappa - k + l) \quad (5.7a)$$

$$c_{Y_1 Y_2}(\kappa) = h_1(\kappa) \star h_2(\kappa)^* \star c_{X_1 X_2}(\kappa) \quad (5.7b)$$

$$C_{Y_1 Y_2}(e^{j\omega}) = H_1(e^{j\omega}) H_2(e^{j\omega})^* C_{X_1 X_2}(e^{j\omega}) \quad (5.7c)$$

---

## 5.1.8 Kaskade linearer Filter

---

$$H(e^{j\omega}) = \prod_{i=1}^L H_i(e^{j\omega}) \quad (5.8a)$$

$$C_{YY}(e^{j\omega}) = C_{XX}(e^{j\omega}) \prod_{i=1}^L |H_i(e^{j\omega})|^2 \quad (5.8b)$$

$$C_{YX}(e^{j\omega}) = C_{XX}(e^{j\omega}) \prod_{i=1}^L H_i(e^{j\omega}) \quad (5.8c)$$

---

## 5.2 Matched Filter

---

---

### 5.2.1 Annahmen des Matched Filters

---

- Das eingehende Signal  $X(n)$  besteht entweder aus einem Signal mit Rauschen oder nur Rauschen:

$$X(n) = \begin{cases} s(n) + V(n) \\ V(n) \end{cases} \quad (5.9)$$

- Dabei ist  $s(n)$  reellwertig, deterministisch und betrachtet in  $n \in [0, N)$
- $E[V(n)] = 0$  und  $C_{VV}(e^{j\omega})$  bekannt

---

### 5.2.2 Ziel des Matched Filters

---

Maximierung des Signal-Rausch-Verhältnis:

$$\left( \frac{S}{N} \right) = \max \frac{|s_0(n_0)|^2}{E[V_0(n_0)^2]} \quad (5.10)$$

---

### 5.2.3 Übertragungsfunktion des Matched Filters

---

Sei  $S(e^{j\omega}) = \mathcal{F}\{s(n)\}$ ,  $C_{VV}$  das Spektrum des Rauschens,  $n_0$  die Abtastungszeit, bei welcher  $(S/N)$  berechnet wird, und  $k$  eine reelle Konstante

$$H(e^{j\omega}) = k \frac{S(e^{j\omega})^*}{C_{VV}(e^{j\omega})} e^{-j\omega n_0} \quad (5.11)$$

Dabei geht der Signalverlauf am Ende des Filters verloren und der Filter kann zur Signaldetektion genutzt werden

---

### 5.2.4 Matched Filter für Weißes Rauschen

---

Bei weißem Rauschen wird die Impulsantwort des Filters zu

$$h(n) \equiv c \cdot s(n_0 - n) \quad (5.12)$$

⇒ Die Impulsantwort des Filters ist das bekannte Signal "rückwärts gespielt" und um  $n_0$  verschoben

Der Signal zu Rausch Abstand ergibt sich dann zu:

$$\left( \frac{S}{N} \right)_{out} = \frac{E_s}{\sigma_V^2} \quad (5.13)$$

---

## 5.3 Wiener Filter

---

---

### 5.3.1 Ziel des Wiener Filters

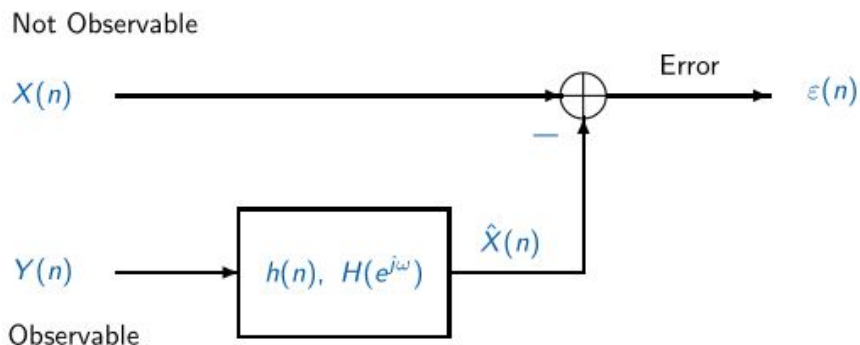
---

Der Wiener Filter versucht die optimale Schätzung (nach (1.8.2)) eines Zufallsprozesses durch die Beobachtung eines anderen Prozesses

---

### 5.3.2 Annahmen des Wiener Filters

---



- $X(n)$  ist der zu schätzende Zufallsprozess
- $Y(n)$  ist der betrachtete Zufallsprozess
- $\epsilon(n)$  ist der Fehlerprozess
- $X(n)$  und  $Y(n)$  sind reelwertig, mittelwertfrei und *gemeinsam stationär im weiteren Sinne* (3.3.1)
- Aufgrund der *gemeinsamen Stationarität im weiteren Sinne* (3.3.1) der beiden Prozesse ist die Impulsantwort  $h(n)$  stabil und der Fehlerprozess  $\epsilon(n)$  *stationär im weiteren Sinne* (3.2.1)

