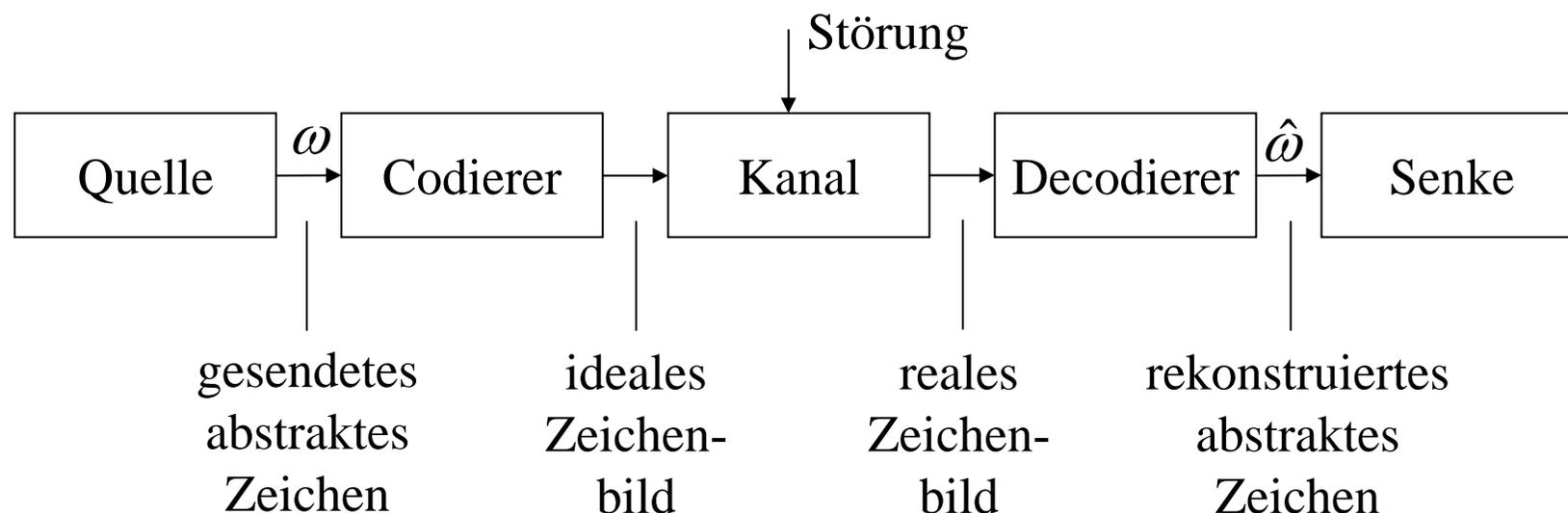


# Kapitel 7

## Bayes- oder Optimalklassifikator

# Der Entwurf eines optimalen Klassifikators

- Letztes Glied in der Mustererkennungskette
- Der Klassifikator hat die Aufgabe einer optimalen Zuordnung eines Merkmalsvektors zu einer Bedeutungsklasse
- Grundlage für den Entwurf: Statistische Entscheidungstheorie
- Beschreibung des Erkennungssystems in Analogie zu einem Nachrichtenübertragungssystem:



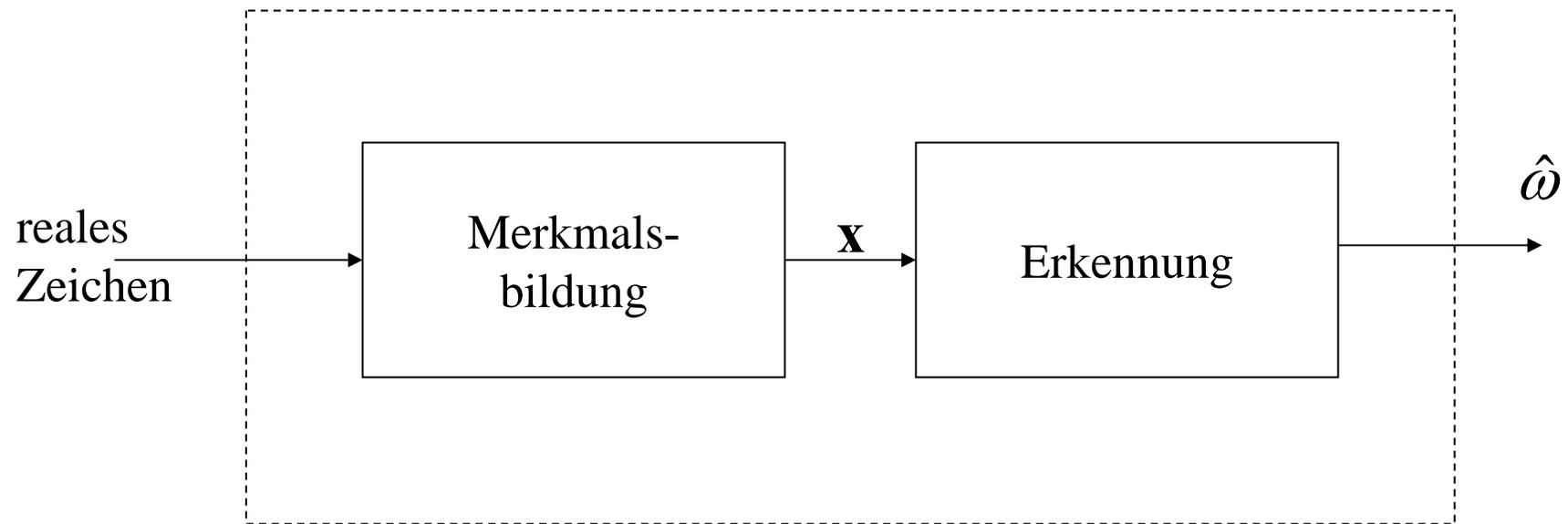
# Über die einzelnen Komponenten

Codierer: aus einem abstrakten Quellzeichen  $K$  entsteht ein  
Schriftzeichen: z.Bsp. OCR-B

Störung: beinhaltet alle Veränderungen wie z.B. eigentlicher Druck-  
oder Schreibvorgang, mögliche Verschmutzungen, Fehler des  
Scanners usw.

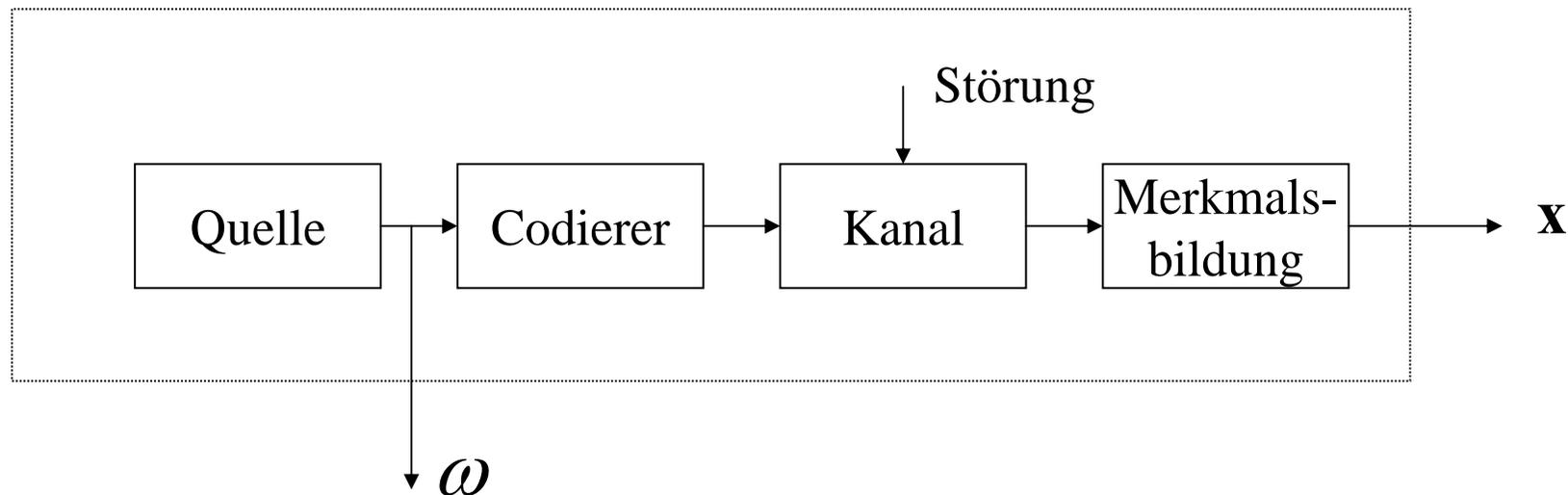
Decodierer: Lesemaschine, rekonstruiert das gesendete Zeichen,  
übergibt Entscheidung an Senke

# Aufbau des Decodierers



# Stochastisches Modell

Der zeichenerzeugende Prozeß erzeugt jeweils miteinander verbundene Wertepaare  $(\omega, \mathbf{x})$



Seine statistischen Eigenschaften werden vollständig durch die **Verbundverteilung** beschrieben:

$$p(\omega, \mathbf{x}) = p(\mathbf{x}, \omega) \quad \omega \in \{\omega_i\} \quad i = 1, 2, \dots, K$$

$\omega$  diskret,  $\mathbf{x}$  kontinuierlich

# Optimalitätskriterium

Gesucht ist ein Klassifikator, welcher „bestmöglich“ nach einem vorgegebenen statistischen Gütekriterium klassifiziert (Optimalklassifikator)

Wählt man als Optimalitätskriterium die *Minimierung von Fehlentscheidungen* bei vielen Versuchen, so ergibt sich ein Klassifikator, welcher die A-posteriori-Wahrscheinlichkeit maximiert (Maximum-A-Posteriori-Klassifikator):

$$\max_K \{P(\omega_k | \mathbf{x})\} \quad \text{MAP- oder Bayes-Klassifikator}$$

Grundlage der Optimalentscheidung ist die **a-posteriori-** oder **Rückschlusswahrscheinlichkeit**  $P(\omega_k|\mathbf{x})$ . Dies ist die **bedingte Wahrscheinlichkeit**, dass bei einem beobachteten Wert  $\mathbf{x}$  das Zeichen  $\omega_k$  vorlag.

