

---

# Einführung in die Informationsfusion

Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann

WS 2015/16



Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung



**Karlsruher Institut für Technologie**

Institut für Anthropomatik

Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme

[michael.heizmann@iosb.fraunhofer.de](mailto:michael.heizmann@iosb.fraunhofer.de)

[http://ies.anthropomatik.kit.edu/lehre\\_informationsfusion.php](http://ies.anthropomatik.kit.edu/lehre_informationsfusion.php)

## Michael Heizmann

- Studium: Allgemeiner Maschinenbau (Uni KA)  
Schwerpunkte Automatisierungstechnik, Numerische Verfahren
- Promotion: Automatische Sichtprüfung von Riefenspuren für die Kriminaltechnik am Institut für Mess- und Regelungstechnik (Uni KA)
- 2004-2009: Aufbau und Leitung der Forschungsgruppe „Variable Bildgewinnung und -verarbeitung“ am Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB
- Seit 2009: Leitung der Abteilung „Mess-, Regelungs- und Diagnosesysteme“ am IITB/IOSB
- Gleichzeitig ständiger Berater am Lehrstuhl für Interaktive Echtzeitsysteme (Institut für Anthropomatik, Prof. Beyerer)
- Seit 2014 zusätzlich: Forschungsprofessur an der Hochschule Karlsruhe zum Thema Mechatronische Systeme
- Schwerpunkte: Bildfusion, Informationsfusion, Einsatz in Automatisierungstechnik und Aufklärung, effiziente Implementierung
- Kontakt: Michael.Heizmann@iosb.fraunhofer.de, IOSB-Gebäude, Fraunhoferstraße 1, Sprechstunde nach Vereinbarung

## Prüfbarkeit in der Fakultät für Informatik:

Module im Master-Studiengang:

- Einführung in die Informationsfusion [IN4INEIF], 3 ETCS (atomar)
- Bildgestützte Detektion und Klassifikation [IN4INBDK], 9 ECTS
- Automatische Sichtprüfung [IN4INAS], 9 ECTS
- Maschinelle Visuelle Wahrnehmung [IN4INMVW], 9 ECTS
- Informationsextraktion und -fusion [IN4INIEF], 6 ECTS
- Konzepte Maschinellen Lernens [IN4INKML] , 6 ECTS

Erasmus-Studierende:

Bitte Prüfbarkeit mit dem Service-Zentrum Studium und Lehre klären.

**Vorlesungsunterlagen** stehen zum Download bereit (passwortgeschützt):  
[http://ies.anthropomatik.kit.edu/lehre\\_informationsfusion.php](http://ies.anthropomatik.kit.edu/lehre_informationsfusion.php)

- Ggf. Aktualisierungen nach der Vorlesung

## Literaturliste

siehe [http://ies.anthropomatik.kit.edu/lehre\\_informationsfusion.php](http://ies.anthropomatik.kit.edu/lehre_informationsfusion.php)

## Fragen zur Vorlesung?

- Gleich stellen!
- Tiefergehende Fragen:  
Nach der Vorlesungsstunde oder in der Sprechstunde

## Übungsblätter

- ca. 3 Stück über Semester verteilt
- Freiwillig
- Vertiefung des Stoffs
- Diskussion in der Vorlesung
- Keine Abgabe oder Korrektur
- Sehr empfohlen!

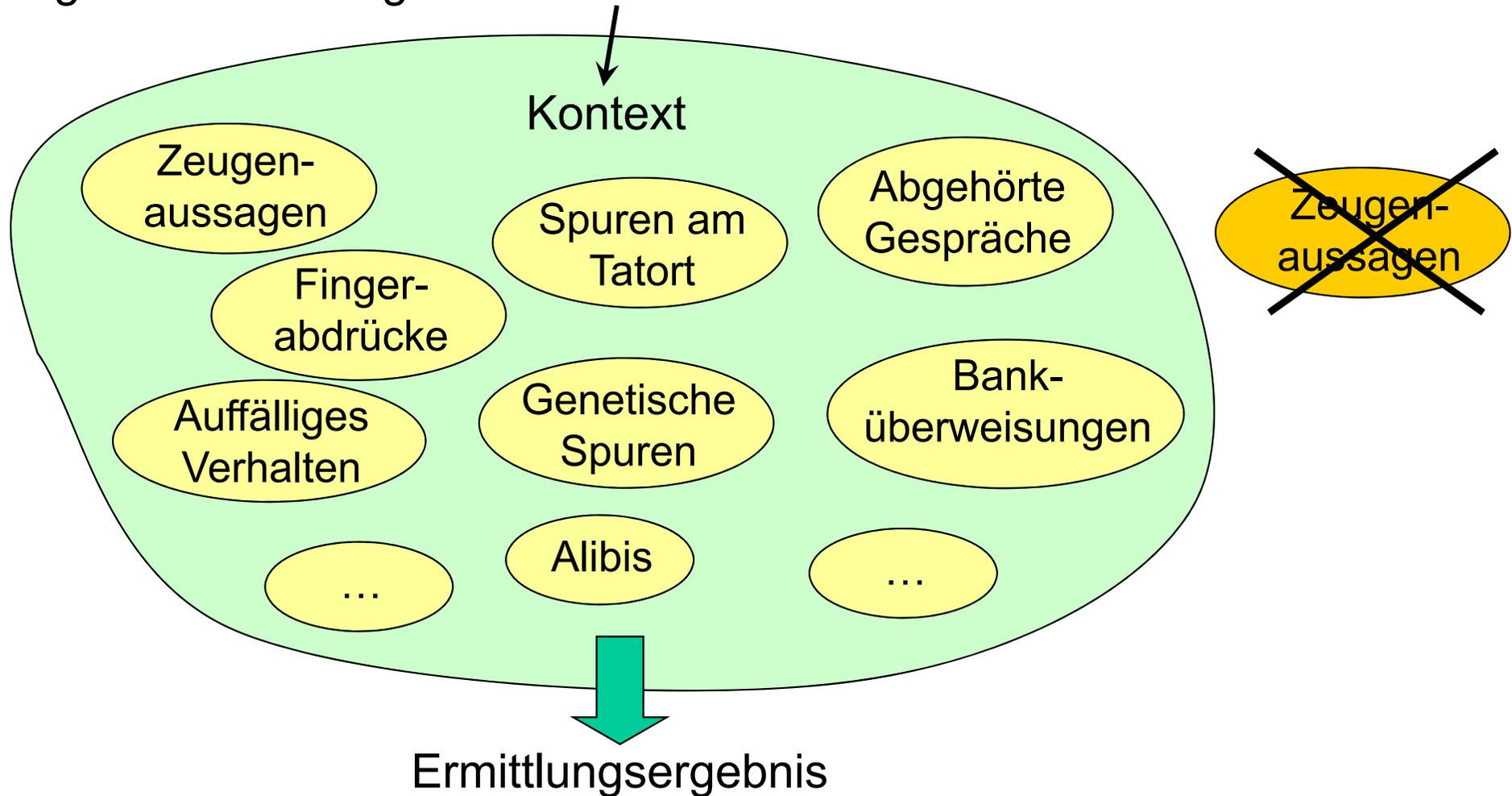
Beispiele sind meist so markiert

Aufgaben, Interaktion

# Einführende Beispiele

## Beispiel: **Kriminalistische Ermittlung**

- Aufgabe: Aufklärung eines Falles



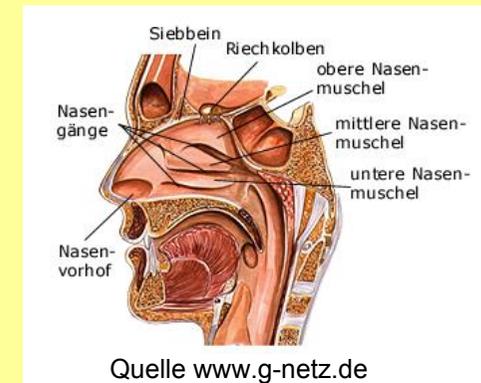
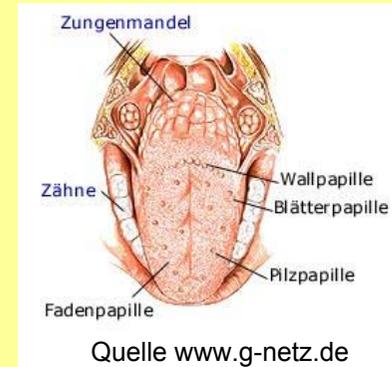
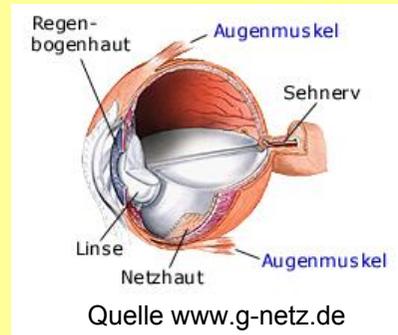
- Im Kontext **relevante Information** aus **allen Quellen** soll **erschöpfend** ausgewertet werden

# Einführende Beispiele

## Beispiel: **Menschliche Wahrnehmung**

### Informationsquellen: Sinne

- Sehen
- Hören
- Riechen
- Schmecken
- Tasten
- Temperatursinn
- Schmerzempfindung
- Gleichgewichtssinn
- (bei Tieren evtl. weitere Sinne: z.B. Erdmagnetfeld)



erlauben dem Menschen **Orientierung**, **Situationseinschätzung** und **koordiniertes Handeln**, z.B.:

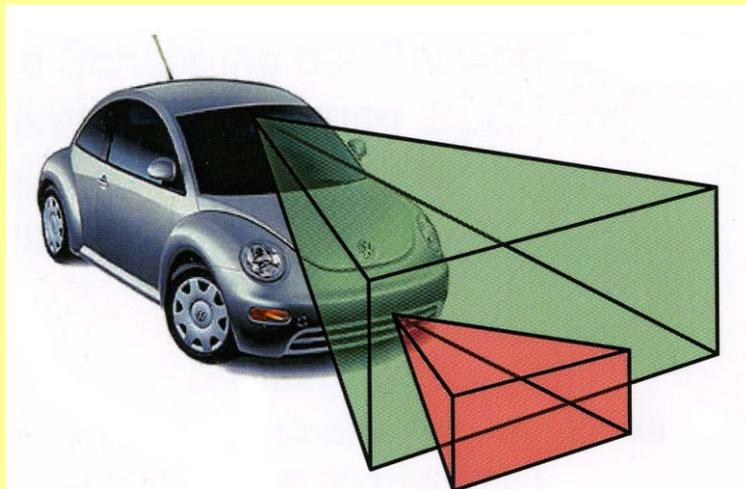
- Halten des Gleichgewichts: Gleichgewichtssinn, Sehen, Tasten (Bsp: Straßenbahn mit geschlossene Augen)
- Fahrradfahren: Sehen, Gleichgewichtssinn, Hören (Sirene), Tasten (schlechte Straße)

## Beispiel: Fahrerassistenz

- Höhere Fahrsicherheit auch bei steigendem Verkehrsaufkommen
- Unterstützung des Fahrers

### Nachtsicht-Assistent

- Sensorik: VIS, IR
- Fusion findet durch den Fahrer statt!



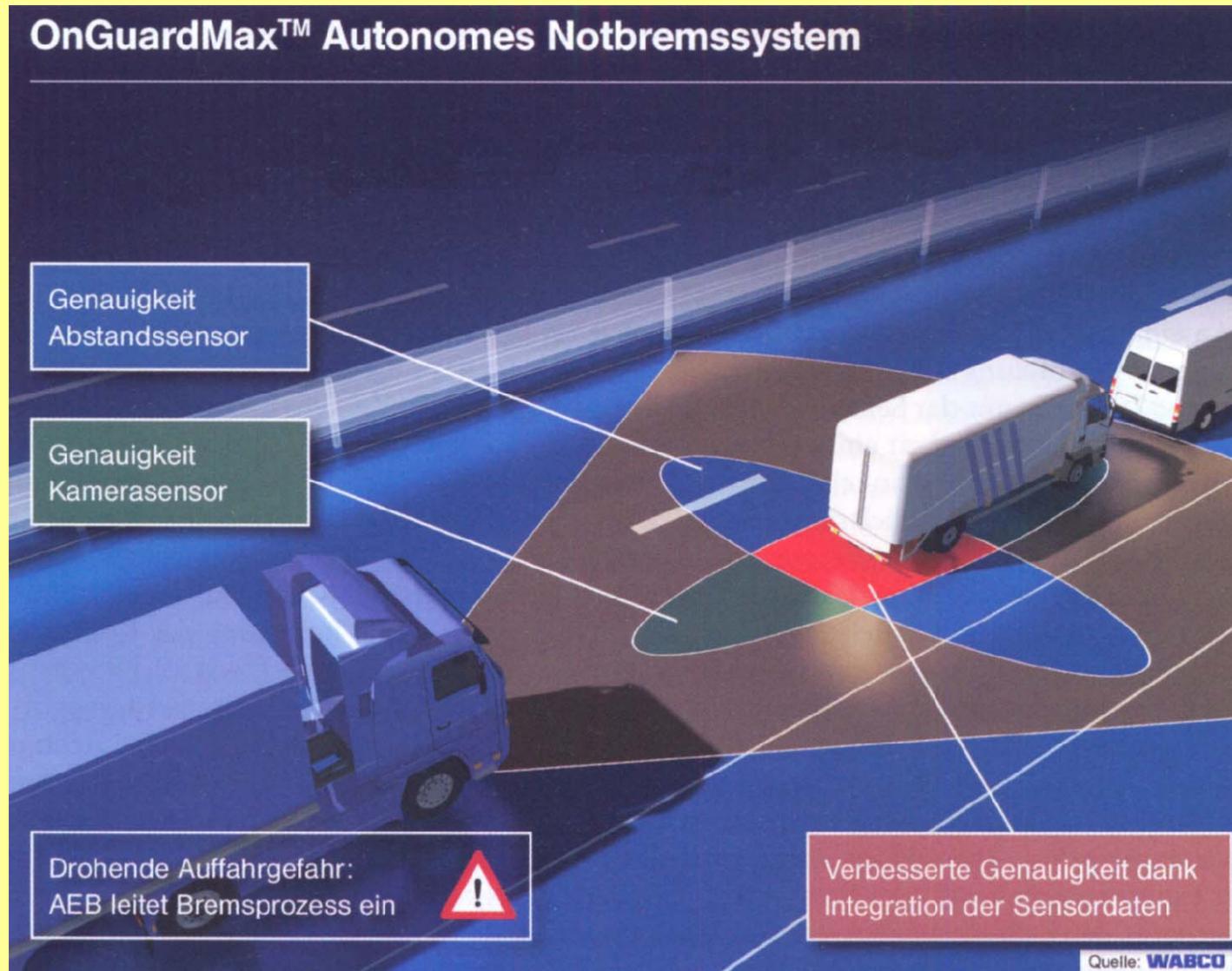
### Abstandsregelung (ACC), Notbremse

- Sensorik: Videokamera (sichtbarer Bereich (VIS), IR), Radar, Laser
- Vorteile: Genaue Entfernungsschätzung (Radar), hohe Robustheit