---

### 5.3.3 Die Übertragungsfunktion des Wiener Filters

---

Entstehend aus den *Wiener-Hopf-Gleichungen*

$$c_{XY}(\kappa) = h_{opt}(\kappa) \star C_{YY}(\kappa) \quad \kappa \in \mathbb{Z} \quad (5.14a)$$

$$C_{XY}(e^{j\omega}) = H_{opt}(e^{j\omega}) C_{YY}(e^{j\omega}) \quad \omega \in \mathbb{R} \quad (5.14b)$$

erlangt man die optimale Übertragungsfunktion:

$$H_{opt}(e^{j\omega}) = \frac{C_{XY}(e^{j\omega})}{C_{YY}(e^{j\omega})} \quad (5.15)$$

---

### 5.3.4 Mean Square Error des Wiener Filters

---

Der Mean Square Error ist als der Erwartungswert des quadrates der Fehlerfunktion definiert

$$q(h) = E[\epsilon_X^2(n)] \quad (5.16)$$

$$h_{opt} = \arg \min_h q(h), n \in \mathbb{Z} \quad (5.17)$$

Daraus folgt:

$$q_{min} = C_{XX}(0) - \sum_{m=-\infty}^{\infty} h_{opt}(m) C_{XY}(m) \quad (5.18a)$$

$$q_{min} = p(0) \quad \text{mit} \quad (5.18b)$$

$$p(\kappa) = C_{XX}(\kappa) - h_{opt}(\kappa) \star c_{YX}(\kappa)$$

---

### 5.3.5 Orthogonalitätsprinzip (Herleitung des Wiener Filters)

---

Zur minimierung des MSE setzt man das Fehlersignal  $\epsilon_X(n)$  als unkorreliert mit dem beobachteten Eingangssignal  $Y(n)$

$$C_{\epsilon_X Y}(\kappa) = E[\epsilon_X(n + \kappa) Y(n)] = 0 \quad (5.19)$$

---

### 5.3.6 Der Wiener Filter mit additivem Rasuschen

---

$$H_{opt}(e^{j\omega}) = \frac{C_{XX}(e^{j\omega})}{C_{XX}(e^{j\omega}) + C_{VV}(e^{j\omega})} \quad (5.20)$$

---

## 6 Sonstiges

---

### 6.1 Spezielle Funktionen

---

---

#### 6.1.1 Gaussian white noise process

---

GauSSsches weißes Rauschen ist immer *stationär* (3.1)

$$E[W(n)] = 0 \quad (6.1a)$$

$$r_{WW}(\kappa) = c_{WW}(\kappa) = \sigma_W^2 \delta(\kappa) \quad (6.1b)$$

$$S_{WW}(e^{j\omega}) = \sigma_W^2 \quad (6.1c)$$

---

#### 6.1.2 Kronecker delta function

---

$$\delta(\kappa) = \begin{cases} 1 & \kappa = 0 \\ 0 & \kappa \neq 0 \end{cases} \quad (6.2)$$

---

### 6.2 Mathematische nützliche Formeln

---

---

#### 6.2.1 Ungleichung von Schwarz

---

$$\left| \int_a^b \varphi_1(\omega) \varphi_2(\omega) d\omega \right|^2 \leq \left( \int_a^b |\varphi_1(\omega)|^2 d\omega \right) \cdot \left( \int_a^b |\varphi_2(\omega)|^2 d\omega \right) \quad (6.3)$$

---

## 6.2.2 Orthogonalitäts- und Normierungsbeziehungen

---

$$\int_0^{2\pi} \cos(mt)\cos(nt)dt = 0 \quad \text{für } m \neq n \quad (6.4a)$$

$$\int_0^{2\pi} \sin(mt)\sin(nt)dt = 0 \quad \text{für } m \neq n \quad (6.4b)$$

$$\int_0^{2\pi} \cos(mt)\sin(nt)dt = 0 \quad (6.4c)$$

$$\int_0^{2\pi} \cos^2(nt) = \begin{cases} \pi & \text{für } n \geq 1 \\ 2\pi & \text{für } n = 0 \end{cases} \quad (6.4d)$$

$$\int_0^{2\pi} \sin^2(nt) = \begin{cases} \pi & \text{für } n \geq 1 \\ 0 & \text{für } n = 0 \end{cases} \quad (6.4e)$$

$$\int_0^{2\pi} \cos(k+t)dt = 0 \quad \text{mit } k = \text{const} \quad (6.4f)$$

$$\int_0^{2\pi} \sin(k+t)dt = 0 \quad \text{mit } k = \text{const} \quad (6.4g)$$

---

## 6.2.3 Betragsquadrat komplexer Funktionen

---

$$|H(e^{j\omega})|^2 = H(e^{j\omega})H(e^{-j\omega}) \quad (6.5)$$

---

## 6.2.4 Doppelte Faltungssumme

---

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(m)h(k)f(k-m) = h(n) \star f(0) \star h(-n) \quad (6.6)$$



---

## 6.2.5 Einzelne Faltungssumme ohne Differenz im Argument

---

$$\sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)f(m) = h(-n) \star f(0) \quad (6.7)$$