Diese kann mit dem Bayes-Theorem wie folgt umgewandelt werden:

$$P(\omega_k | \mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, \omega_k)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x} | \omega_k)P(\omega_k)}{p(\mathbf{x})}$$

mit der Randverteilung:

$$p(\mathbf{x}) = \sum_K p(\mathbf{x}, \omega_k) = \sum_K p(\mathbf{x} | \omega_k)P(\omega_k)$$

# Theorem von Bayes

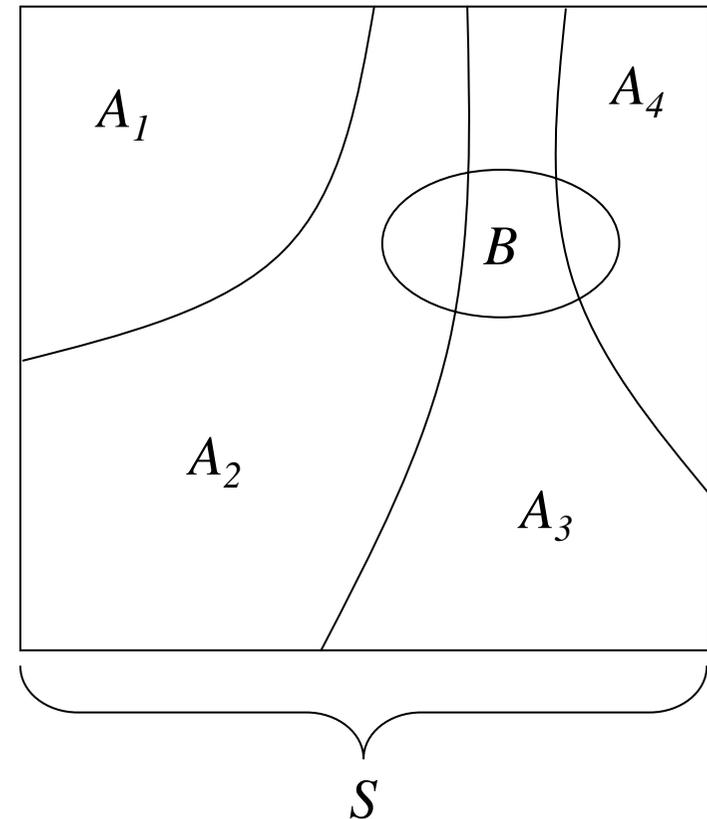
$A_i$  seien sich gegenseitig ausschliessende  
(disjunkte) Ereignisse

$$S = \bigcup_{i=1}^n A_i \quad \text{Ereignisraum (sample space)}$$

$B$  sei ein beliebiges Ereignis. Dann gilt:

$$P(A_i | B) = \frac{P(A_i, B)}{P(B)} = \frac{P(B | A_i)P(A_i)}{\sum_{j=1}^n P(B | A_j)P(A_j)}$$

$$\Rightarrow P(A_i | B)P(B) = P(A_i, B) = P(B | A_i)P(A_i)$$



# Beispiel

Die Anwendung des Theorems soll nun durch ein Beispiel veranschaulicht werden. Im Beispiel tritt das Ereignis  $B$  „Die Reifen eines Autos quietschen.“ mit der Wahrscheinlichkeit  $P(B)=0,05$  auf; die Hypothese  $A$  „Die Bremsen des Autos sind schlecht eingestellt.“ mit der Wahrscheinlichkeit  $P(A)=0,02$ .

Nehmen wir weiters an, daß schlecht eingestellte Bremsen oft, aber nicht immer, ein Quietschen der Räder verursachen. Die bedingte Wahrscheinlichkeit dafür ist  $P(B|A)=0,7$ . Wenn man nun ein Quietschen der Reifen beobachtet, so kann man mit Hilfe des Bayes'schen Theorem die Wahrscheinlichkeit berechnen, daß die Bremsen schlecht eingestellt sind:

$$P(A | B) = \frac{P(B | A) * P(A)}{P(B)} = \frac{0,7 * 0,02}{0,05} = 0,28$$

Durch die Beobachtung des Ereignisses  $B$  hat sich die Wahrscheinlichkeit der Hypothese  $A$  von 0,02 auf 0,28 erhöht. Die Berechnung von  $P(A|B)$  ausgehend von  $P(A)$  kann als Neubewertung der Hypothese  $A$  beim Eintreten des Ereignisses  $B$  aufgefaßt werden.

Darin liegt die Stärke dieses Theorems. Mit ihm läßt sich die Fortpflanzung der Unsicherheit berechnen. Der Nachteil ist jedoch, daß zu jedem Ereignis und zu jeder Hypothese die Wahrscheinlichkeit und die entsprechenden bedingten Wahrscheinlichkeiten gespeichert werden müssen. Dies erfordert eine große Datenmenge, die schwer zu beschaffen ist und auch oft nicht mit mathematischer Exaktheit beschafft werden kann. [[Gottlob1990](#)]

# Bayes- oder Maximum-A-Posteriori (MAP) Klassifikator

Maximierung der a-posteriori oder Rückschlusswahrscheinlichkeit zur Entscheidung der Klassenzugehörigkeit:

$$\begin{aligned} & \max_{\omega_i} P(\omega_i | \mathbf{x}) \\ \Rightarrow & P(\omega_i | \mathbf{x}) \stackrel{?}{\gtrless} P(\omega_j | \mathbf{x}) \quad \checkmark \\ \Rightarrow & \boxed{\frac{p(\mathbf{x} | \omega_i) P(\omega_i)}{\cancel{p(\mathbf{x})}} \stackrel{?}{\gtrless} \frac{p(\mathbf{x} | \omega_j) P(\omega_j)}{\cancel{p(\mathbf{x})}}} \end{aligned}$$

*p(x) auf beiden Seiten gleich!*

Bayes- oder MAP-Klassifikator

Bei gleichwahrscheinlicher a-priori-Verteilung  $P(\omega_i) = P(\omega_j)$  erhält man daraus:

$$\boxed{p(\mathbf{x} | \omega_i) \stackrel{?}{\gtrless} p(\mathbf{x} | \omega_j)}$$

MLE-Klassifikator  
(Maximum-Likelihood Estimation)

# Optimalklassifikatoren

$$\max_k \{P(\omega_k | \mathbf{x})\}$$

$$\square \max_k \{p(\mathbf{x} | \omega_k)P(\omega_k)\}$$

Bayes- oder MAP-  
Klassifikator

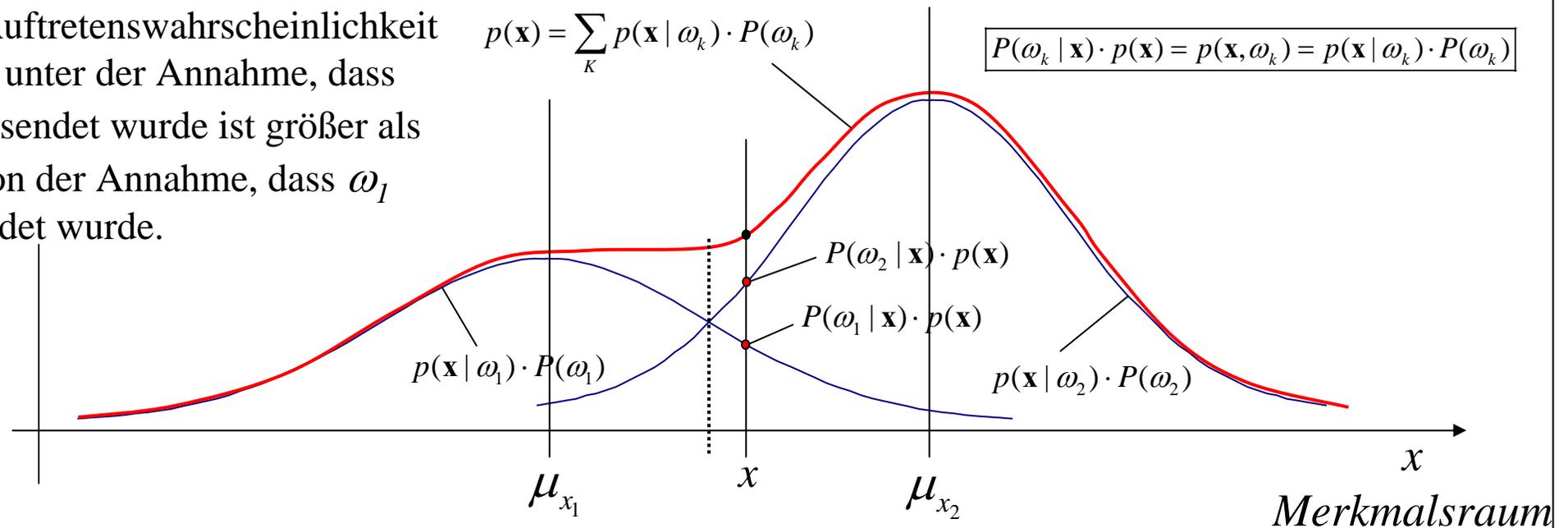
Das MAP-Kriterium wird zurückgeführt auf klassenspezifische Verteilungsdichten, welche gemessen werden können.