# Einführende Beispiele

## Beispiel: Notbremssystem für Lkw

- Gezielte Nutzung der Vorteile unterschiedlicher Sensoren



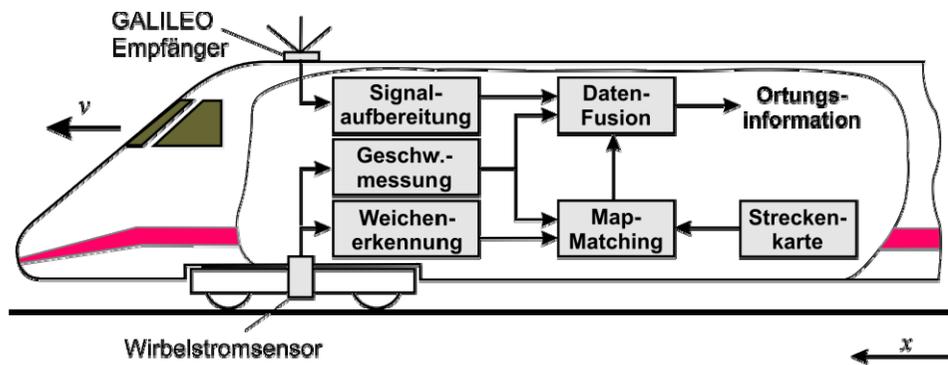
# Einführende Beispiele

## Beispiel: Ortung von Schienenfahrzeugen

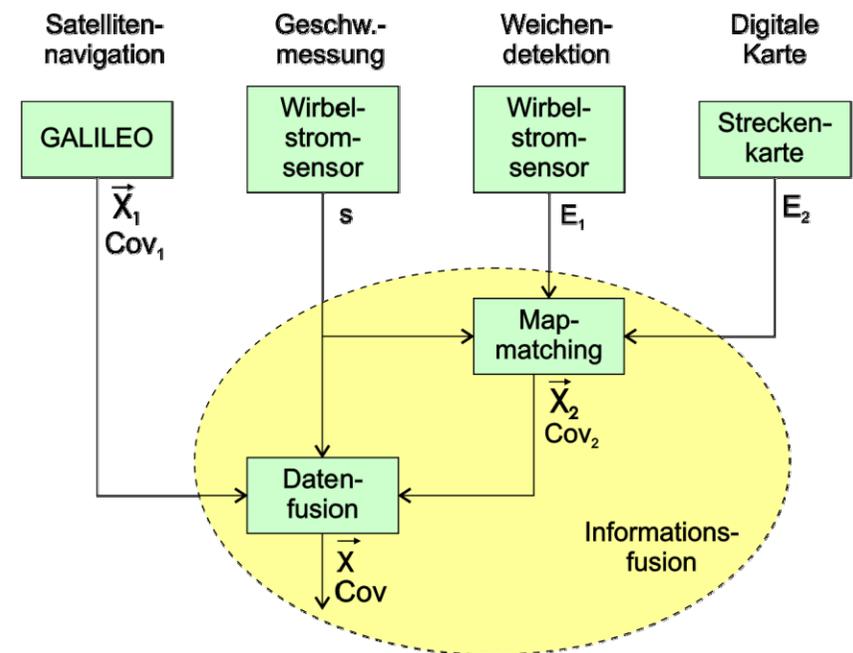
- Steigerung der Streckenkapazität durch geringere Blockabstände
- Genaue Ortung erforderlich: Fahrzeuggebunden

Informationsquellen:

- GPS (versagt bei Tunnel, Bahnhof, Geländeeinschnitte)
- Fahrzeuggebundene Geschwindigkeits-/Wegmessung
- Durch Wirbelstromsensoren detektierte Ereignisse
- Hinterlegte Streckenkarte (Kreuzungen, Weichen)



Quelle: Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH),  
Dr.-Ing. F. Böhringer



## 1. Einleitung

- Grundbegriffe
- Grundlage:  
Gemeinsamer Kontext, Unsicherheitsbehaftete Information
- Informationsgehalt der Signale und Daten
- Anforderungen an eine Fusionsmethodik
- Architektur
- Sensorsysteme

## 2. Probabilistische Methoden

- Stochastische Grundbegriffe: Wahrscheinlichkeit, Verteilungen
- Klassische Statistik: Punkt-Schätzung, Beobachtungsunsicherheit
- Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM)
- Bayes'sche Fusion
- Bayes'sche Netze
- Kalman-Filter
- Tracking

## 3. Dempster-Shafer-Theorie

- Formale Struktur: Basismaße
- Kombinationsregel und Fusion

## 4. Fuzzy-Systeme

- Fuzzy-Mengen
- Fuzzifizierung
- Fuzzy-Logik
- Fuzzy-Fusion
- Defuzzifizierung

## 5. Neuronale Netze

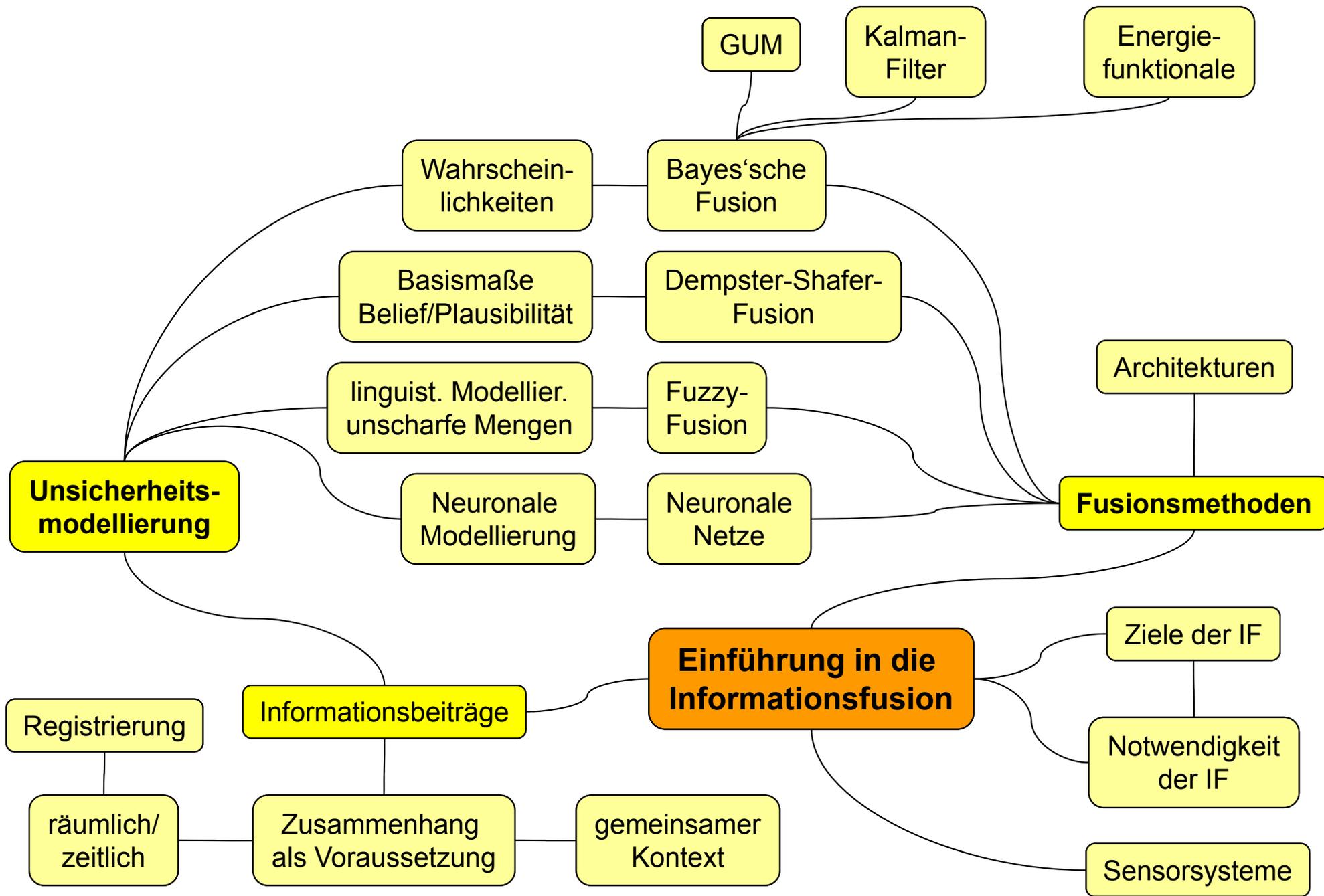
- Struktur
- Lernmethoden
- Bewertung

## 6. Registrierung

- Geometrische Transformationen
- Lineare Registrierung
- Merkmalsbasierte Registrierung

## 7. Energiefunktionale

- Formulierung
- Bayes'sche Interpretation
- Energieminimierung

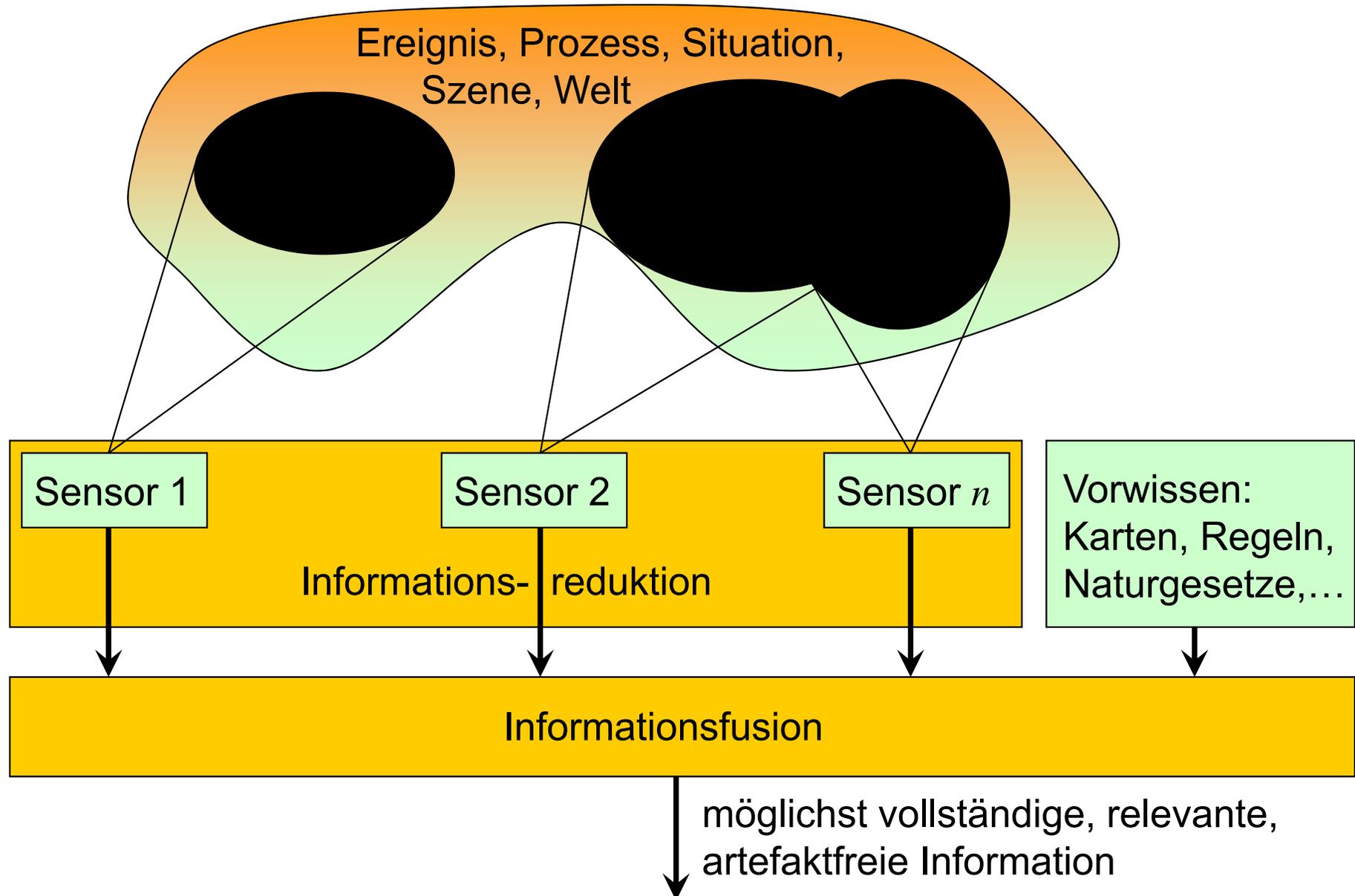


# 1. Einleitung

## 1. Einleitung

- 1.1 Wozu Informationsfusion?
- 1.2 Grundbegriffe
- 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext, Unsicherheitsbeh. Information
- 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten
- 1.5 Anforderungen an eine Fusionsmethodik
- 1.6 Architektur
  - 1.6.1 Fusion auf Signalebene
  - 1.6.2 Fusion auf Datenebene
  - 1.6.3 Fusion auf Merkmalsebene
  - 1.6.4 Fusion auf Entscheidungsebene
  - 1.6.5 Funktionales Modell für Abstraktionsebenen
  - 1.6.6 Zentralisierte Fusion
  - 1.6.7 Verteilte Fusion
  - 1.6.8 Hybride Fusion
- 1.7 Sensorsysteme
  - 1.7.1 Struktur von Sensorsystemen
  - 1.7.2 Homogene und heterogene Sensorsysteme
  - 1.7.3 Aktive und passive Sensorsysteme
  - 1.7.4 Weitere Charakteristika

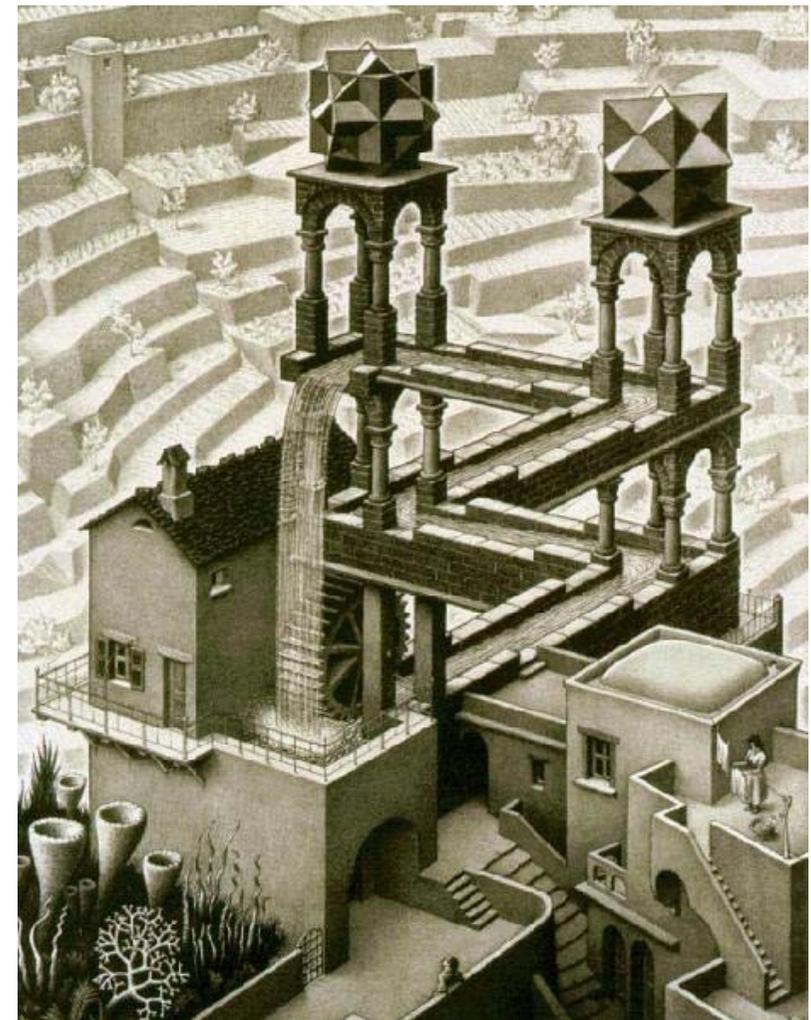
# 1.1 Wozu Informationsfusion?



# 1.1 Wozu Informationsfusion?

## Informationsreduktion durch

- **Fensterung:** Beobachtung eines zeit-/ortsbegrenzten Ausschnitts
- **Projektion:** Dimensionsreduktion geometrisch, zeitlich, spektral  
⇒ Abbildung der Welt in Signale oder Daten nicht injektiv (i.a. nicht umkehrbar)



Quelle: M. C. Escher, <http://en.wikipedia.org>

© 2015/16 Fraunhofer IOSB / LS Interaktive Echtzeitsysteme, KIT, alle Rechte einschließlich Kopier- und Weitergaberechte bei uns.

# 1.1 Wozu Informationsfusion?

## Informationsreduktion

durch

- **Abtastung:**
  - **Ortsdiskretisierung:**  
Z.B. bei Bildern: Faltung der ortsabhängigen Bestrahlungsstärke auf dem Bildsensor mit der Fensterfunktion der Pixel, Abtastung im Pixelraster
  - **Zeitdiskretisierung:**  
Z.B. bei Video-Sequenzen: Faltung der zeitabhängigen Bestrahlungsstärke mit der Belichtungsfunktion, Abtastung mit der Bildwiederholfrequenz
  - **Quantisierung:**  
Diskrete Werte, z.B. Grauwertbild mit 8 Bit: 256 Werte



# 1.1 Wozu Informationsfusion?

---

## Informationsreduktion durch

- **Zufügung von Störungen**, z.B. durch
  - Thermisches Rauschen des Sensors
  - Luftturbulenz, Schwebstoffe im Strahlengang
  - Elektromagnetische Felder
  - Vibrationen

# 1.1 Wozu Informationsfusion?

- **Höhere Robustheit/Zuverlässigkeit**

Durch redundante Messungen und/oder diversitäre Sensorprinzipien  
Reduktion von Störungen  
Eindeutigkeit/Detektionswahrscheinlichkeit

Beispiel: Hinderniserkennung im Kfz

Redundanz:        Mehrere (gleichartige) Kameras  
                      → gleiches Sensorprinzip  
                      → gleiche Störeinflüsse auf alle Sensordaten

Diversität:        Kamera (VIS+IR), Radar, Ultraschall  
                      → diversitäre Sensorprinzipien  
                      → unterschiedliche, evtl. ausgleichbare Störeinflüsse

# 1.1 Wozu Informationsfusion?

---

- **Erweiterung der Sensorabdeckung**  
Durch örtlich/zeitlich überlappende Aufnahmen
- **Erhöhte Auflösung**  
Durch wiederholte Messungen oder heterogene\* Sensoren  
(hier: Sensoren mit unterschiedlichen Genauigkeiten)  
Reduzierte Unsicherheit  
Räumlich und zeitlich, auch lokal
- **Höhere Dimension des Merkmalsvektors**  
Durch heterogene Sensoren  
(hier: Sensoren, die unterschiedliche Objektmerkmale erfassen)  
Umfassendere Information

\* Def. homogene/heterogene Sensoren siehe unten

# 1.1 Wozu Informationsfusion?

- **Kostenreduktion**

Vielzahl billiger Sensoren ersetzt wenige hochwertige Spezialsensoren  
Weniger Kosten durch Fehlfunktion

Beispiel: Tiefenkarten (Entfernung als Funktion des Ortes)

Hochwertige Sensoren (direkte Messung):

Time-of-flight (Laufzeitmessung),  
Weißlicht-Interferometrie,  
(Laser-) Triangulation  
→ relativ teuer

Viele günstige Sensoren:

Stereo-Kameras,  
Kamera-Array  
→ günstig,  
aber evtl.  
aufwendige Verarbeitung



# 1.1 Wozu Informationsfusion?

- **Indirekte Messungen**

Beobachtungsgrößen → Zielgrößen

Beispiel: Bestimmung der Oberflächennormalen

Direkte Messung: (Optische) Taster, Weißlicht-Interferometrie,  
Streifenprojektion  
→ Aufwendig, relativ langsam

Indirekte Messung: Intensität bei unterschiedlichen Beleuchtungen,  
Oberflächennormale durch Fusion  
→ Einfache Sensorik, relativ schnell

## 1.2 Grundbegriffe

---

**Information:** Alles, was **potenziell** zur **Verminderung vorhandener Ungewissheit** beitragen kann.

Synonym: Alles, was für einen beliebigen Betrachter innerhalb eines bestimmten Kontextes relevant ist.

Information stammt aus sensorischen Quellen (d.h. durch Erfassung der Umwelt) oder aus Vorwissen.

Sinnvolle Information besteht aus **Fakten** und **zugehörigen Unsicherheiten**.

Information kann von einem **Träger** (Materie, Energie) repräsentiert werden.

## 1.2 Grundbegriffe

**Signal:** Funktion oder Wertefolge, die Träger von Information ist  
Analog: abhängige und unabhängige Variable kontinuierlich  
Digital: abhängige und unabhängige Variable diskret

Im Kontext hier meist analoge Funktionen, die eine physikalische Größe repräsentieren

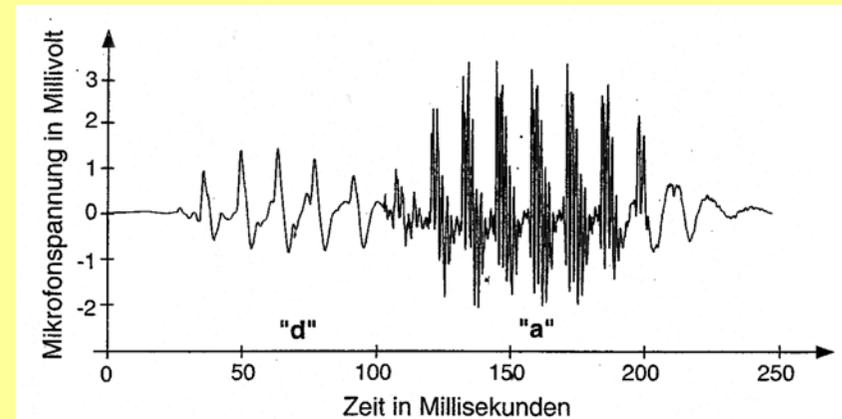
Beispiel: gesprochenes Wort „da“

→ Druck-Zeit-Funktion

$$p(t): D \rightarrow W, \quad D = \text{Zeit}, W = \text{Druck}$$

→ Spannungs-Zeit-Funktion

$$u(t): D \rightarrow W, \quad D = \text{Zeit}, W = \text{Spannung}$$



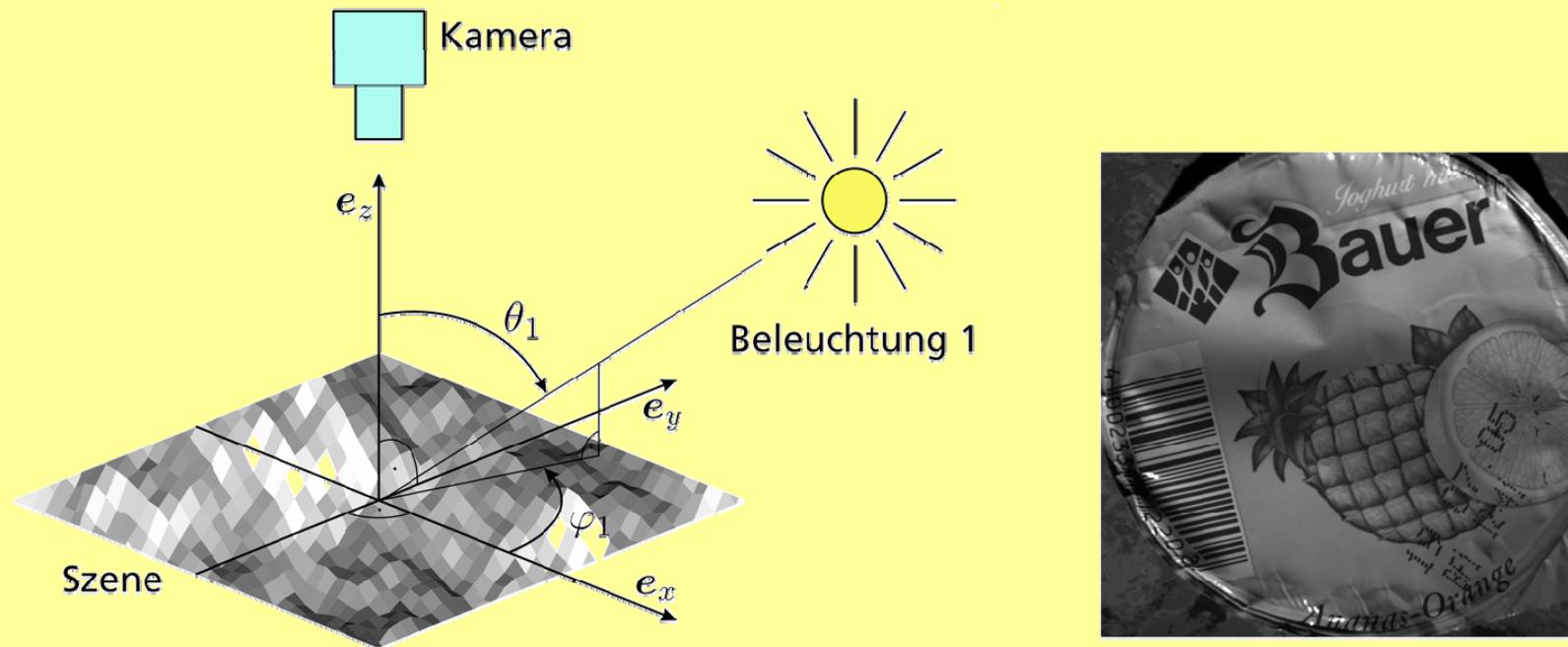
Quelle: Bernd Girod: Einführung in die Systemtheorie

## 1.2 Grundbegriffe

Beispiel: Bildserie mit variiertem Azimut der Beleuchtung

→ Bestrahlungsstärke auf dem Bildsensor  
(nicht das entstehende digitale Bild!)

$$E(x, y, \varphi) : D \rightarrow W, \quad D = [x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}] \times [0, 2\pi), \quad W \geq 0 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$$



## 1.2 Grundbegriffe

---

### Daten:

Hier: (Maschinen-) lesbare und bearbeitbare  
Repräsentation von Information, kodiert nach bestimmten  
Regeln (Syntax) in Zeichen bzw. Zeichenketten

Signale lassen sich in Daten abbilden;  
Daten müssen jedoch nicht aus Signalen abgeleitet sein,  
z.B. PLZ, Autokennzeichen, Bauplan, Computerprogramm

## 1.2 Grundbegriffe

Beispiel: Abbildung der Strahldichte einer Szene in Bilddaten  
Bildserie mit variiertem Azimut der Beleuchtung

→ Signal: Bestrahlungsstärke auf dem Bildsensor

$$E(x, y, \varphi): D \rightarrow W,$$

$$D = [x_{\min}, x_{\max}] \times [y_{\min}, y_{\max}] \times [0, 2\pi), \quad W \geq 0 \frac{\text{Watt}}{\text{m}^2}$$

Integration über Zeit u. Sensor- (Pixel-)fläche:

→ Daten: Diskrete Grauwert-Bildserie

$$d(x, y, \varphi): D \rightarrow W,$$

$$D = \{0, 1, \dots, x_{\max}\} \times \{0, 1, \dots, y_{\max}\} \\ \times \{0, \Delta\varphi, \dots, 2\pi - \Delta\varphi\},$$

$$W = \{0, \dots, d_{\max}\}$$

$$\text{hier: } D = \{0, 1, \dots, 511\} \times \{0, 1, \dots, 511\} \\ \times \{0^\circ, 120^\circ, 240^\circ\},$$

$$W = \{0, \dots, 255\}$$



## 1.2 Grundbegriffe

---

**Merkmale:** Beobachtbare bzw. physikalisch messbare **Eigenschaften von Objekten**, die geeignet sein sollen, eine möglichst fehlerfreie Klassifikation zu ermöglichen.  
Auch Daten können Merkmale sein.

Gewünschte Eigenschaften von Merkmalen:

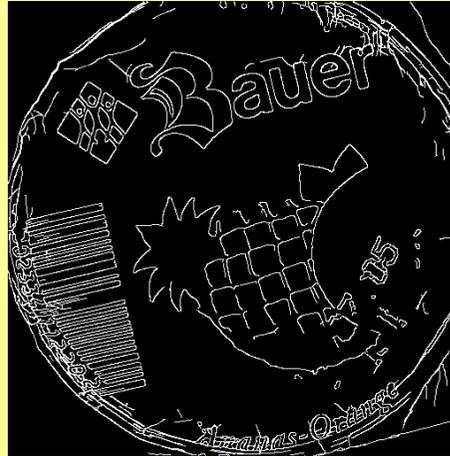
- beobachtbar bzw. physikalisch messbar
- mit geringem Aufwand zu gewinnen
- interpretierbar, anschauliche Bedeutung (falls möglich)
- invariant bezüglich irrelevanter Variationen
- hohe Relevanz bezüglich der Aufgabenstellung
- robust (unempfindlich gegenüber kleinen Störungen)
- möglichst geringe Abhängigkeit zw. unterschiedlichen Merkmalen
- möglichst geringe Zahl von Merkmalen (Merkmalsvektor niedriger Dimension)

siehe Vorlesung „Mustererkennung“ im Sommersemester

## 1.2 Grundbegriffe

Beispiel: Merkmale aus der Bildserie mit variiertem Beleuchtungsazimut

- **Kante:** Kantenbild, Fusion durch Disjunktion



- **Gesamtintensität:** Addition



- **Varianz**

## 1.2 Grundbegriffe

	Skala				
	qualitativ		metrisch (kardinal)		
	Nominal-	Ordinal-	Intervall-	Verhältnis-	Absolut-
Empirische Relationen	~ Äquivalenz	~ Äquivalenz > Ordnung	~ Äquivalenz > Ordnung ⊕ Emp. Addition	~ Äquivalenz > Ordnung ⊕ Emp. Addition ⊗ Emp. Multipl.	~ Äquivalenz > Ordnung ⊕ Emp. Addition ⊗ Emp. Multipl.
Zulässige Transformationen	$m' = f(m)$ $f(.)$ bijektiv	$m' = f(m)$ $f(.)$ streng monoton	$m' = am + b$ mit $a > 0$	$m' = am$ mit $a > 0$	$m' = m$
Beispiele für Merkmale	Telefonnum., Kfz-Kennz., Typen, PLZ, Geschlecht	Güteklassen, Härtegrad, Schulnoten	Temp. in °C, °F, Kalenderzeit, geographische Höhe	Masse, Länge, el. Strom	Quantenzahlen, Teilchenanzahl, Fehlerzahl
Werte von $m$	Zahlen, Namen, Symbole	i.d.R. natürliche Zahlen	i.d.R. reelle Zahlen stetige Merkmale	i.d.R. reelle Zahlen $> 0$ stetige Merkmale	i.d.R. natürliche Zahlen diskrete Merkmale
Aussagekraft	gering	→	→	→	hoch

## 1.2 Grundbegriffe

	Skala				
	qualitativ		metrisch (kardinal)		
	Nominal-	Ordinal-	Intervall-	Verhältnis-	Absolut-
Matrikelnummern	X	(X)			
Temperatur in K				X	
Temperatur in °C			X		
Klausurnoten		X			
Anzahl Personen in dieser Vorlesung					X
Bildserie: Gesamtintensität				X	
Bildserie: Existenz einer Kante	X				
Fehlerzahl auf den Vorlesungsfolien					X
Bewertung der Vorlesung (in Noten)		X			
Farbton einer Lichtquelle (gelblich etc.)		X			
Spektrales Maximum einer Lichtquelle				X	
Autotyp	X				
Schlüsselnummer eines Autotyps	(X)	(X)			
mittlerer finanzieller Wert eines Autotyps				X	
Anz. der Fahrzeuge eines Typs in KA					X
Schadenfreiheitsklasse der Kfz-Vers.		X			
Beitragssatz der Kfz-Versicherung				X	
Position eines Objekts in der Ebene			X		
Orientierung eines Objekts in der Ebene			X (zykl.)		
Abstand zweier Objekte in der Ebene				X	
Anzahl der Objekte					X
Bundesliga-Tabelle		X			
Anfangszeit einer Veranstaltung			X		
Dauer einer Veranstaltung				X	
Verkaufsbezeichnung eines Produkts	X				
Seriennummer eines Produkts	X	(X)			
Verkaufspreis eines Produkts				X	
Energieeffizienzklasse		X			
Blutgruppe (AB0-System)	(X: A-B)	(X: 0-A)			
Militärischer Dienstgrad		X			

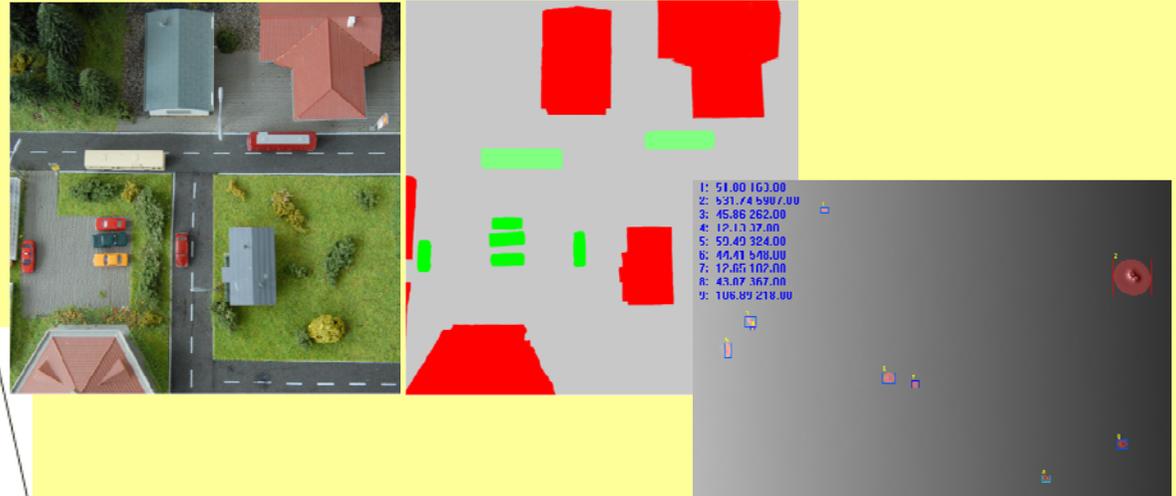
## 1.2 Grundbegriffe

### Symbolische Information:

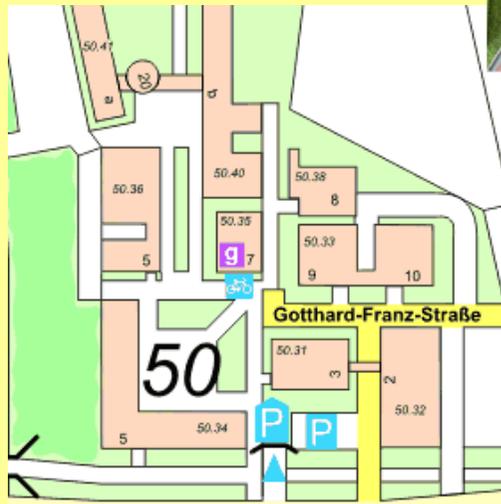
Ergebnisse von Klassifikationen (Entscheidungen) auf zuvor gewonnenen Merkmalen.