$$\max_K \{p(\mathbf{x} | \omega_k)\}$$

Maximum-Likelihood-Klassifikator  
( $p(\mathbf{x}|\omega_k)$  Bed. Wahrscheinlichkeit von  $\mathbf{x}$  bzgl.  $\omega_k$ )

# Zwei-Klassen-Problem mit Gaußverteilungsdichten und einem skalaren Merkmal $x$

Die Auftretenswahrscheinlichkeit von  $x$  unter der Annahme, dass  $\omega_2$  gesendet wurde ist größer als die von der Annahme, dass  $\omega_1$  gesendet wurde.



$$p(\mathbf{x} | \omega_i)P(\omega_i) \stackrel{?}{\gtrless} p(\mathbf{x} | \omega_j)P(\omega_j)$$

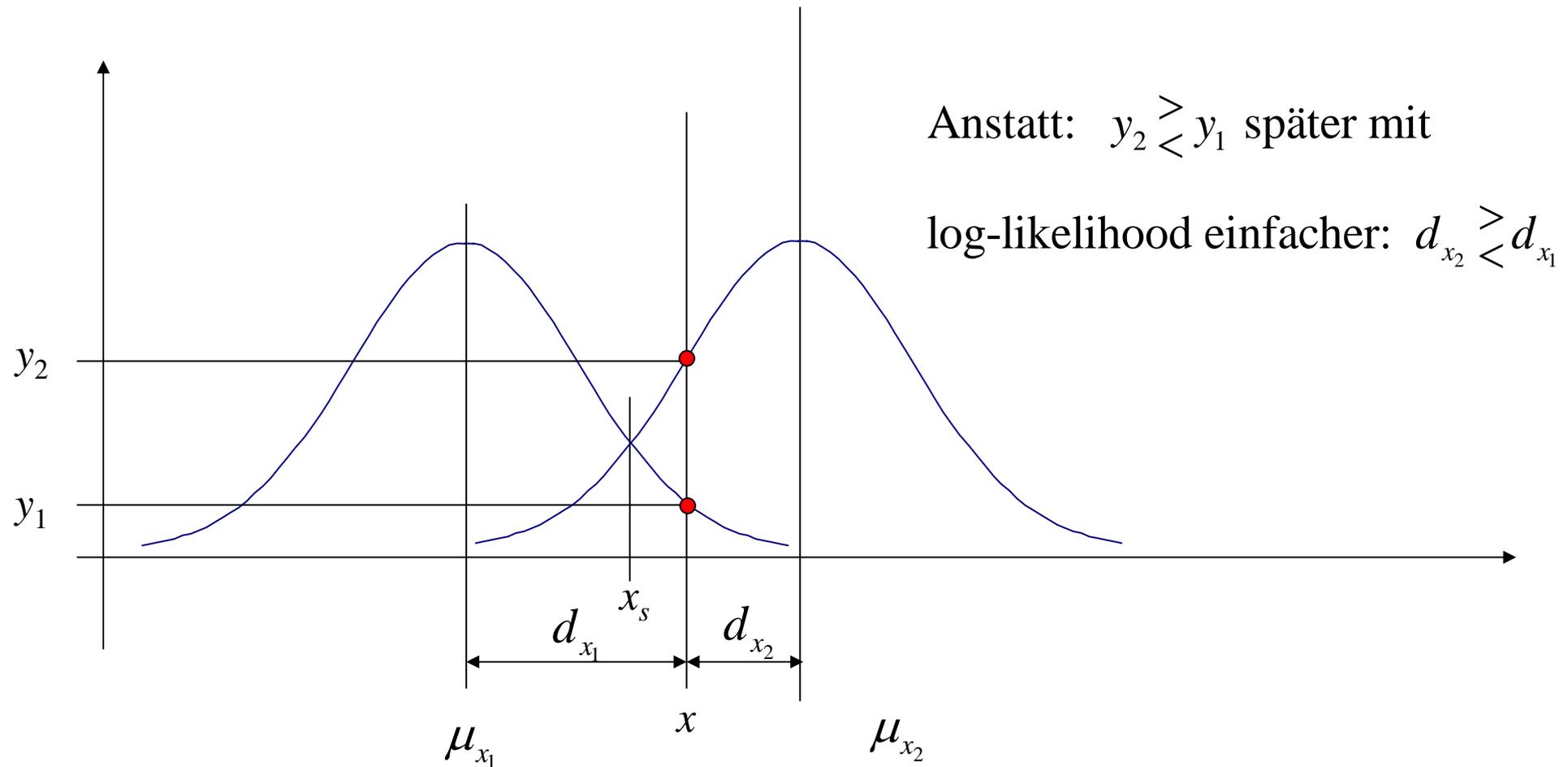
$p(\mathbf{x}|\omega_k)$  *Klassenspezifische Verteilungsdichte* für den Merkmalsvektor  $\mathbf{x}$ , die der Klasse  $k$  zuzuordnen sind.

A-priori-W. für die Häufigkeit der Quellsymbole:  $P(\omega_k)$

(Quellstatistik, Auftretens-W. für die Ereignisse  $\omega_k$ , z.Bsp. Buchstaben in einer Sprache)

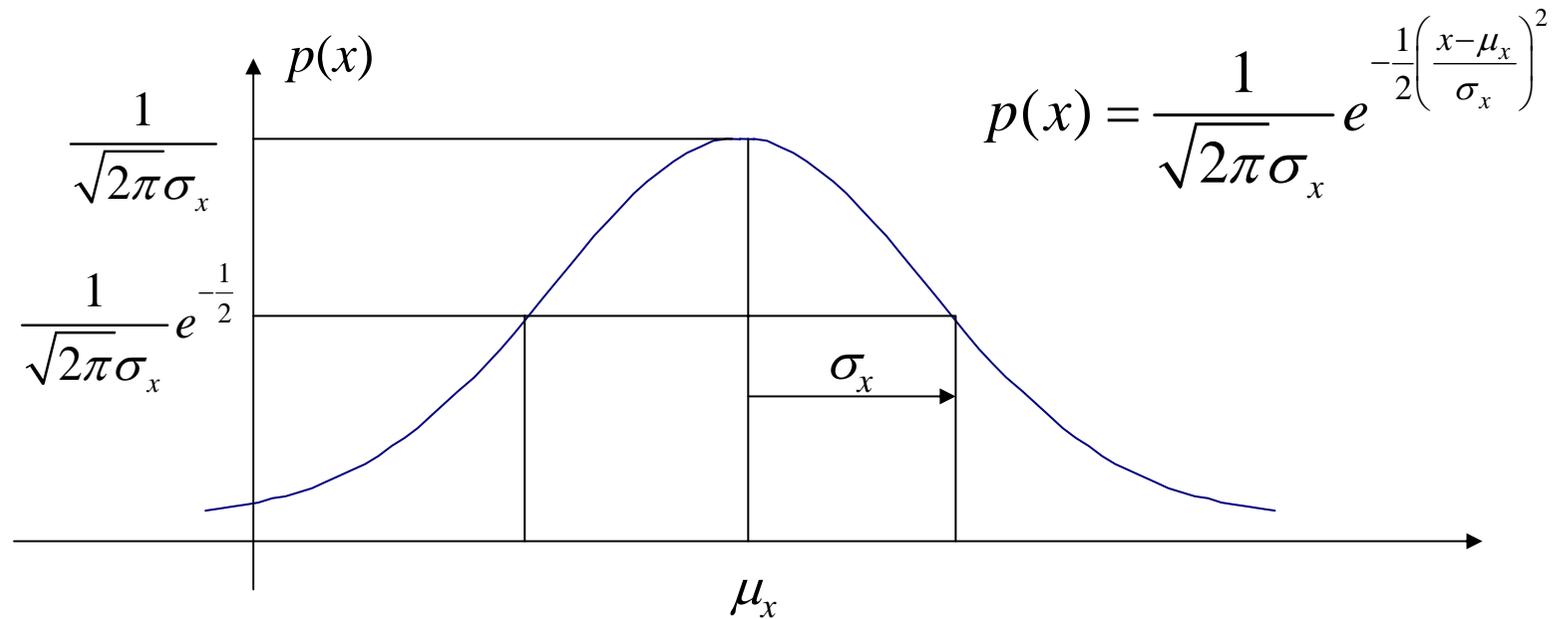
Die W., dass  $x$  gemessen wird ergibt sich aus der Überlagerung der Auswirkungen, dass  $\omega_k$  gesendet wurde: 
$$p(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x} | \omega_1)P(\omega_1) + p(\mathbf{x} | \omega_2)P(\omega_2) + \dots = \sum_K p(\mathbf{x} | \omega_k)P(\omega_k)$$

# Entscheidung mit Log-Likelihood



# Normalverteilte klassenspezifische Merkmale $p(\mathbf{x}|\omega_k)$

Eindimensionaler Fall:



Erwartungswert von  $x$ :  $\mu_x = E\{x\} = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} x \cdot p(x) dx$

Varianz:  $\text{var}(x) = \sigma_x^2 = E\{(x - \mu_x)^2\} = \int_{x=-\infty}^{x=+\infty} (x - \mu_x)^2 \cdot p(x) dx$