#### Beispiele:

- Klassifikationsergebnisse



- Karten



- Zeugenaussagen:

„Am 21.10.08 um 15:20 befanden sich 30 Personen im SR 236.“

## 1.2 Grundbegriffe

---

### Bedingungen (Constraints), Regeln:

#### Naturgesetze

Gleichungen

Bsp: Zurückgelegter Weg  $x$  bei Beschleunigung  $a$

$$x(t) = 0,5 a t^2$$

⇒ Zusammenhang zw. beobachteten Beschleunigungen und Wegen

Bsp: Reflexionsgesetz bei Lambertschem Strahler:

$\mathbf{b}$  Beleuchtungsvektor,  $\mathbf{n}$  Normalenvektor,  $\rho$  Reflektivität

$$L(\mathbf{b}, \mathbf{n}, \rho) = \rho \cdot \mathbf{b}^T \mathbf{n}$$

#### Beschränkungen, Erfahrungswerte

Oft als Ungleichungen

Bsp: Maximalgeschwindigkeit eines Fahrzeugs

$$v_{r,\max} \leq v(t) \leq v_{v,\max}, \quad v_{r,\max} \leq 0, \quad v_{v,\max} > 0$$

Bsp: Erwartungswerte bei stochastischen Größen

## 1.2 Grundbegriffe

### Was ist **Informationsfusion**?

Beispiel: Open Geospatial Consortium (OGC) Fusion Standards Study Engineering Report (OGC 09-138, 21.03.2010, Ed. George Percivall):

Fusion: the act or process of **combining or associating data or information** regarding one or more entities considered in an explicit or implicit knowledge framework **to improve one's capability** (or provide a new capability) **for detection, identification, or characterization** of that entity.

Fusion ist der Vorgang oder Prozess, **Daten oder Informationen** über eine oder mehrere Entitäten in einem expliziten oder impliziten Wissensrahmen **zu kombinieren oder zu verknüpfen**, um die **Fähigkeit für die Erkennung, Identifizierung oder Charakterisierung** dieser Entität **zu verbessern** (oder eine neue Fähigkeit zu entwickeln).

## 1.2 Grundbegriffe

---

Was ist **Informationsfusion**?

Beispiel: Steinberg, Bowman, White: Revisions to the JDL Data Fusion Model. In: Sensor Fusion: Architectures, Algorithms, and Applications, Proceedings of the SPIE, Vol. 3719, 1999:

Data fusion is the process of **combining data** to **refine state estimates and predictions**.

(Daten-)Fusion ist der Prozess der **Kombination/Verknüpfung von Daten** zur **Aufbereitung/Verbesserung von Zustandsschätzungen und Prädiktionen**.

## 1.2 Grundbegriffe

---

Allgemeinere Definition von **Informationsfusion**:

Informationsfusion umfasst Methoden, um

- **verfügbares Wissen** (Eingangsgrößen: Signale, Daten, Merkmale, Entscheidungen, Bedingungen und Regeln)
- aus **unterschiedlichen Informationsquellen** zu verknüpfen
- mit dem Ziel, **neues und/oder hochwertigeres Wissen** (Ausgangsgrößen: Signale, Daten, Merkmale, Entscheidungen) über physikalische Größen, Objekte, Ereignisse oder Situationen zu gewinnen.

**Ziel:**

Generierung eines Fusionsresultats, das die Welt »**besser**« beschreibt als die von irgendeiner einzelnen Quelle zu erhaltenden Informationen.

## 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext

---

Grundsätzliche Frage:

Was sind die **Voraussetzungen**, damit Informationen fusioniert werden können?

- Die Informationen (Signale, Daten, Merkmale, höher abstrahierte Informationen, Regeln, Constraints, statistisches Vorwissen etc.) beziehen sich auf einen **gemeinsamen Sachverhalt**.  
Bsp.: Vortragsfolien – gesprochenes Wort des Vortragenden

Stehen die verfügbaren Informationsquellen nicht in einem gemeinsamen Kontext, ist eine Verknüpfung nicht möglich.

Bsp.: Vortrag in diesem Raum – Vortrag im Nebenraum zu einem anderen Thema

## 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext

Wann sind Signale bzw. Daten geeignet zu einer Fusion?

Daten 1:  $s_1(a_1): D_1 \rightarrow W_1$

Daten 2:  $s_2(a_2): D_2 \rightarrow W_2$

$D_1, D_2$  sowie  $W_1, W_2$  kompatibel

Beispiel: Drei Bilder bei gleicher Kameraperspektive

$D_1 = D_2 = D_3 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$  Pixel- und Weltkoordinaten

$W_1 = W_2 = W_3 = \mathbb{R}_0^+$  Intensitäten (unterschiedlicher Spektralbereich)



## 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext

$D_1, D_2$  unterschiedlich, aber über  $W_1, W_2$  gekoppelt

$W_1, W_2$  kompatibel

Beispiel: Disparitäten aus einem Stereobildpaar

$D_1 = D_2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$  Pixelkoordinaten  $\neq$  Weltkoordinaten

$W_1 = W_2 = \mathbb{R}_0^+$  Intensitäten

→ Suche von korrespondierenden Merkmalen



Quelle: Institut für Mess- und Regelungstechnik, KIT

# 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext

$D_1, D_2$  kompatibel

$W_1, W_2$  kompatibel

Beispiel: Stitching

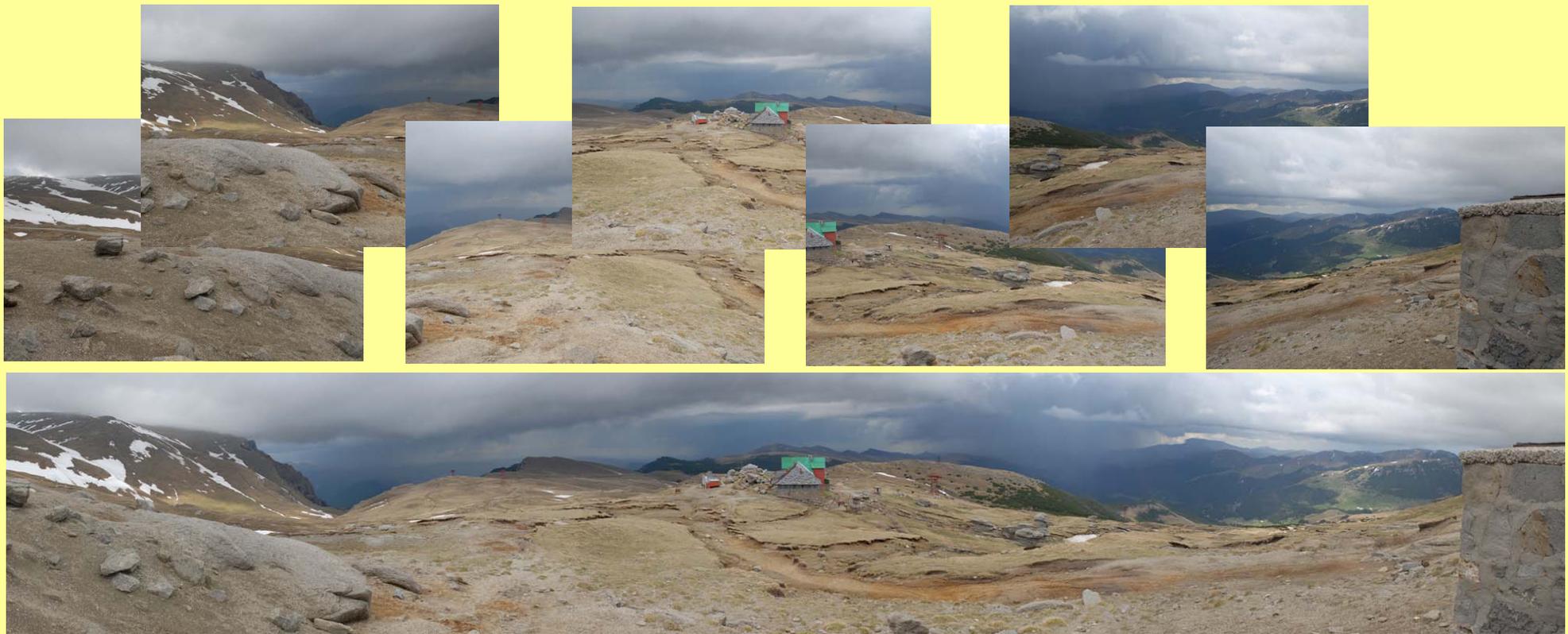
$D_1, D_2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$

Weltkoordinaten,

überlappend:  $D_1 \cap D_2 \neq \emptyset \rightarrow$  Anpassung der  
Definitionsbereiche  
**Registrierung**  
(Alignment)

$W_1 = W_2$

Intensitäten



## 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext

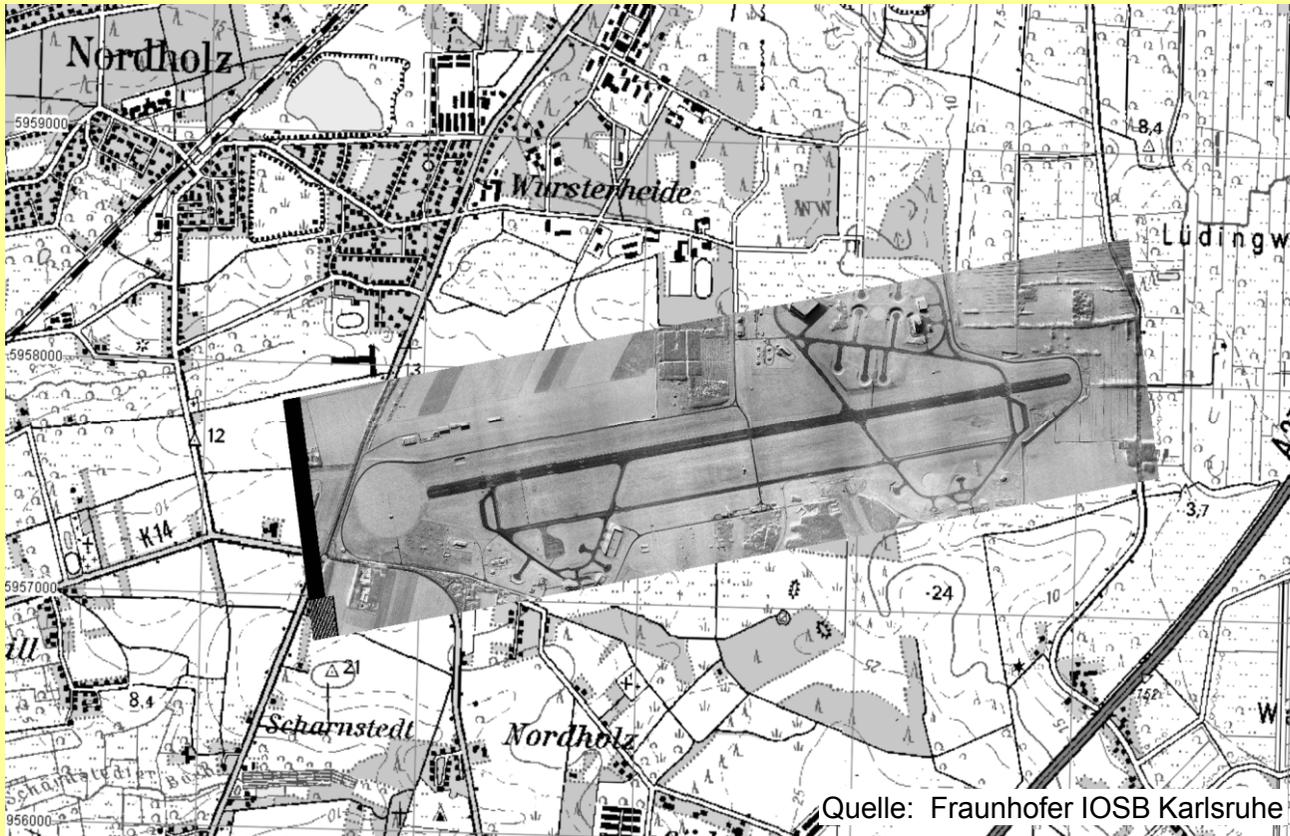
$D_1, D_2$  kompatibel       $W_1, W_2$  unterschiedlich

Beispiel: Karte-Bild-Referenzierung

$D_1, D_2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$       Weltkoordinaten,  
überlappend:  $D_1 \cap D_2 \neq \emptyset$

$W_1 \neq W_2$       Intensitäten, Symbole

→ **Registrierung**  
(Alignment)



# 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext

$D_1, D_2$  inkompatibel       $W_1, W_2$  kompatibel

Beispiel: Karte-Karte-Referenzierung

$D_1, D_2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$       Weltkoordinaten,  
nicht überlappend:  $D_1 \cap D_2 = \emptyset$