Standardabweichung:  $\sigma_x = \sqrt{\text{var}(x)}$

# $N$ -dimensionale Normalverteilung

Erwartungswert:  $\boldsymbol{\mu}_x = E(\mathbf{x})$  (Vektor)

Statt Varianz  $\sigma^2$  nun Autokovarianzmatrix:

$$\mathbf{K} = \mathbf{C}_{\mathbf{xx}} = E\{(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})^T\} = \mathbf{R}_{\mathbf{xx}} - \bar{\mathbf{x}}\bar{\mathbf{x}}^T$$

$N$ -dimensionale Normalverteilung:  $p(\mathbf{x}) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\mathbf{K})}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x)^T \mathbf{K}^{-1}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x)}$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_{1,1} & K_{1,2} & \cdots & K_{1,N} \\ K_{2,1} & K_{2,2} & \cdots & K_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ K_{N,1} & K_{N,2} & \cdots & K_{N,N} \end{bmatrix}$$

$$K_{m,n} = E\{(x_m - \mu_{x_m})(x_n - \mu_{x_n})\}$$

$$K_{n,n} = E\{(x_n - \mu_{x_n})^2\}$$

$\mathbf{K}$ : a) symmetrisch

b) positiv semidefinit

# $N$ -dimensionale Normalverteilung

Aus der Positiv-Semidefinitheit folgt:  $\mathbf{a}^T \mathbf{K} \mathbf{a} \geq 0$  für beliebige  $\mathbf{a} \neq 0$

Falls eine oder mehr Komponenten Linearkombinationen von anderen sind, ist  $\mathbf{K}$  semidefinit, andernfalls positiv definit (soll hier i.allg. angenommen werden).

Falls  $\mathbf{K}$  pos. definit, dann auch  $\mathbf{K}^{-1} \Rightarrow \det(\mathbf{K}) > 0$  und  $\det(\mathbf{K}^{-1}) > 0$ .

Ortskurven konstanter Wahrscheinlichkeitsdichten:

$$Q = (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x)^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_x) = \text{const.}$$

Diese quadratische Form ergibt Kegelschnitte und für pos. def.  $\mathbf{K}^{-1}$  erhält man  $N$ -dimensionale Ellipsoide.

# $N=2$ : Ellipsen

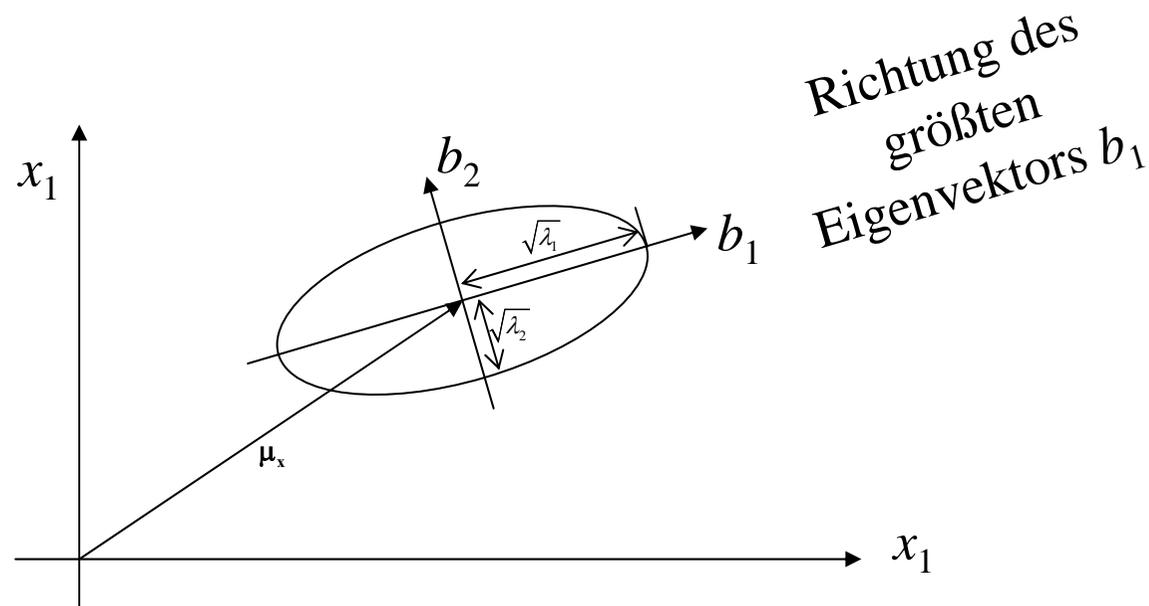
Aus der Eigenwertgleichung:

$$\mathbf{K}\mathbf{b} = \lambda\mathbf{b} \Rightarrow [\mathbf{K} - \lambda\mathbf{I}]\mathbf{b} = 0$$

Ergeben sich die

Eigenwerte:  $\lambda_1, \lambda_2$

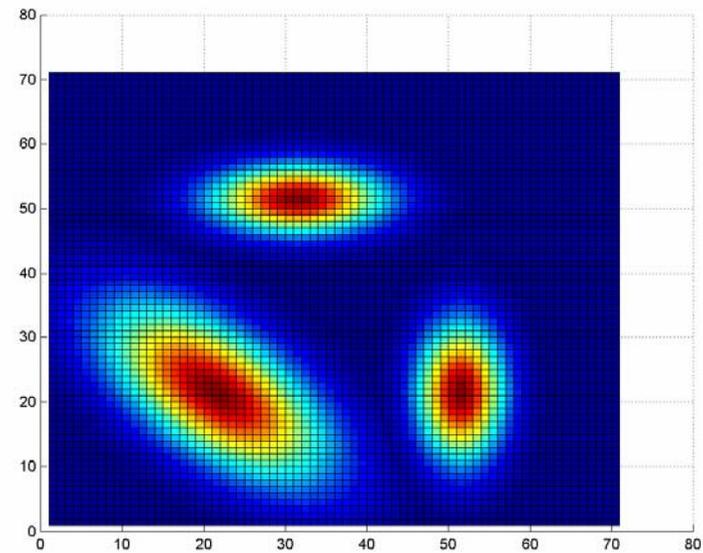
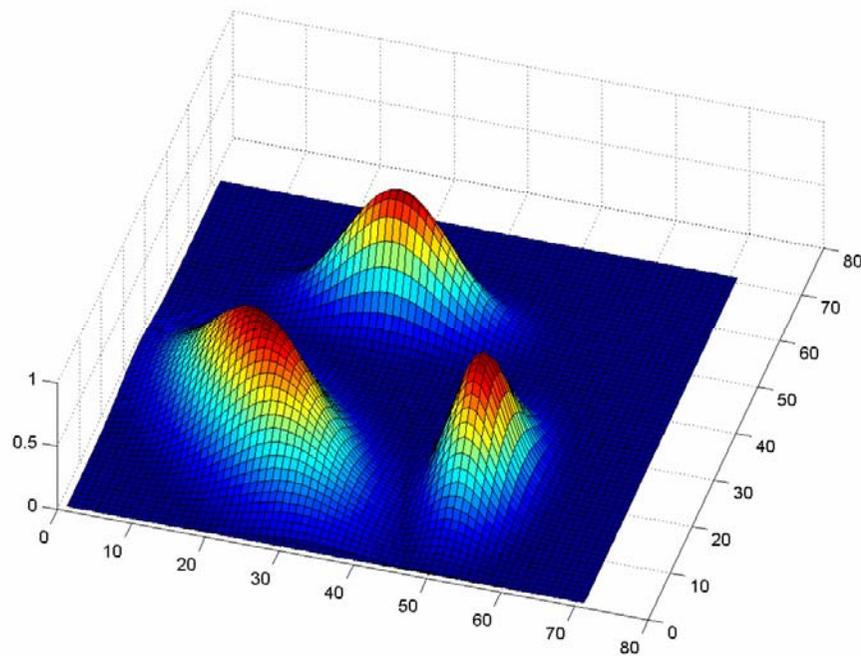
und die Eigenvektoren:  $b_1, b_2$



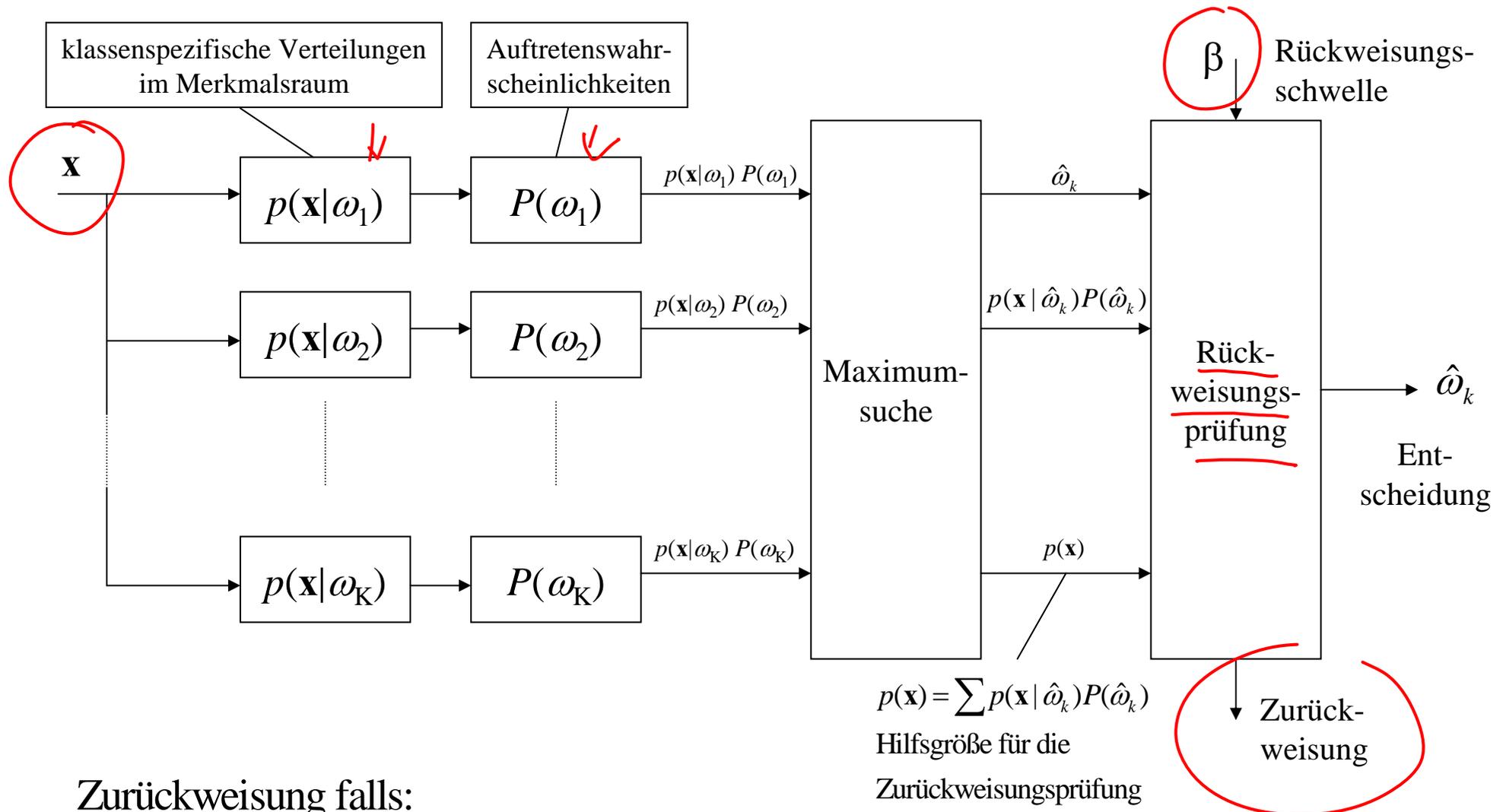
# Der Bayes-Klassifikator

$$\max_{\omega_i} P(\omega_i | x)$$

Annahme: Klassenspezifische  
Gauß-Verteilungen



# Optimales Erkennungssystem



Zurückweisung falls:

$$p(\mathbf{x}|\hat{\omega}_k)P(\hat{\omega}_k) < \beta p(\mathbf{x})$$

$$\text{d.h. } P(\hat{\omega}_k | \mathbf{x}) < \beta$$

Falls Wahrscheinlichkeit einen zu geringen Wert hat

→ Zurückweisung (sonst wäre Entscheidung sehr unsicher)

# Zur Positiv-Definitheit der Kovarianzmatrix $\mathbf{K}$

Man erwartet, dass die Beobachtungen des Zufallsprozesses unabhängig sind.

$$\text{Beh.: } Q = \mathbf{z}^T \mathbf{K} \mathbf{z} > 0 \quad \text{für } \forall \mathbf{z} \neq \mathbf{0}$$

$$\begin{aligned} Q &= \mathbf{z}^T E\{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T\} \mathbf{z} \\ &= E\{\mathbf{z}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{z}\} = E\{\underbrace{[(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu})^T \mathbf{z}]^2}_{=w \text{ (Skalar)}}\} \\ &= E\{w^2\} > 0 \quad \text{für } w \neq 0 \end{aligned}$$

Der singuläre Fall  $Q=0$  bedeutet, dass der Zufallsprozess  $(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}) \perp \mathbf{z}$  steht, d.h. er belegt nur einen linearen Unterraum des  $N$ -dimensionalen Beobachtungsraumes  $\mathbb{R}^N$ . Dies ist dann der Fall, wenn die Zufallsvariablen nicht den ganzen Raum aufspannen, d.h. wenn ein Vektor linear abhängig ist von anderen (z.B. wenn die Beobachtungen im dreidimensionalen Raum immer nur in einer Ebene liegen).

Für einzelne Vektoren darf die Orthogonalität  $(\mathbf{x}-\boldsymbol{\mu}) \perp \mathbf{z}$  gegeben sein, jedoch nicht für das ganze Ensemble, so dass  $E\{\dots\}=0$ .

# Konsequenzen der Positiv-Definitheit von $\mathbf{K}$

- $\mathbf{K}$  ist regulär und es existiert  $\mathbf{K}^{-1}$
- $\det(\mathbf{K}) > 0$
- $\mathbf{K}^{-1}$  ist ebenfalls positiv definit
- $\det(\mathbf{K}^{-1}) > 0$
- Die Eigenwerte von  $\mathbf{K}$  sind positiv

# Fall 1: Klassenweise beliebige normalverteilte Merkmale

Mit dieser Annahme kann das MAP-Kriterium weiter spezifiziert werden:

$$p(\mathbf{x}, \omega_k) = p(\mathbf{x} | \omega_k) \cdot P(\omega_k)$$

Der zeichenerzeugende Prozess zerfällt in  $K$  voneinander unabhängige Teilprozesse  $\{p(\mathbf{x}|\omega_k)\}$  mit den Kenngrößen:

$\boldsymbol{\mu}_{x_k} = E\{\mathbf{x} | \omega_k\}$  klassenspezifischer Erwartungswert

$\mathbf{K}_k = E\{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})^T | \omega_k\}$  klassenspezifische Kovarianzmatrix

Berechnet man die k-te Entscheidungsfunktion des MAP-Kriteriums, so ergibt sich:

$$D_k(\mathbf{x}) = p(\mathbf{x} | \omega_k) \cdot P(\omega_k) = \frac{P(\omega_k)}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\mathbf{K}_k)}} e^{-\frac{1}{2}(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})^T \mathbf{K}_k^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})}$$

Mit Hilfe einer monotonen Abbildung ln(...), welche die Größenverhältnisse nicht verändert, ergibt sich:

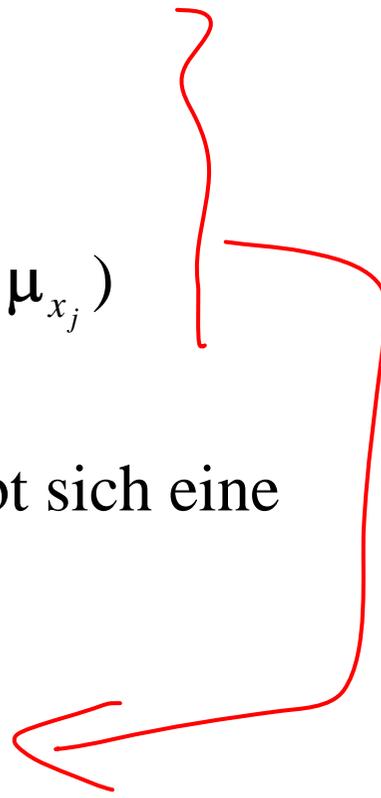
$$D'_k(\mathbf{x}) = \ln P(\omega_k) - \frac{1}{2} \ln(\det(\mathbf{K}_k)) - \frac{1}{2} [(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})^T \mathbf{K}_k^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})]$$

mit abschließendem Maximumvergleich.

Die Grenzen zwischen den Klassengebieten ergeben sich zu:

$$D'_i(\mathbf{x}) = D'_j(\mathbf{x})$$


daraus ergibt sich die Grenzfläche  $g_{ij}(\mathbf{x}) = 0$ , mit:

$$g_{ij}(\mathbf{x}) = \ln \frac{\det \mathbf{K}_i}{\det \mathbf{K}_j} - 2 \ln \frac{P(\omega_i)}{P(\omega_j)} \\ + (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_i})^T \mathbf{K}_i^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_i}) - (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_j})^T \mathbf{K}_j^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_j})$$


Aus der Differenz zweier quadratischen Formen ergibt sich eine gemeinsame quadratische Form der Gestalt:

$$g_{ij}(\mathbf{x}) = g_0 + (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)^T \mathbf{M}^{-1} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_0)$$


mit:

$$g_0 = \ln \frac{\det \mathbf{K}_i}{\det \mathbf{K}_j} - 2 \ln \frac{P(\omega_i)}{P(\omega_j)} + \boldsymbol{\mu}_{x_i}^T \mathbf{K}_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_{x_i} - \boldsymbol{\mu}_{x_j}^T \mathbf{K}_j^{-1} \boldsymbol{\mu}_{x_j} + \mathbf{x}_0^T \mathbf{M}^{-1} \mathbf{x}_0$$