$W_1 = W_2$       Symbole

→ Fusion so  
nicht möglich



# 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext

$D_1, D_2, D_3$  kompatibel       $W_1, W_2, W_3$  kompatibel

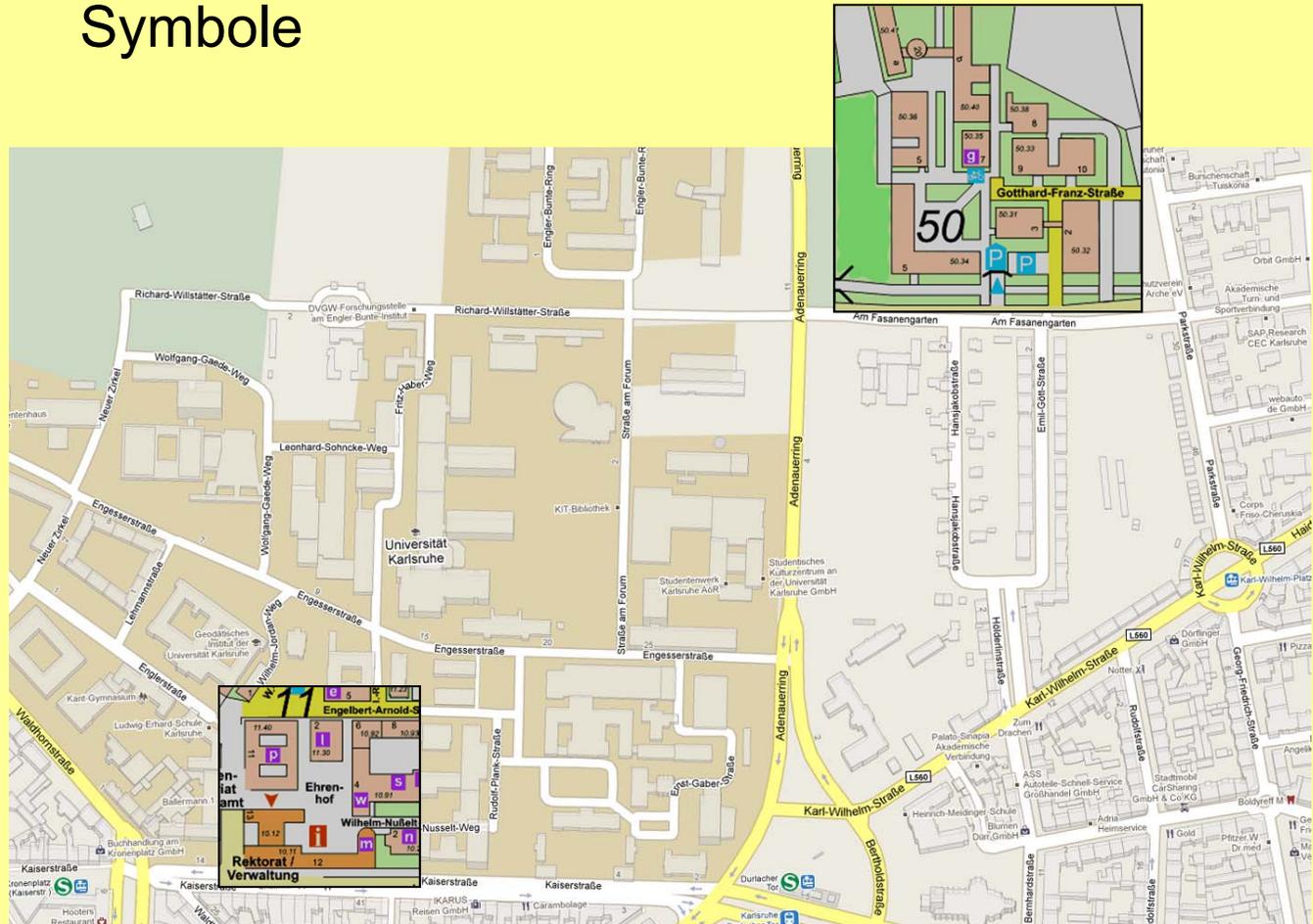
Beispiel: Karte-Karte-Referenzierung

$D_1, D_2, D_3 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$

Weltkoordinaten, → **Registrierung**  
teilw. überlappend

$W_1 = W_2 \approx W_3$

Symbole



Quelle: maps.google.com

## 1.3 Grundlage: Unsicherheitsbehaftete Information

Zusätzliche Bedingung: Zu fusionierende Information, die sich widersprechen kann, muss **unsicherheitsbehaftet** sein.

### Beispiel: Zwei Aussagen

Person A: Die Außentemperatur beträgt genau 15 °C, ich bin mir sicher.

Person B: Die Außentemperatur beträgt genau 20 °C, ich bin mir sicher.

Fusion nur dann möglich, wenn auf die Sicherheit der beiden Informationsbeiträge verzichtet wird, z.B.

gleiche Unsicherheit → Die Außentemperatur beträgt vermutlich 17,5 °C

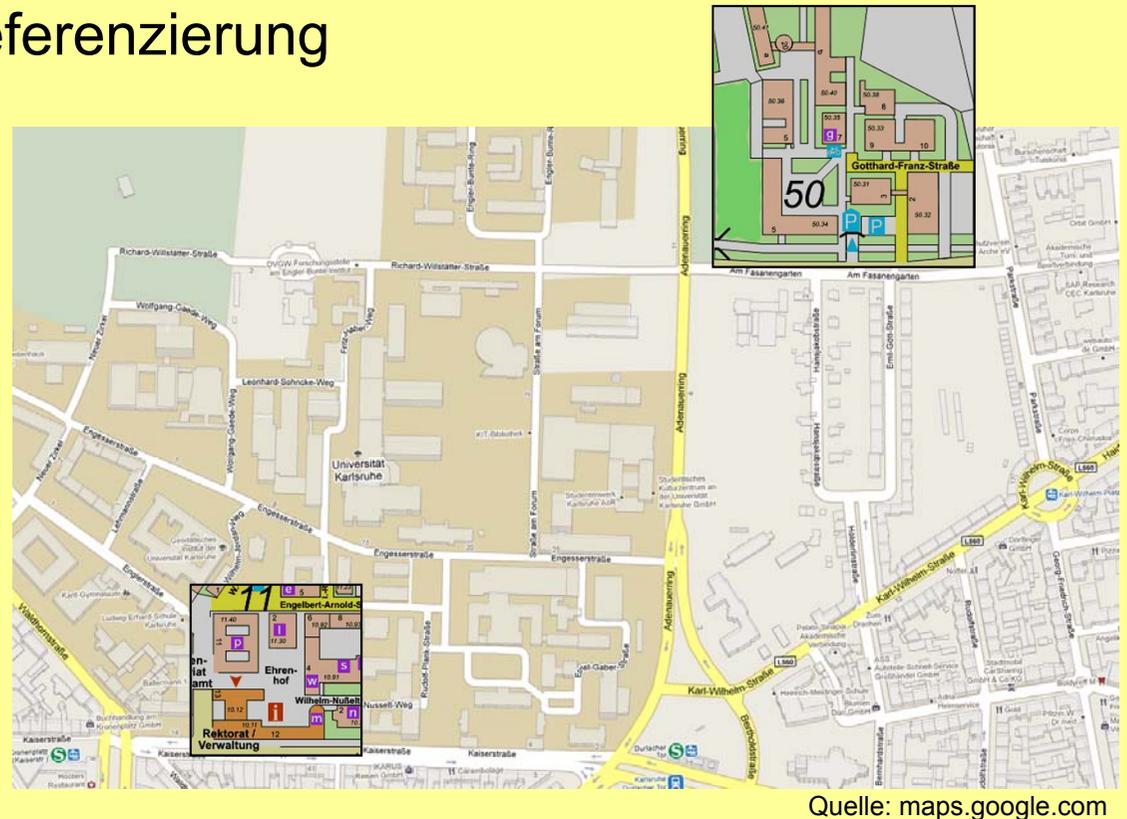
größeres Vertrauen für B: → Die Außentemperatur liegt vermutlich zwischen 17,5 °C und 20 °C

# 1.3 Grundlage: Unsicherheitsbehaftete Information

## Gegenbeispiel: Karte-Karte-Referenzierung

Keine Widersprüche der beiden zu fusionierenden Ausschnitte möglich, da keine Überlappung

Aber: Widersprüche zu „Hintergrundkarte“ möglich



## 1.3 Grundlage: Unsicherheitsbehaftete Information

---

Schlussfolgerung:

Wenn zu fusionierende Information unsicherheitsbehaftet sein muss, werden **Formalismen zur Spezifikation von Unsicherheit** benötigt:

- **Wahrscheinlichkeiten**  
→ Probabilistische Verfahren, Bayes'sche Fusion
- Verallgemeinerte Wahrscheinlichkeiten:  
**Basismaße**, Glaubens-/Plausibilitätsfunktion  
→ Dempster-Shafer-Theorie
- **Unschärfe Mengen**  
→ Fuzzy-Fusion
- **Unsicheres Erfahrungswissen**  
→ Neuronale Netze

## 1.3 Grundlage

---

### Zusammenfassung:

- Informationen können nur dann fusioniert werden, wenn sie sich auf einen **gemeinsamen Sachverhalt** beziehen.
- Bei zu fusionierenden Daten bedeutet dies, dass Definitions- und Wertebereiche „**kompatibel**“ sein müssen oder in einen geeigneten Zusammenhang gebracht werden müssen.
- Dies gilt in gleicher Weise auch für andere verfügbare Informationen.
- Zu fusionierende Informationsbeiträge müssen **unsicherheitsbehaftet** sein, wenn sie zu Widersprüchen führen können.

## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

---

Informationsquellen erfassen nur jeweils **Ausschnitte** (örtlich, zeitlich, merkmalsbezogen) der gesamten über den Kontext verfügbaren Information.

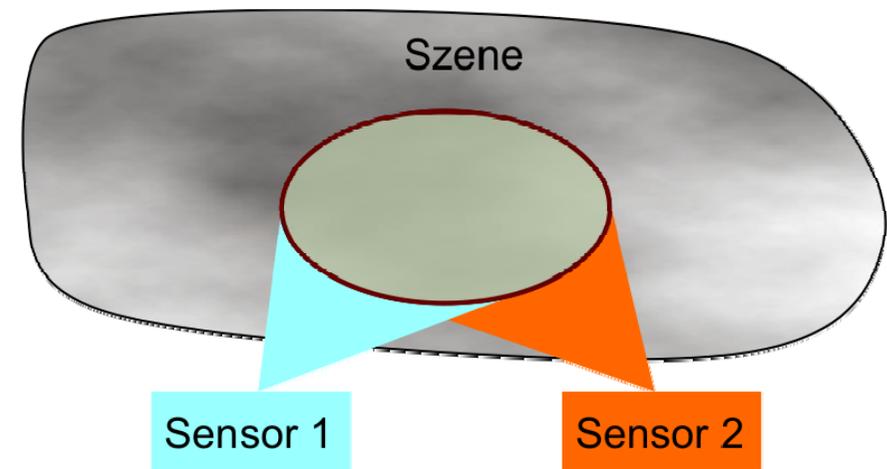
Grundsätzliche Frage:

Wie kann der **Zusammenhang** zwischen den Informationen der einzelnen Quellen beschaffen sein?

# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

## ■ Redundante (konkurrierende) Information

- Nutzinformation liegt **in gleicher Weise** in den Informationsquellen vor
- Meist homogene Sensoren (s. unten)
- Konkurrierende Fusion, z.B. durch Mittelung
- Alle Informationsquellen tragen in derselben Weise zum Fusionsergebnis bei
- Beispiele:
  - Störungs- (Rausch-) reduktion
  - Erhöhung der Zuverlässigkeit
  - Erwünschte Mittelung von Beobachtungen



# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

## Redundante/konkurrierende Information:

- Rauschreduktion

### Beispiel:

- Ortsfeste Kamera, starkes additives Gauß'sches Rauschen:  $\sigma_{\text{Sensor}} = 20$



Rauschfreies Bild



Stark verrauschtes Bild

# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Rauschunterdrückung durch mehrfache Aufnahme und Mittelung



Bildserie  $N = 4$ ,  $\sigma_{\text{sensor}} = 20$



Fusionsergebnis  $\sigma_{\text{Ergebnis}} = \frac{\sigma_{\text{Sensor}}}{\sqrt{N}} = 10$

- Berechnung: siehe Abschnitt 2.3.1 (Ausgleich direkter Beobachtungen)

# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

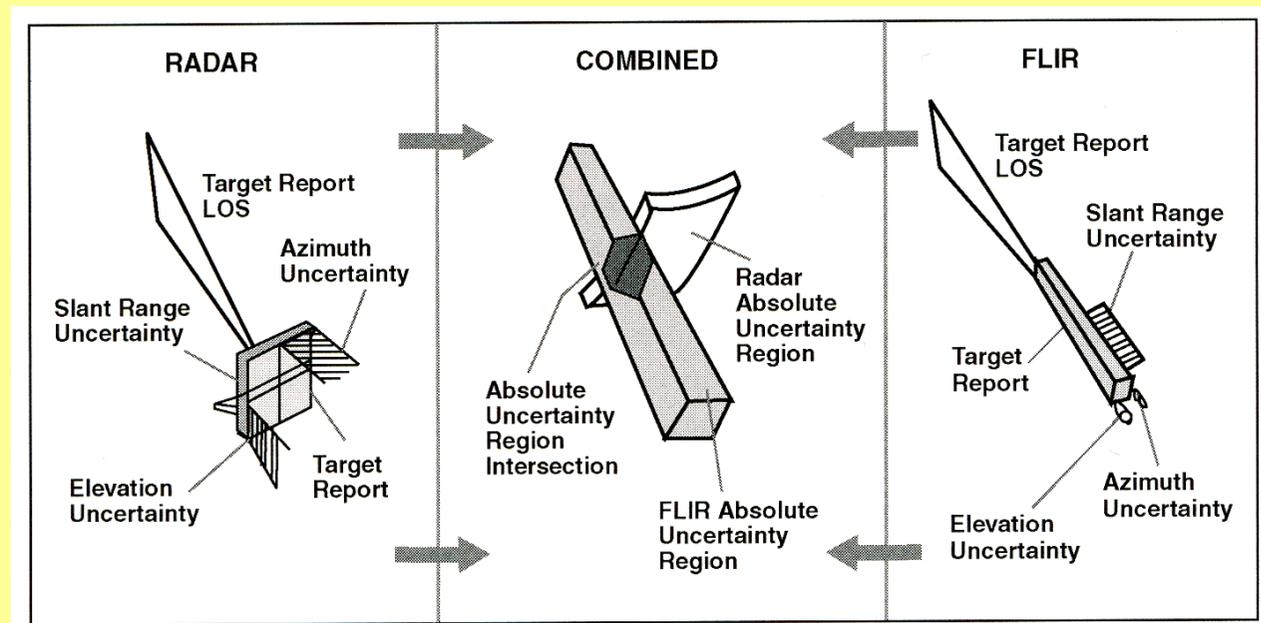
## Redundante/konkurrierende Information:

- Erhöhung der räumlichen/zeitlichen Auflösung
- Homogene oder heterogene Sensorsysteme

### Beispiel: Fusion von Radar- und FLIR- (forward-looking IR-) Daten

Radar: geringe Unsicherheit der Entfernung,  
aber große Unsicherheit der Richtung

FLIR: geringe Unsicherheit der Richtung,  
aber große Unsicherheit der Entfernung



LOS: line of sight

Quelle: D. L. Hall, J Llinas: Handbook of Multisensor Data Fusion

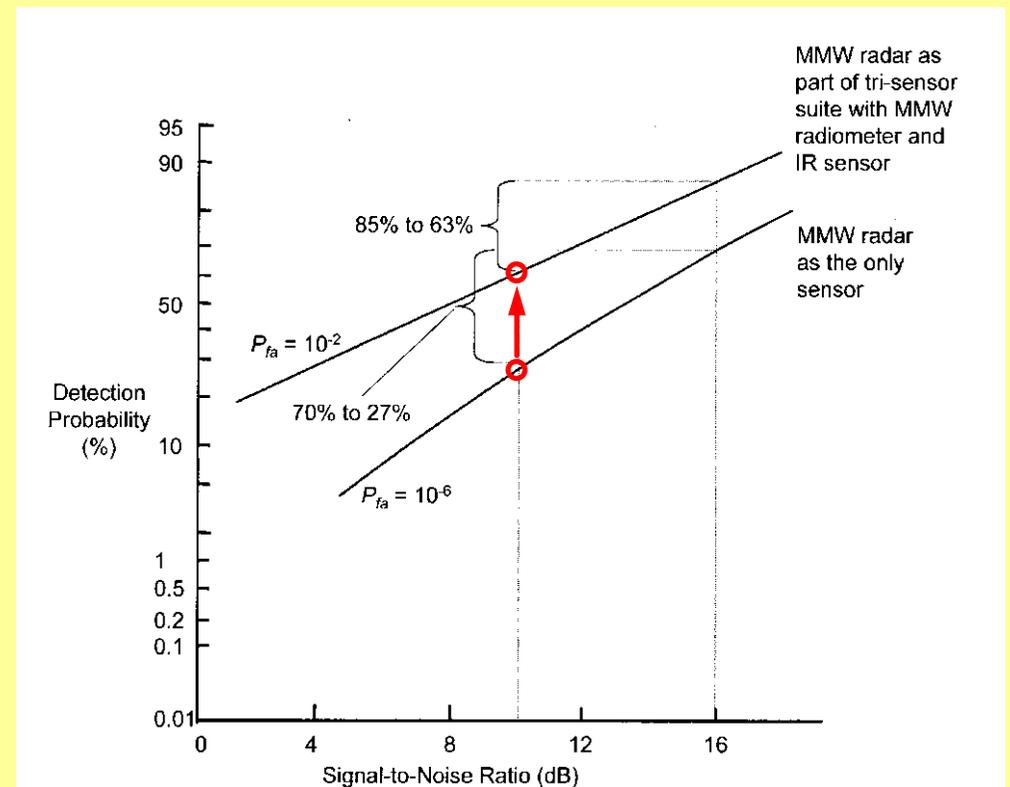
# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

## Redundante/konkurrierende Information:

- Höhere Robustheit/Zuverlässigkeit
- Verbesserte Eindeutigkeit/Detektionswahrscheinlichkeit
- Oft heterogene Sensorsysteme

### Beispiel: Detektion eines Objekts

- Zul. Falschalarmrate  $P_{fa} = 10^{-6}$  führt bei  $SNR = 10\text{dB}$  zur Erkennungsrate 27%.
- Bei drei Sensoren kann  $P_{fa}$  für jeden Sensor auf  $P_{fa} = 10^{-2}$  erhöht werden, da die nachfolgende Fusion  $P_{fa,gesamt}$  auf  $P_{fa,gesamt} = 10^{-6}$  reduziert.  
(Vor.: unabhängige Störungen, z.B. bei heterogenen Sensoren, Fusion durch Konjunktion der Einzeldetektionen)
- Erkennungsrate des Gesamtsystems steigt dann aufgrund der viel höheren Erkennungsrate der Einzelsensoren von 27% auf 63%.

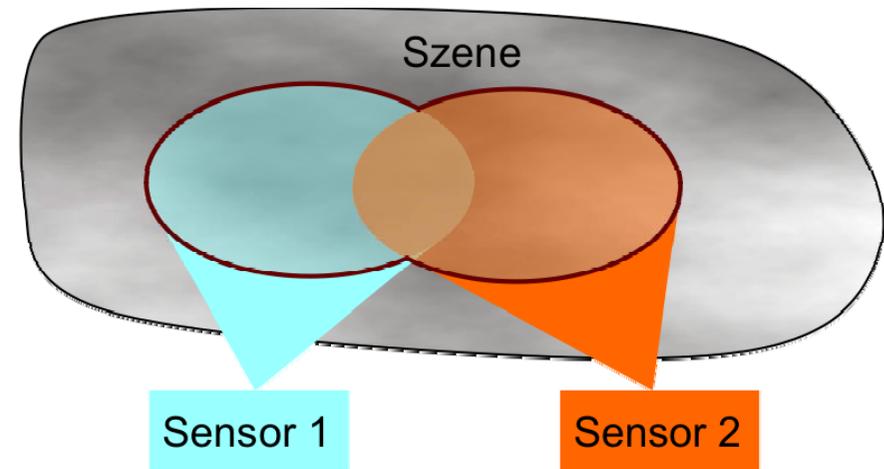


Quelle: L. A: Klein: Sensor and Data Fusion  
MMW: millimeter-wave

# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

## ■ Komplementäre Information

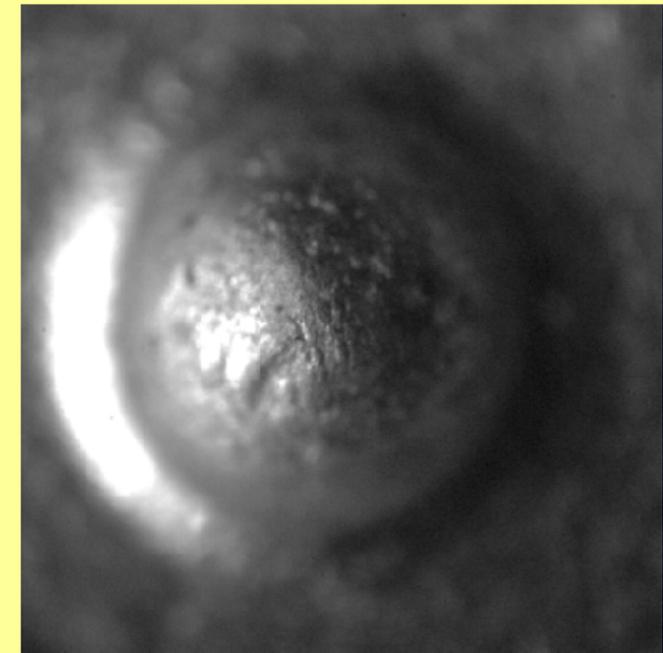
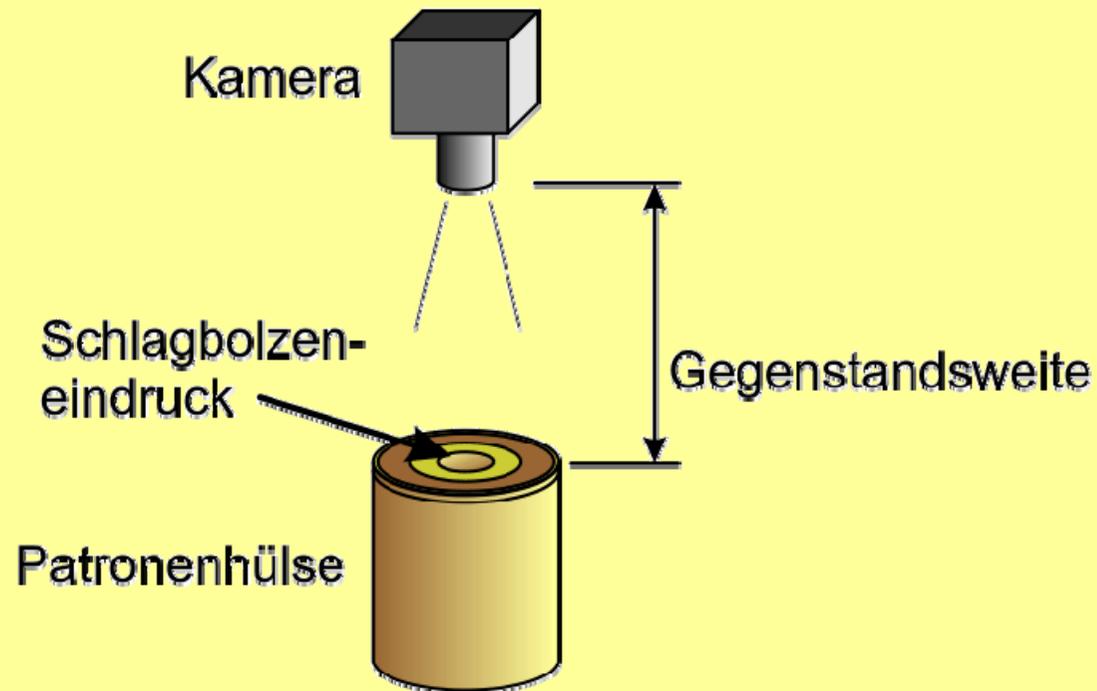
- Nutzinformation liegt für einen bestimmten Ort auf eine oder mehrere Informationsquellen konzentriert vor
- Komplementäre Fusion: Gezielte Auswahl der Nutzinformation
- Konkurrierende Fusion (z.B. Mittelung) meist nicht sinnvoll, da destruktive Überlagerung
- Anwendbar auf homogene oder heterogene Sensoren
- Beispiele:
  - Synthetisch erweiterte Schärfentiefe
  - Kontrastreiche Bilder durch Fusion von Beleuchtungsserien
  - Erzeugung von Bildteppichen



## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

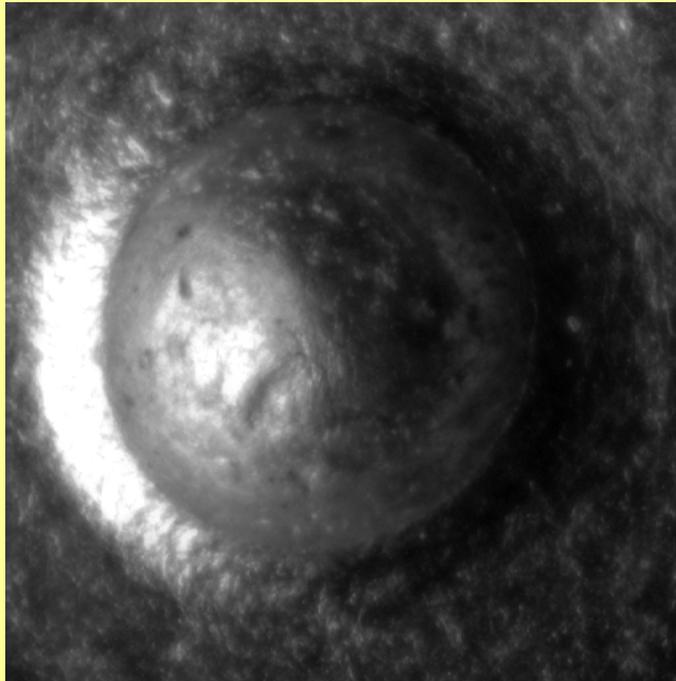
### Beispiel für komplementäre Information: **Fokusserie**

- Teilweise identische Definitionsbereiche:  $D_i, i = 1, \dots, 3$   $x, y$  identisch
- Variation der Gegenstandsweite
- Konstanter Abbildungsmaßstab in der Schärfee Ebene («Virtuell telezentrische Abbildung«)



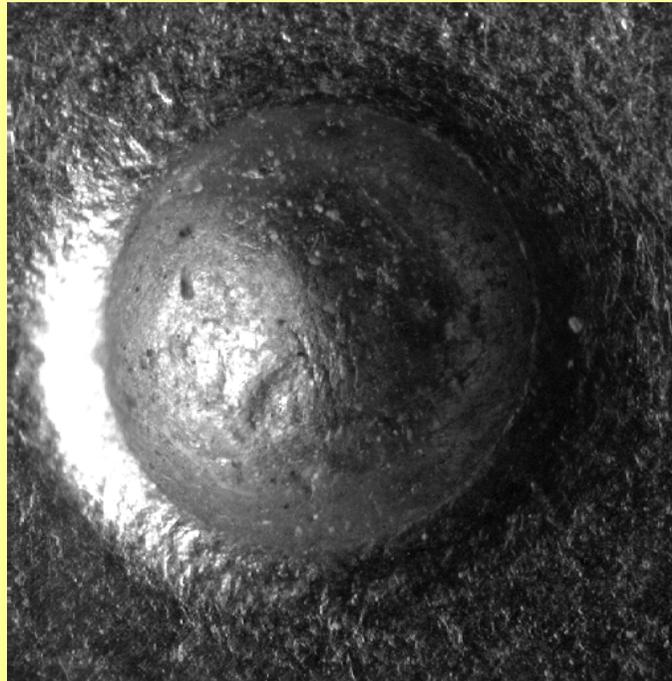
## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Verknüpfung der Einzelbilder der Bildserie:  
Synthetisch erhöhte Schärfentiefe



Mittelung

→ Kontrastarmes Bild



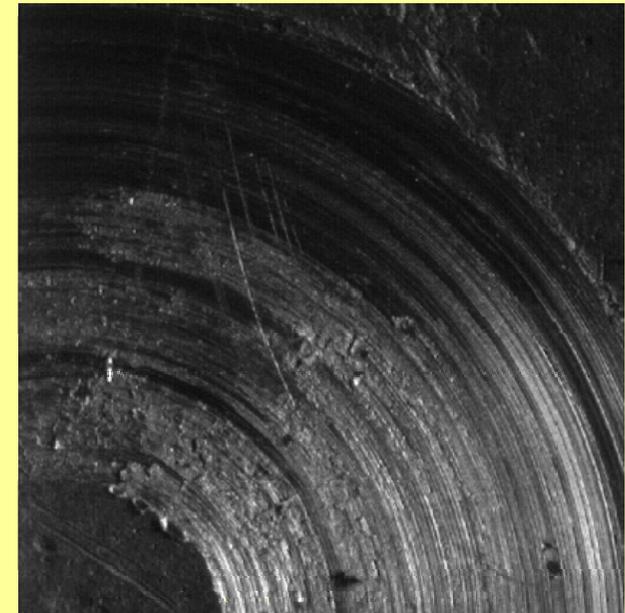
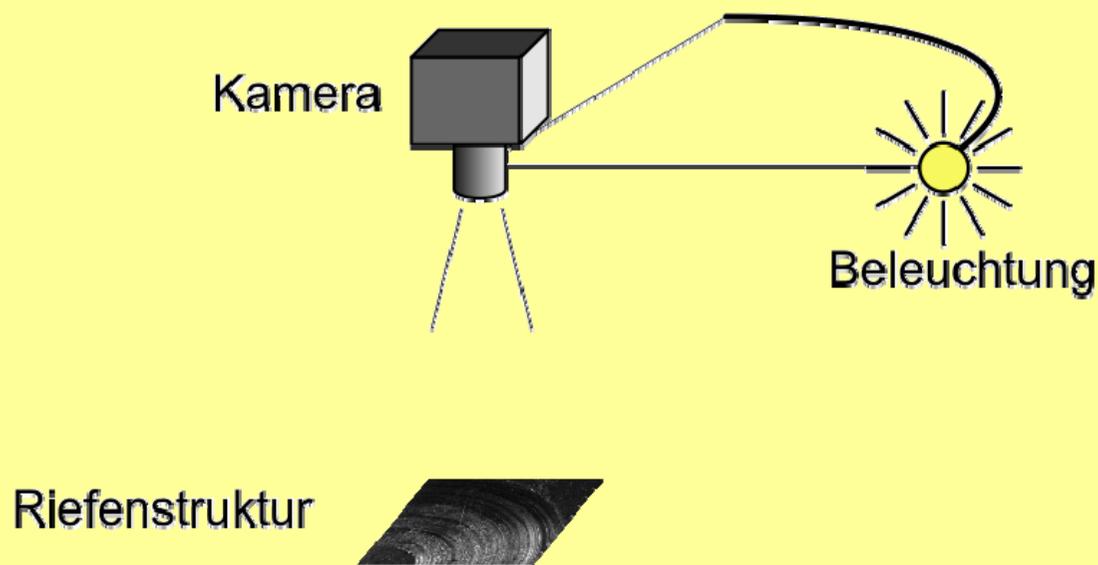
Ausschneiden und Zusammenfügen  
fokussierter Bereiche

→ Erhöhte Schärfentiefe

## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

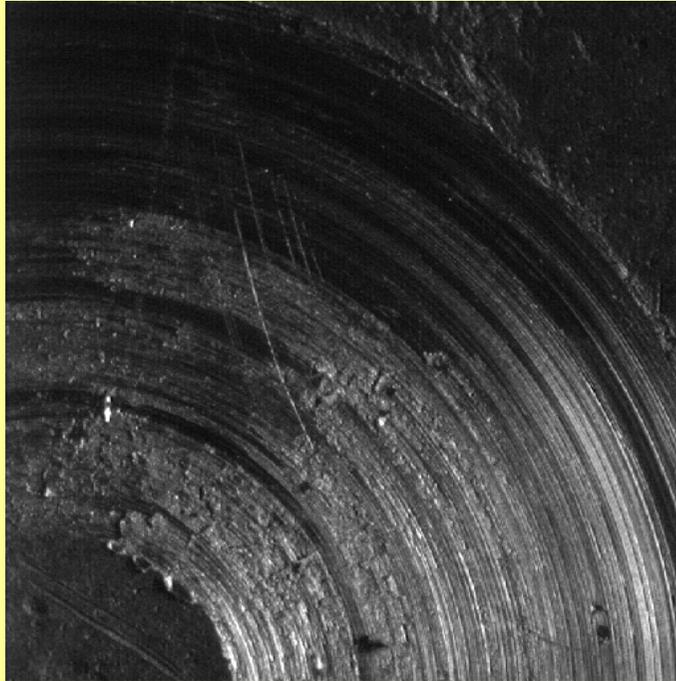
### Beispiel für komplementäre Information: **Beleuchtungsserie**

- Variation der Beleuchtungsrichtung: Azimut einer Punktlichtquelle
- Optimaler Kontrast bei Beleuchtung senkrecht zu den Riefen