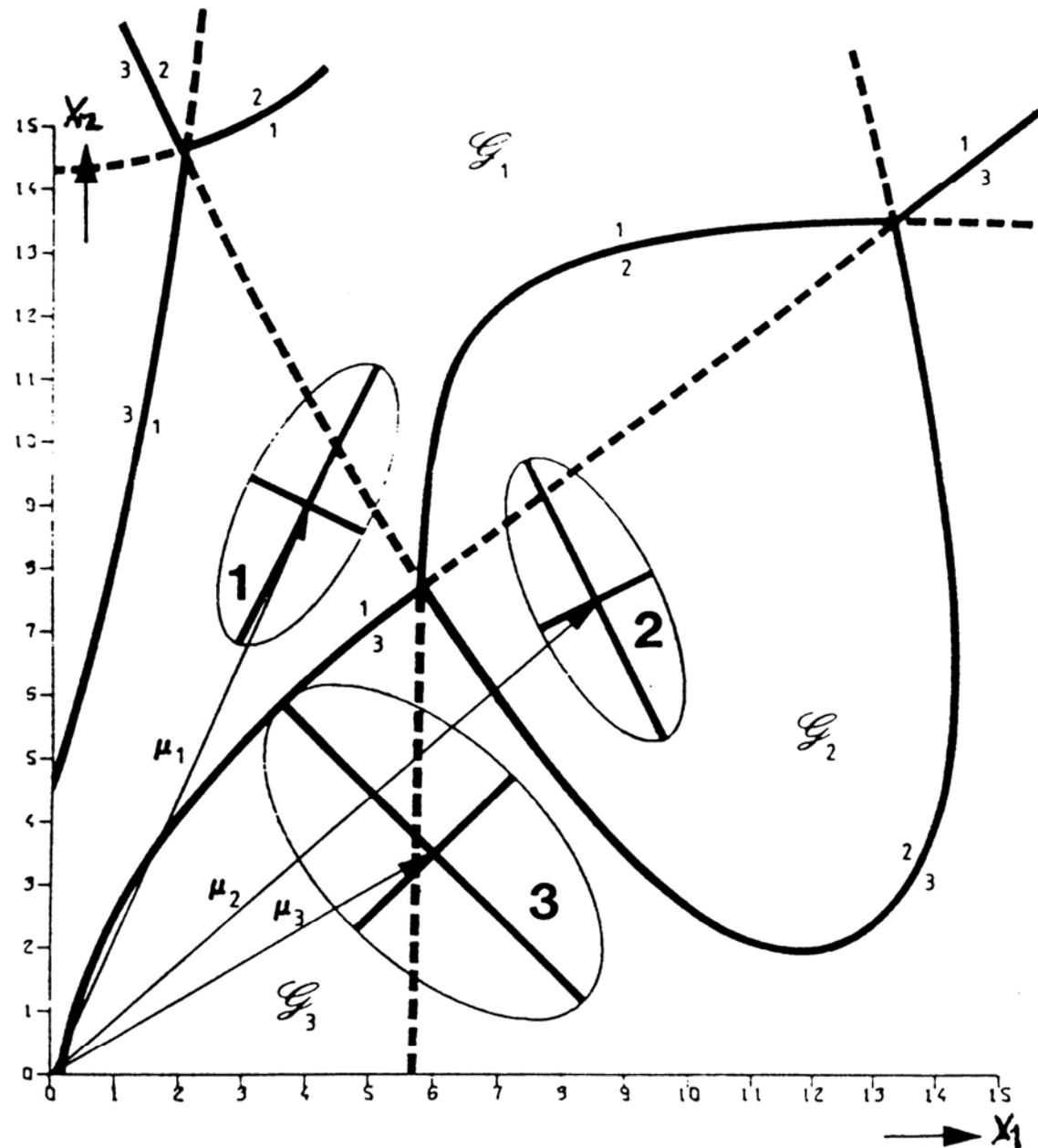
$$\mathbf{x}_0 = \mathbf{M}[\mathbf{K}_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_{x_i} - \mathbf{K}_j^{-1} \boldsymbol{\mu}_{x_j}]$$

$$\mathbf{M} = [\mathbf{K}_i^{-1} - \mathbf{K}_j^{-1}]^{-1} = \mathbf{K}_i [\mathbf{K}_j - \mathbf{K}_i]^{-1} \mathbf{K}_j \\ = \mathbf{K}_j [\mathbf{K}_j - \mathbf{K}_i]^{-1} \mathbf{K}_i$$

Die die quadratische Form charakterisierende Matrix  $\mathbf{M}^{-1}$  ist nun nicht mehr zwingend pos. definit  $\Rightarrow$  die Grenzflächen zwischen den Gebieten sind allgemeine Kegelschnitte (bei  $N=2$ : Ellipsen, Parabeln, Hyperbeln, Linien)

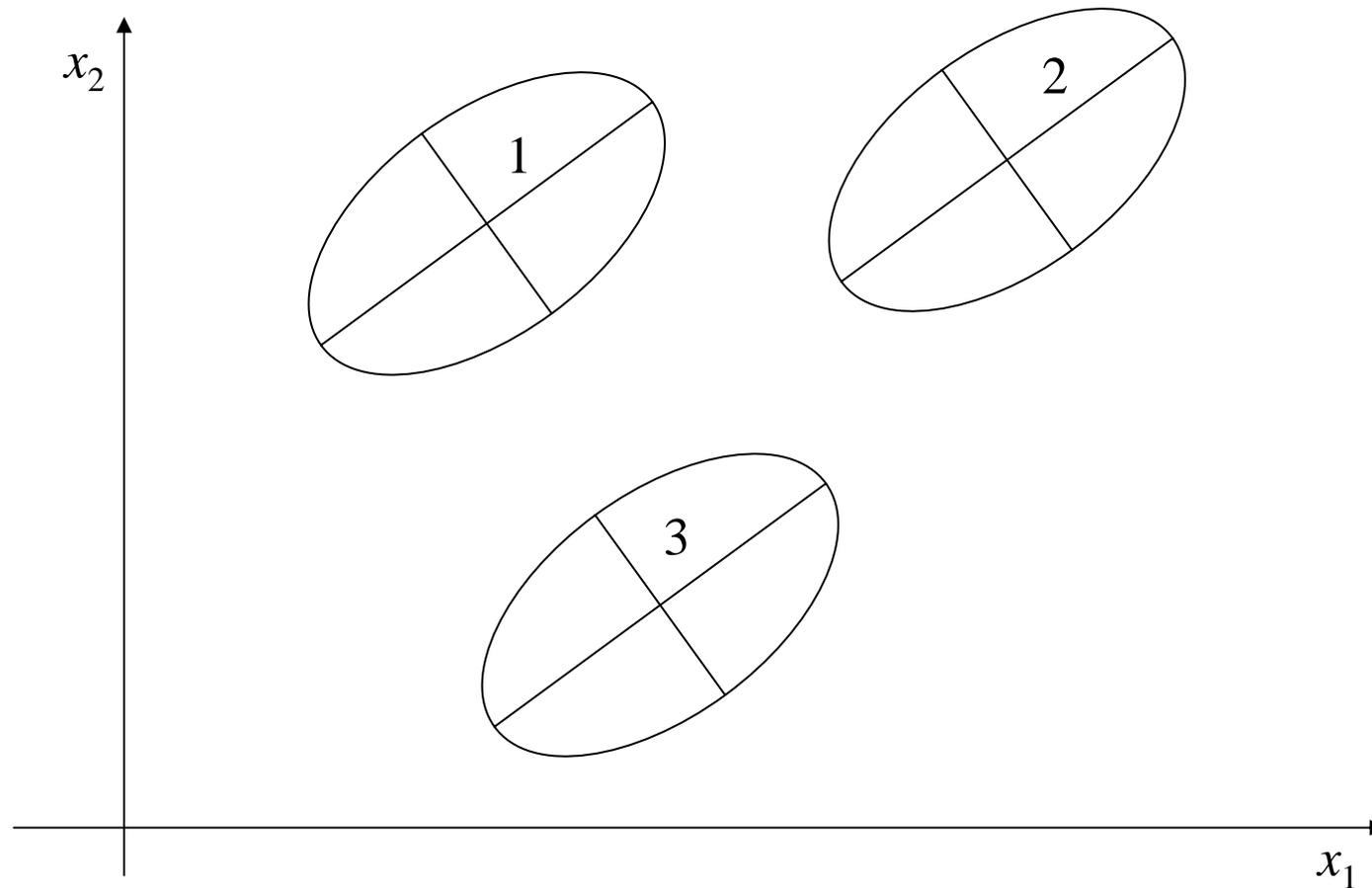
Die Unterscheidungsfunktionen  $D'_k(\mathbf{x})$  sind in Bezug auf den Merkmalsvektor quadratische Funktionen oder Polynome zweiten Grades (quadratischer oder Polynomklassifikator)

# Klassenweise normalverteilte Merkmale



(aus J. Schürmann: „Polynomklassifikatoren für die Zeichenerkennung“, Oldenbourg Verlag)

# Fall 2: Klassenweise normalverteilte Merkmale mit identischen Kovarianzmatrizen **K**



## Fall 2: Klassenweise normalverteilte Merkmale mit identischen Kovarianzmatrizen $\mathbf{K}$

Entscheidungsfunktion:

$$D'_k(\mathbf{x}) = \ln P(\omega_k) - \frac{1}{2} \ln(\det \mathbf{K}) - \frac{1}{2} [(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})]$$

$$D''_k = -2D'_k - \ln(\det \mathbf{K})$$

$$\Rightarrow D''_k = -2 \ln P(\omega_k) + (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})$$

Für gleiche Auftretenswahrscheinlichkeiten  $P(\omega_k) = 1/K$  folgt:

$$D'''_k = D''_k - 2 \ln K$$

$$\Rightarrow \boxed{D'''_k = d_M^2 = (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})}$$

Mahalanobis-Abstands-Klassifikator

Dies ist eine allgemeine gewichtete quadratische Metrik.

# Formulierung als linearer Klassifikator

Die Entscheidungsfunktion enthält noch einen quadratischen Term. Dieser ist jedoch für jede Klasse identisch und kann somit eliminiert werden. Damit kommt man zu einer linearen Formulierung des Klassifikators.

Alternativ ergibt sich:

$$D''_k = D'_k + \frac{1}{2} [\ln(\det \mathbf{K}) + \mathbf{x}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}]$$

$$\Rightarrow D''_k = \ln P(\omega_k) - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_{x_k}^T \mathbf{K}^{-1} \boldsymbol{\mu}_{x_k} + \boldsymbol{\mu}_{x_k}^T \mathbf{K}^{-1} \mathbf{x}$$

Dieser Ausdruck ist linear in  $\mathbf{x}$  !

$$\Rightarrow \boxed{D''_k(\mathbf{x}) = a_{0k} + \mathbf{a}_k^T \mathbf{x} = a_{0k} + \langle \mathbf{a}_k, \mathbf{x} \rangle}$$

mit:

$$\| a_{0k} = \ln P(\omega_k) - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_{x_k}^T \mathbf{K}^{-1} \boldsymbol{\mu}_{x_k}$$

$$\| \mathbf{a}_k = \mathbf{K}^{-1} \boldsymbol{\mu}_{x_k}$$

*Hyperebene als  
Trennfläche !*

# Fall 3: Klassenweise normalverteilte Merkmale mit der Einheitsmatrix als Kovarianzmatrix $\mathbf{K}=\sigma^2\mathbf{I}$

(sphärisch invariante Verhältnisse, Hyperkugeln)

Entscheidungsfunktion:

$$D'_k(\mathbf{x}) = \ln P(\omega_k) - N \ln \sigma - \frac{1}{2\sigma^2} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k})$$

Für konstante A-priori-W. folgt:

$$\Rightarrow \boxed{D''_k = \|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_{x_k}\|^2}$$

*Euklidische Metrik*

*Minimum-Abstands-Klassifikator*

Auch hier formuliert als linearer Klassifikator:

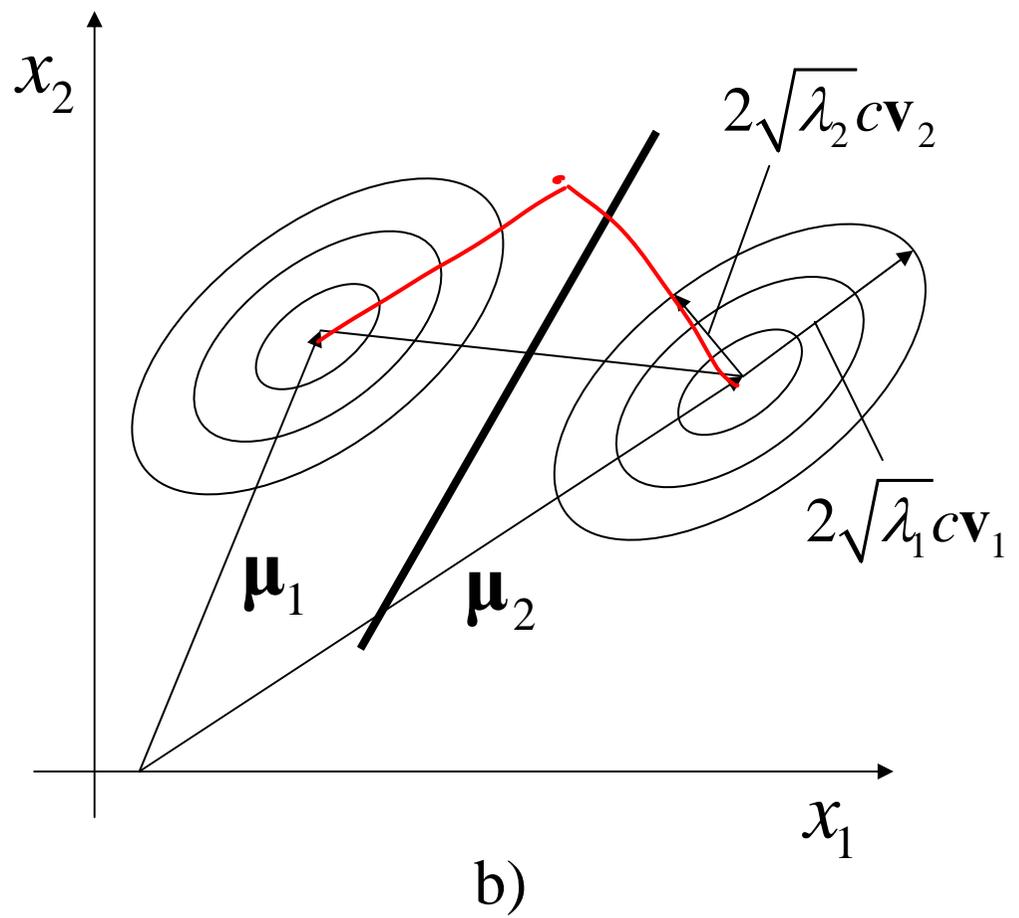
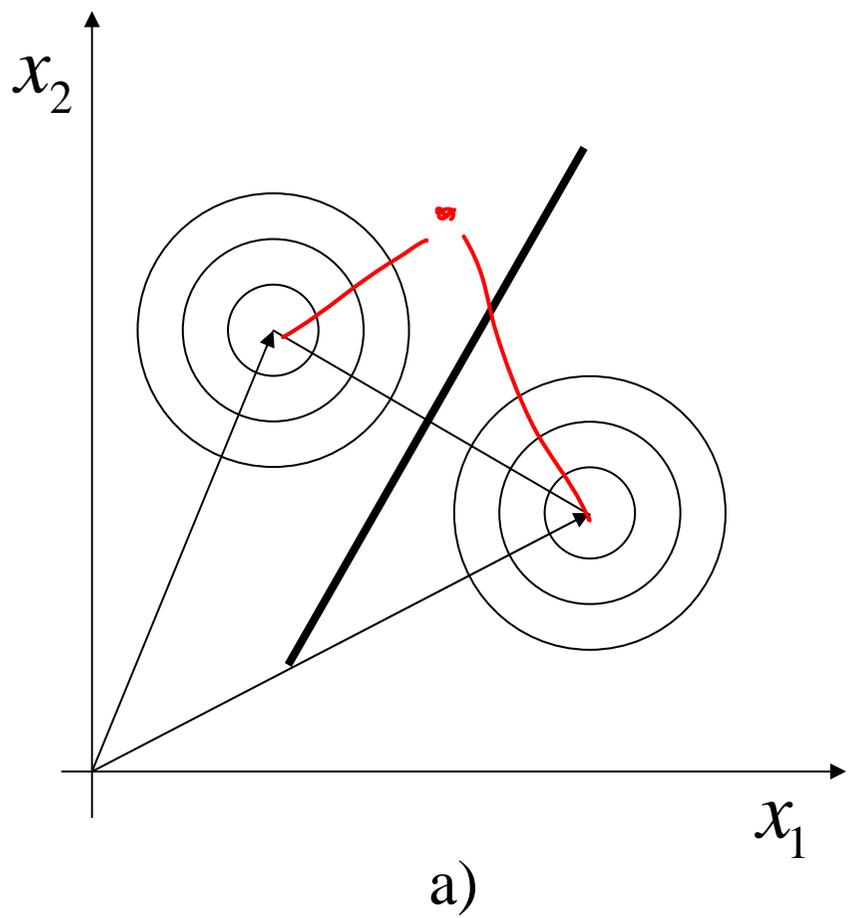
$$D''_k = \frac{1}{2} (\|\mathbf{x}\|^2 - D''_k)$$

$$\Rightarrow \boxed{D'''_k(\mathbf{x}) = a_{0k} + \mathbf{a}_k^T \mathbf{x}}$$

mit:

$$D'''_k = \frac{1}{2} (\|\mathbf{x}\|^2 - (\|\mathbf{x}\|^2 - \|\boldsymbol{\mu}_{x_k}\|^2 - 2 \langle \mathbf{x}, \boldsymbol{\mu}_{x_k} \rangle)) = \underbrace{-\frac{1}{2} \|\boldsymbol{\mu}_{x_k}\|^2}_{a_{0k}} + \underbrace{\langle \boldsymbol{\mu}_{x_k}, \mathbf{x} \rangle}_{\mathbf{a}_k}$$

Kurven konstanter a) Euklidischer- und b) Mahalanobis-  
 Distanz  $d_M$  zum Erwartungswert der jeweiligen Klasse



# Transformation der Mahalanobis-Metrik auf sphärisch invariante Verhältnisse

Die Kovarianzmatrix kann mit einer KLT diagonalisiert werden:

$$\underline{\Lambda} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N) = \mathbf{A}^T \mathbf{K} \mathbf{A}$$

bzw:

$$\underline{\mathbf{K}} = \mathbf{A} \underline{\Lambda} \mathbf{A}^T$$

Die unitäre Matrix erfüllt:  $\mathbf{A}^T = \mathbf{A}^{-1}$

Die Eigenwerte sowie die Eigenvektoren von  $\mathbf{K}$  definieren die Diagonalmatrix und die Eigenvektoren die Transformationsmatrix:

$$\mathbf{A} = [\mathbf{e}'_1, \mathbf{e}'_2, \dots, \mathbf{e}'_N]$$

Kurven konstanter Mahalanobisdistanz ergeben sich zu:

$$\underline{(\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i)^T \mathbf{A} \underline{\Lambda}^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i) = c^2}$$

# Transformation auf sphärisch invariante Verhältnisse

Einführung einer Koordinatentransformation:  $\mathbf{x}' = \mathbf{A}^T \mathbf{x}$

Damit werden die ursprünglichen Koordinaten auf die Eigenvektoren projiziert und man kommt man zu den folgenden Kurven konstanter Mahalanobis-Distanz:

$$\frac{(x'_1 - \mu'_{i1})^2}{\lambda_1} + \dots + \frac{(x'_N - \mu'_{iN})^2}{\lambda_N} = c^2$$

Dies ist ein Hyperellipsoid in dem neuen Koordinatensystem.