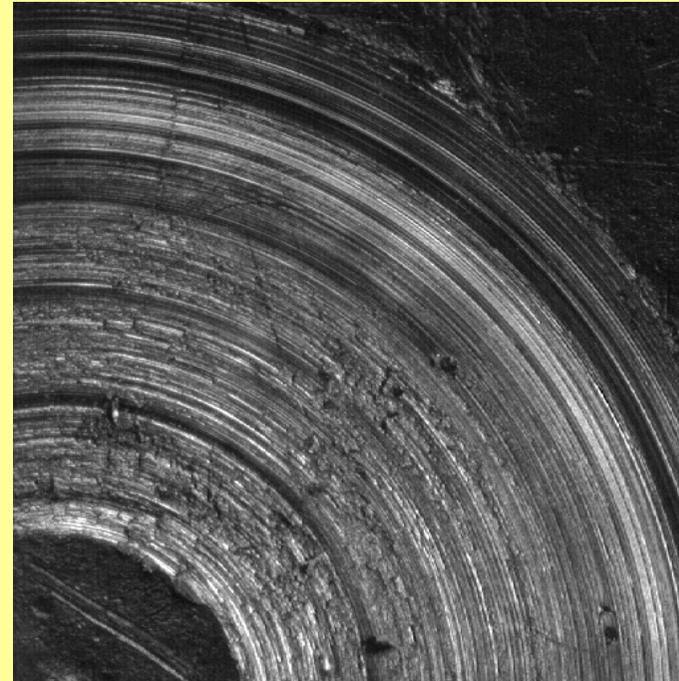


## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Optimierung des lokalen Kontrasts



Bildserie

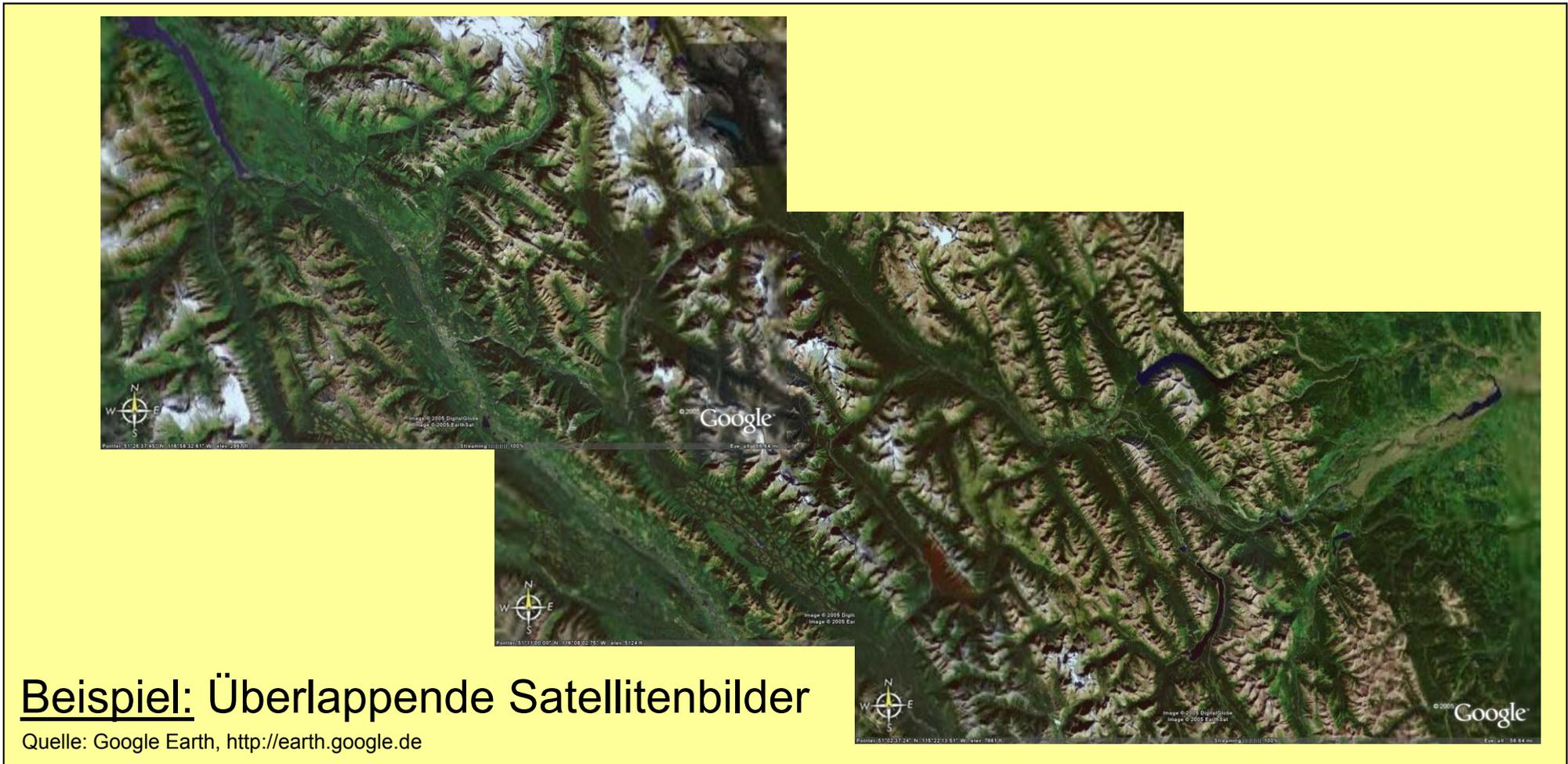


Ausschneiden und Zusammenfügen  
kontrastreicher Bereiche  
→ Erhöhte Sichtbarkeit der Strukturen

# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

## Komplementäre (ergänzende) Definitionsbereiche:

- Relevante Information lokal in verschiedenen Informationsquellen
- Erweiterung des Definitionsbereichs im Fusionsergebnis
- Erhöhung der Sensorabdeckung (räumlich/zeitlich)



### Beispiel: Überlappende Satellitenbilder

Quelle: Google Earth, <http://earth.google.de>

## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

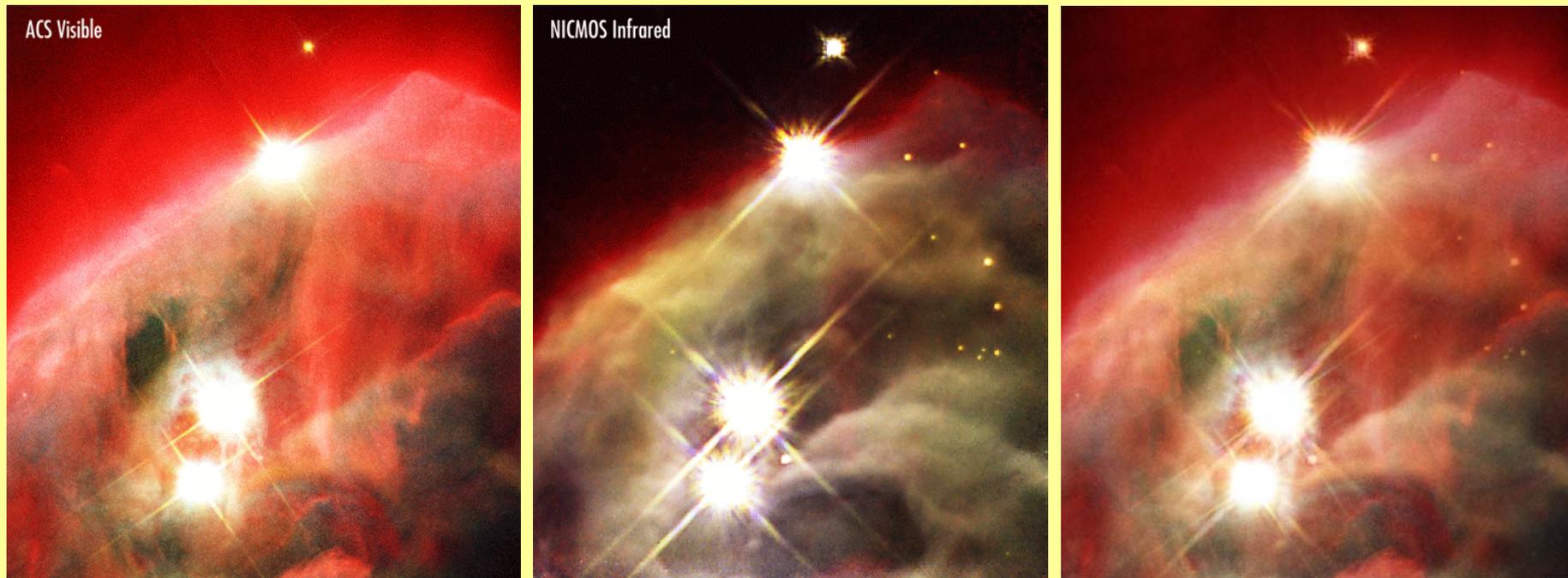
Identische Definitionsbereiche:

- Zunächst evtl. Ausrichtung der Daten (Registrierung, Alignment)

**Komplementäre Wertebereiche:**

- Erhöhung der Dimensionalität des Merkmalsvektors durch heterogene Sensoren

### Beispiel: Multispektralbilder Hubble Space Telescope



Quelle: <http://www.spacetelescope.org>

# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

Beispiel für komplementäre Information:

## Stationäre RGB-Kamera

- (Rot/Grün/Blau)

$$d(\mathbf{x}, p), p \in \{R, G, B\}$$



# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Fusion der RGB-Bilder



Helligkeit  
(hier: Intensität im HSV-Farbraum)

$$I(\mathbf{x}) = \max(d(\mathbf{x}, R), d(\mathbf{x}, G), d(\mathbf{x}, B))$$



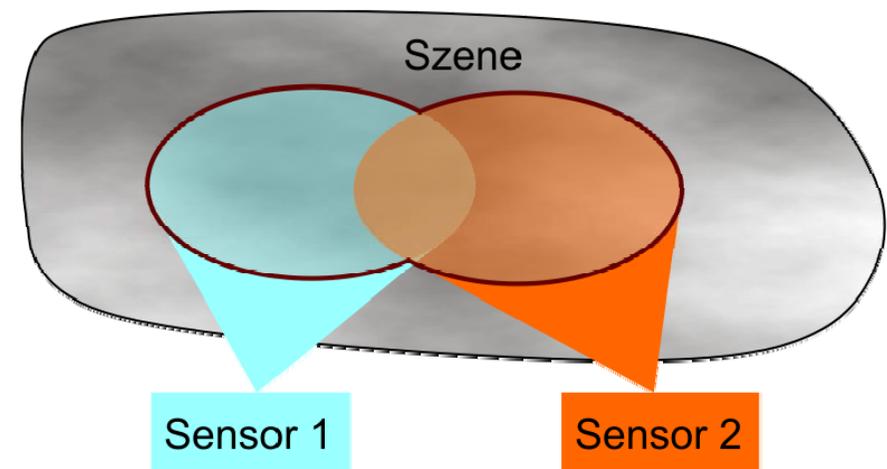
Sättigung  
(im HSV-Farbraum)

$$S(\mathbf{x}) = \frac{I - \min_{p \in \{R, G, B\}}(d(\mathbf{x}, p))}{I}$$

# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

## ■ Verteilte Information

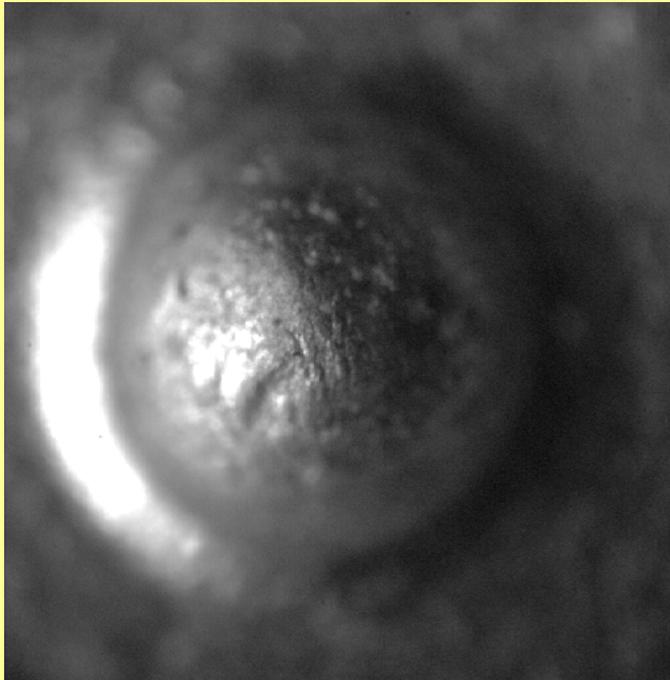
- Nutzinformation liegt verteilt über die Informationsquellen vor
- Erst die **Auswertung sämtlicher Informationsquellen** erlaubt Aussagen über die Zielgröße
- Komplementäre Fusion von extrahierten Merkmalen
- Beispiele:
  - Tiefenkarten aus Stereo-Serien oder Fokussereien (*depth from focus*)
  - Photometrisches Stereo



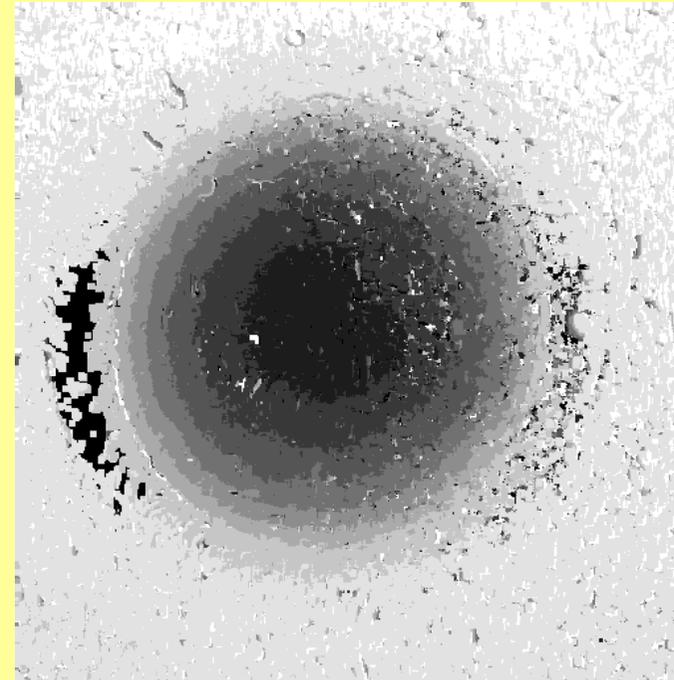
## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

### Beispiel für verteilte Information: **Fokussérie**

- Bildnummer ist ein Maß für die vertikale Kameraposition
- Für jeden Ort: Übernahme der Nummer des Bildes mit maximalem Kontrast in das Fusionsergebnis
- Depth from focus



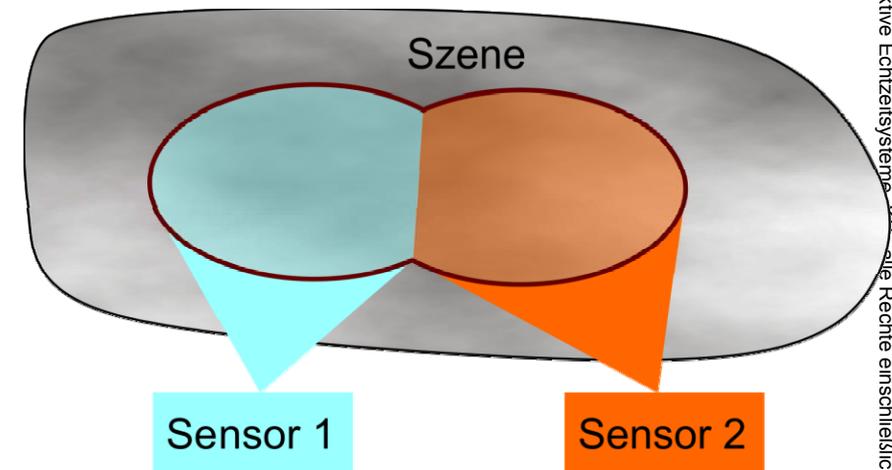
Bildserie (10 Bilder)