Mit  $x''_k = x'_k / \lambda_k$  und  $\mu''_{ik} = \mu'_{ik} / \lambda_k$  erhält man  
sphärisch invariante (Euklidische) Verhältnisse:

$$(x''_1 - \mu''_{i1})^2 + \dots + (x''_N - \mu''_{iN})^2 = c^2 \quad (\text{Kugeln})$$

# Beispiel: Zweiklassenproblem der Dimension 2 ✓

Die Kovarianzmatrix und die Erwartungswerte seien gegeben mit:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 1.1 & 0.3 \\ 0.3 & 1.9 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{\mu}_1 = [0 \ 0]^T \quad \boldsymbol{\mu}_2 = [3 \ 3]^T$$

Klassifiziere die Beobachtung  $\mathbf{x} = [1.0 \ 2.2]^T$  nach Bayes.

Die geschieht durch Berechnung der Mahalanobisdistanz zu den beiden Erwartungswerten:

$$d_M^2(\boldsymbol{\mu}_1, \mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_1)^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_1) = [1.0 \ 2.2] \begin{bmatrix} 0.95 & -0.15 \\ -0.15 & 0.55 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.0 \\ 2.2 \end{bmatrix} = \underline{2.952}$$

entsprechend:

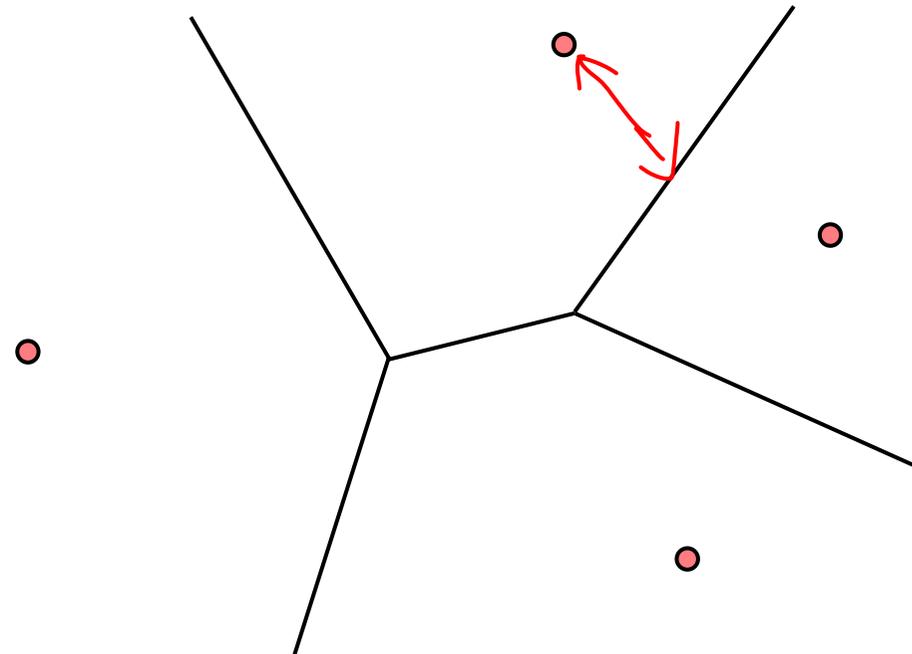
$$d_M^2(\boldsymbol{\mu}_2, \mathbf{x}) = (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_2)^T \mathbf{K}^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_2) = [-2.0 \ -0.8] \begin{bmatrix} 0.95 & -0.15 \\ -0.15 & 0.55 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -2.0 \\ -0.8 \end{bmatrix} = \underline{3.672}$$

D.h. die Beobachtung wird der Klasse 1 zugeordnet. Man beachte, dass die Beobachtung bzgl. der Euklidischen Distanz näher an Klasse 2 liegt!!

$$\|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_1\|^2 = \underline{5.84} \quad \|\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_2\|^2 = \underline{4.64}$$

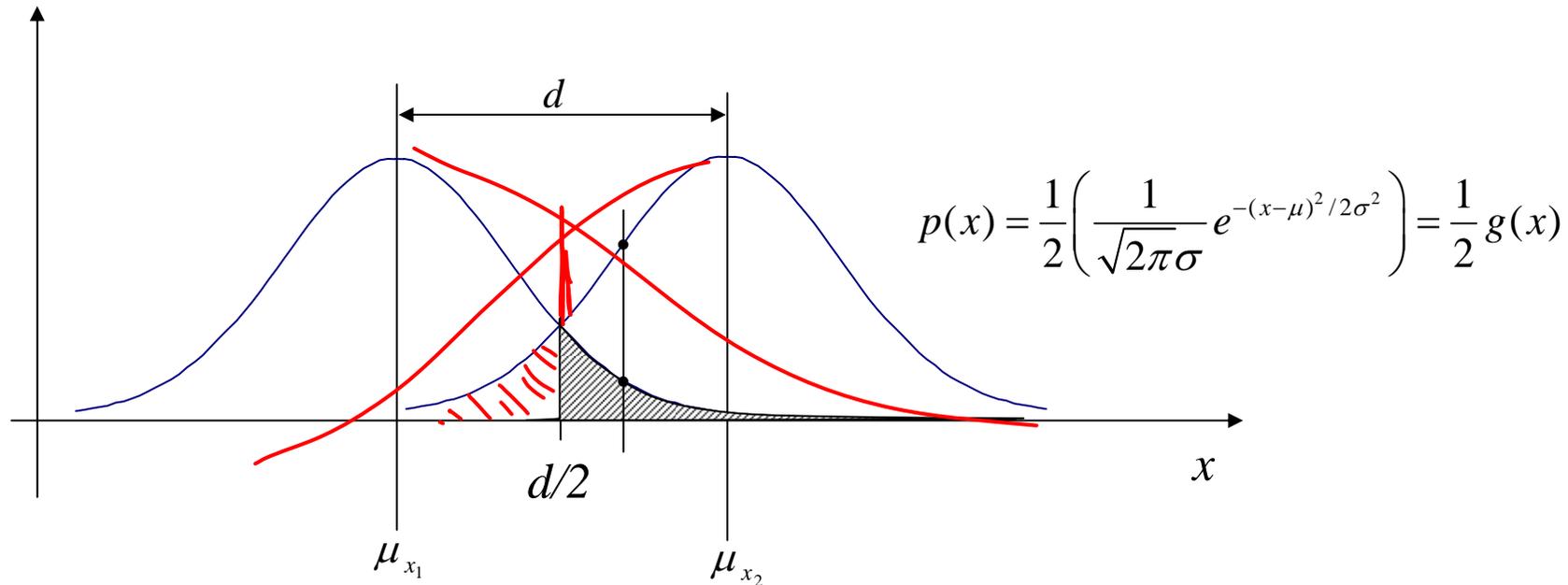
# Das Voronoi-Diagramm im zweidimensionalen Raum für die Euklidische Distanz

Zerlegung der Ebene in Regionen  $R_i$  für eine Menge von Punkten.  
Jede Region enthält genau die Punkte, welche näher sind zu den jeweiligen Punkten als irgend ein anderer Punkt:



$$\underline{R_i = \{\mathbf{x} : d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) < d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_j) \text{ für } i \neq j\}}$$

# Wahrscheinlichkeit einer Fehlklassifikation bei einem Zwei-Klassen-Problem und einem skalaren Merkmal



Die W. dass  $\omega_1$  gesendet wurde und bei gemessenen Werten  $x$  zugunsten von  $\omega_2$  entschieden wird, entspricht der W. dass  $x$  oberhalb von  $d/2$  liegt (schraffierte Fläche). Ebenso für  $\omega_2 \rightarrow \omega_1$ . D.h. die W. einen Fehler bei der Klassifikation zu machen ergibt sich aus der doppelten Fläche:

$$P(E) = 2 \cdot \frac{1}{2} \int_{x=d/2}^{\infty} g(u) du$$

↑

Mit der kumulativen Verteilungsfunktion  $F(x_0) = P(x \leq x_0)$  gilt:

$$F(x) = \int_{-\infty}^x g(u) du = \frac{1}{2} \left( 1 + \operatorname{erf} \left( \frac{x - \mu_x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right)$$

und mit der Gauß'schen Fehlerfunktion

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

bzw. komplementären Fehlerfunktion

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt = 1 - \operatorname{erf}(x)$$

erhält man die Fehler-W. zu:

$$\begin{aligned} P(E) &= \int_{x=d/2}^{\infty} g(u) du = 1 - F(x = d/2) \\ &= \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x - \mu_x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \right) \Bigg|_{\mu_x=0}^{x=d/2} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x - \mu_x}{\sqrt{2}\sigma} \right) \Bigg|_{\mu_x=0}^{x=d/2} \end{aligned}$$

$$P(E) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{d/2}{\sqrt{2}\sigma} \right)$$

Die W. für eine Fehlklassifikation sinkt mit wachsendem Klassenabstand und steigt mit wachsender Streuung der Merkmale

Die Gesamtfehlerwahrscheinlichkeit im  $N$ -dimensionalen Merkmalsraum berechnet sich zu (Forney):



$$P(E) = \text{const} \cdot \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{d/2}{\sqrt{2}\sigma} \right)$$

(ohne Beweis)