Tiefenkarte  
(schwarz: tief, weiß: hoch)

# 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

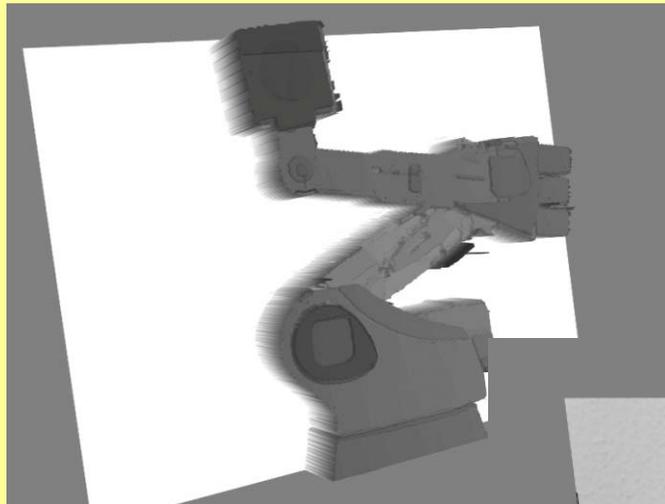
- **Orthogonale Information**
  - Zu fusionierende Informationen enthalten Nutzinformation über **disjunkte Eigenschaften der Szene**, z.B. unterschiedliche physikalische Größen
  - Verknüpfung von Merkmalen oder Entscheidungen
  - Beispiel:  
Verknüpfung von Grauwertbildern (Reflektanzeigenschaften der Szene) und Tiefenkarten (3D-Gestalt der Szene): Texturierung eines räumlichen Modells



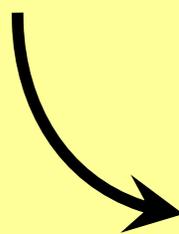
## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

Beispiel für orthogonale Information: **Texturiertes 3D-Modell**

- 3D-Modell aus Stereo-Auswertung
- Reflektanz aus einem Kamerabild



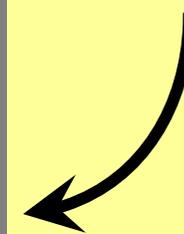
3D-Modell



Texturiertes 3D-Modell



Reflektanz



## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

---

Zusammenfassung:

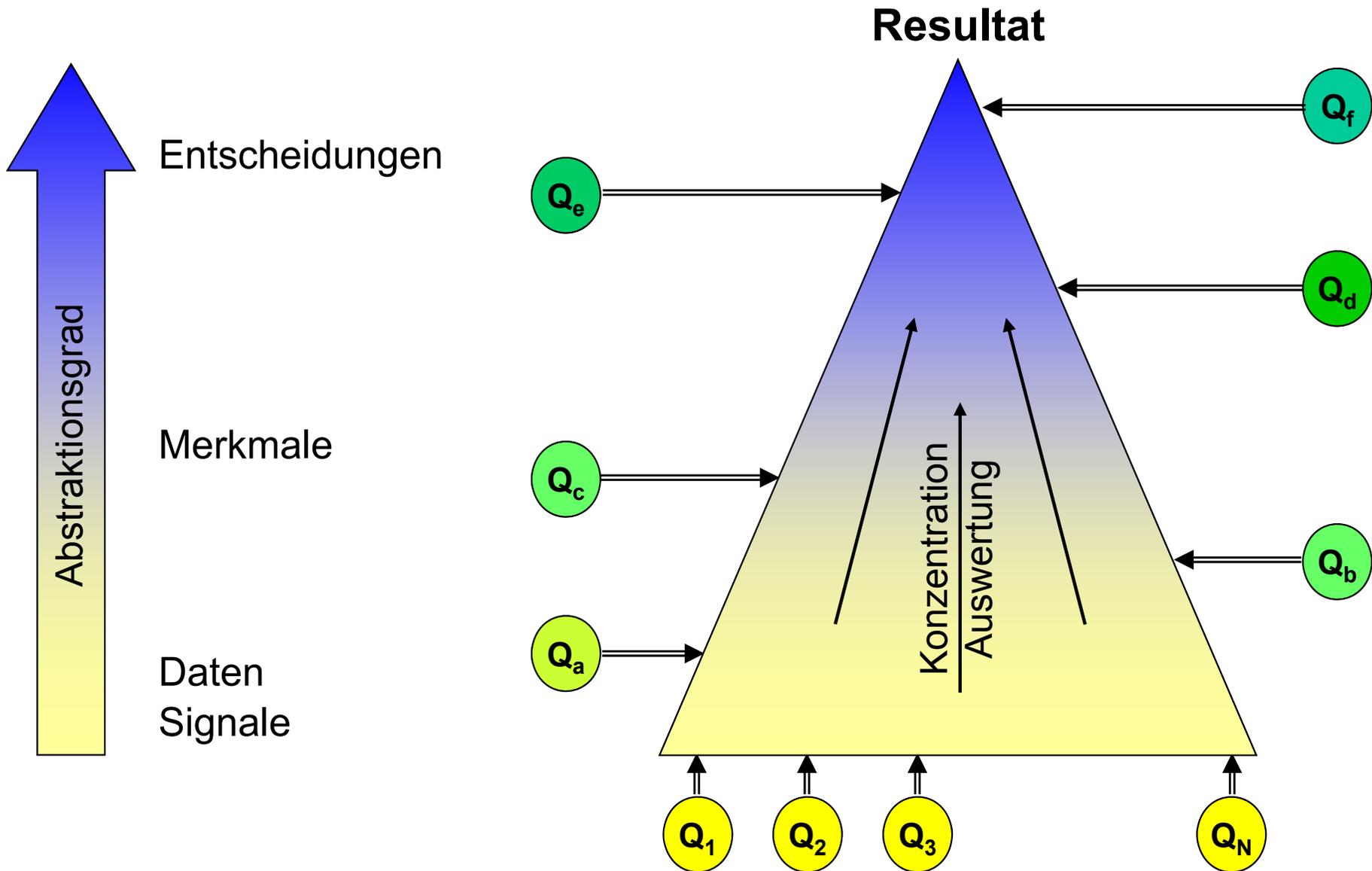
- Jede Informationsquelle kann nur einen Teil der insgesamt verfügbaren Information beschreiben.
- Diese Informationen stehen in **unterschiedlichen Zusammenhängen** zueinander:
  - **Redundante** (konkurrierende) Information:  
Quellen enthalten Nutzinformation in gleicher Weise
  - **Komplementäre** Information:  
Quellen enthalten sich ergänzende Nutzinformation
  - **Verteilte** Information:  
Alle Quellen enthalten Nutzinformation gemeinsam
  - **Orthogonale** Information:  
Quellen enthalten Nutzinformation über disjunkte Eigenschaften

## 1.5 Anforderungen an eine Fusionsmethodik

---

- Information **transformieren**: Information aus unterschiedlichen Quellen in einheitliche mathematische Beschreibung übersetzen, und zwar
  - **verlustarm**: bei Abstraktion (Erhöhung des Abstraktionsniveaus)
  - **fehlerfrei**: bei Beibehaltung des Abstraktionsniveaus
  - **artefaktarm**: bei Spezialisierung (Erniedrigung des Abstraktionsniveaus)
- Information **fusionieren**: Transformierte Information aus unterschiedlichen Quellen auf einem gemeinsamen Abstraktionsniveau überlagern.
- **Fokussierung** auf anwendungsspezifische Fragestellungen: Konzentration einer gesamthaften Informationsverkörperung auf spezielle Einzelfragestellungen.

# 1.5 Anforderungen an eine Fusionsmethodik



## 1.6 Architektur

---

Architektur einer Fusionsmethodik lässt sich einteilen nach:

- **Abstraktionsgrad**, auf dem die Information zur Fusion vorliegt  
→ Fusion auf Signalebene, Datenebene, Merkmalsebene, Entscheidungsebene
- **Auswertungstiefe** in den Komponenten (Sensoren, Zentraleinheit)  
→ verteilte Fusion, zentralisierte Fusion, hybride Fusion

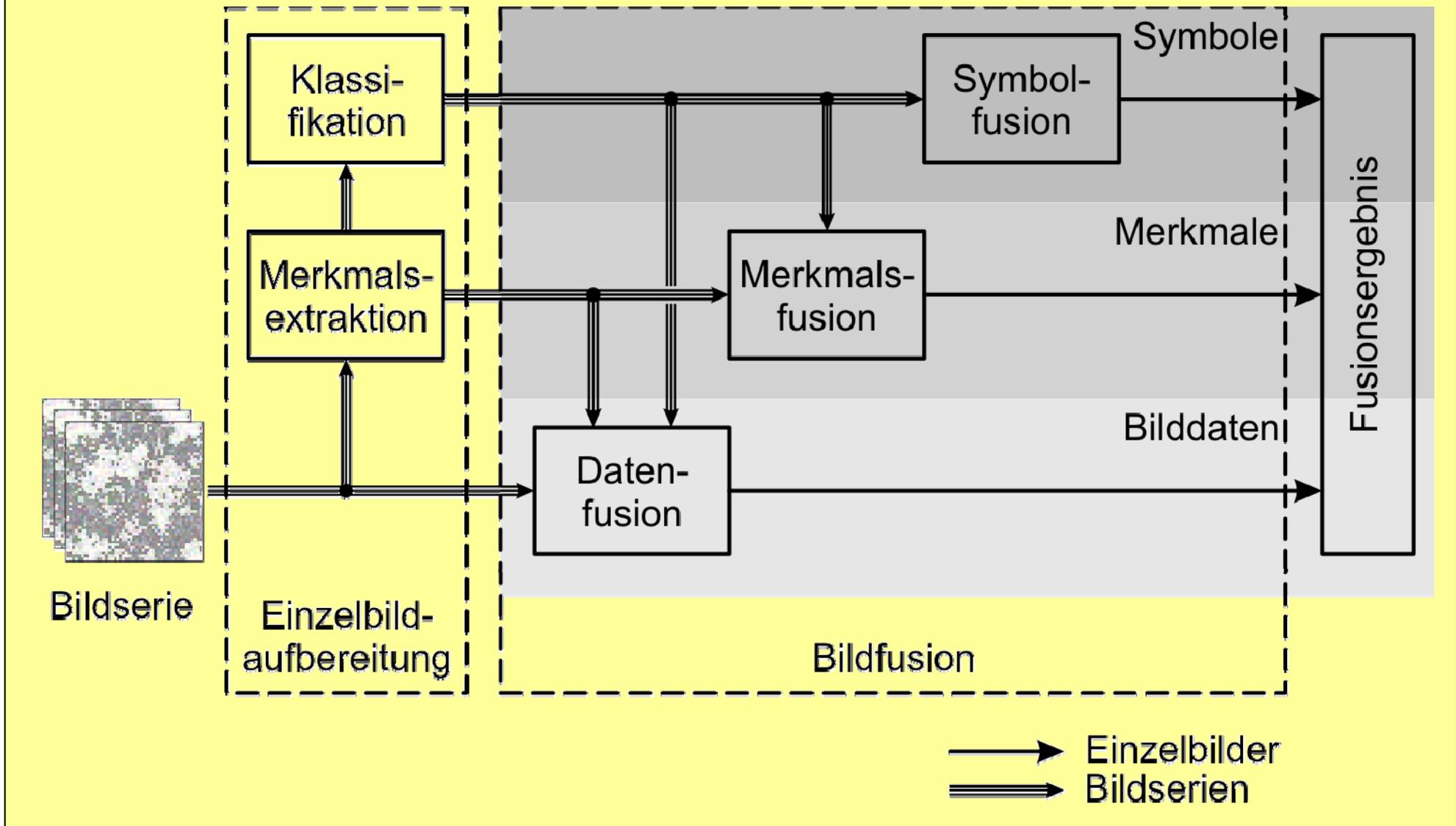
**Sinnvolle Architektur** hängt ab von

- Zielgröße
- Kompatibilität der Informationsquellen
- Unabhängigkeit der Informationsquellen
- Fähigkeiten der Sensoren
- Kapazität der Kommunikationskanäle, Rechenkapazität der Komponenten (insbes. der Zentraleinheit)

# 1.6 Architektur

Beispiel zur Einteilung einer Architektur nach Abstraktionsgrad:

## Bildfusion



# 1.6 Architektur

	Eingangsgrößen			Ebene, auf der fusioniert wird			Ausgangsgröße		
	Daten	Merkmale	Symbole	Daten	Merkmale	Symbole	Daten	Merkmale	Symbole
Rauschunterdrückung durch Mittelung von Bildern									
Erstellung von Tiefenkarten aus Fokuserien									
Erstellung von Tiefenkarten aus Stereoserien									
Fusion von Tiefenkarten									
Fusion von Tiefenkarte und Grauwertbild zu texturiertem 3D-Modell									
Kombination von Farbauszügen zu einem Farbbild									
Bestimmung der Farbsättigung aus Farbauszügen									
Kriminalistische Ermittlung									
Menschliche Wahrnehmung									
Fahrerassistenz: Sensorielle Unterstützung der menschlichen Wahrnehmung									
Fahrerassistenz: Maschinelle multisensorielle Hinderniserkennung									
Ortung von Schienenfahrzeugen									
Karte-Bild-Referenzierung									
Karte-Karte-Referenzierung									
Multispektrale Teleskopaufnahmen									
Fusion von Radar und FLIR									

## 1.6 Architektur

---

Wahl des Abstraktionsgrades:

### Hoher Abstraktionsgrad

- + Meist **methodisch relativ einfach**, da meist Standardverfahren zur Merkmalsgewinnung und -auswertung in den Quelldaten verfügbar sind (z.B. Bildverarbeitungsverfahren)
- Oft **geringere Qualität** des Fusionsergebnisses, da potenziell unerwünschte Informationsreduktion bei Merkmalsgewinnung
- Evtl. **rechenaufwändige Vorverarbeitung**

### Niedriger Abstraktionsgrad

- + Oft **bessere Qualität des Fusionsergebnisses**, da Informationsgehalt der Quelldaten bis zur Fusion vollständig erhalten bleibt
- Meist **angepasste Methoden** zur Verarbeitung der Quelldaten erforderlich
- Meist **mehr Aufwand bei der Entwicklung** der Verfahren

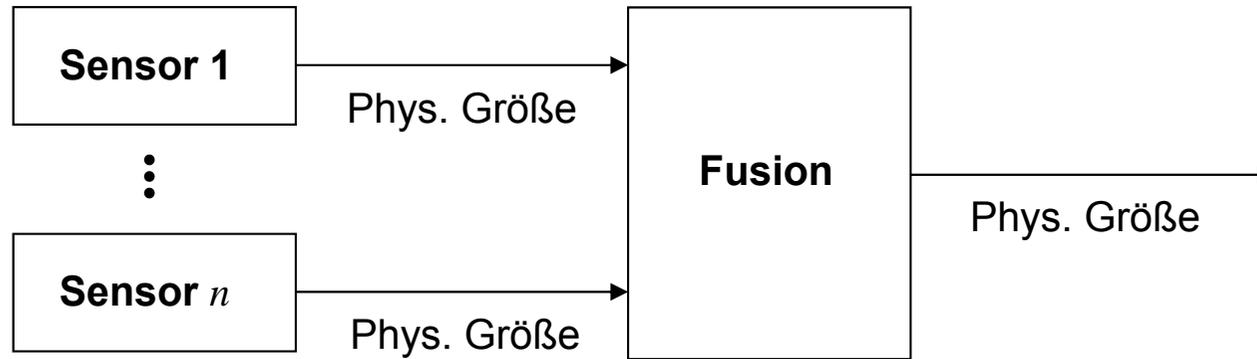
## 1.6.1 Fusion auf Signalebene

---

- Unmittelbare Fusion physikalischer Signale: **Keine Abstraktion**
- Eingabe: Physikalische Größe, Ausgabe: Physikalische Größe
- Kombination der Signale
  - eines Sensors über einen gewissen Zeitraum (Akkumulation)  
oder
  - einer Gruppe von Sensoren, die gleichzeitig dieselben physikalischen Größen messen
- Voraussetzung: **Identischer Definitionsbereich** der zu fusionierenden Signale:
  - Zeitlich: Meist keine zeitliche Registrierung
  - Örtlich: Meist keine örtliche Registrierung

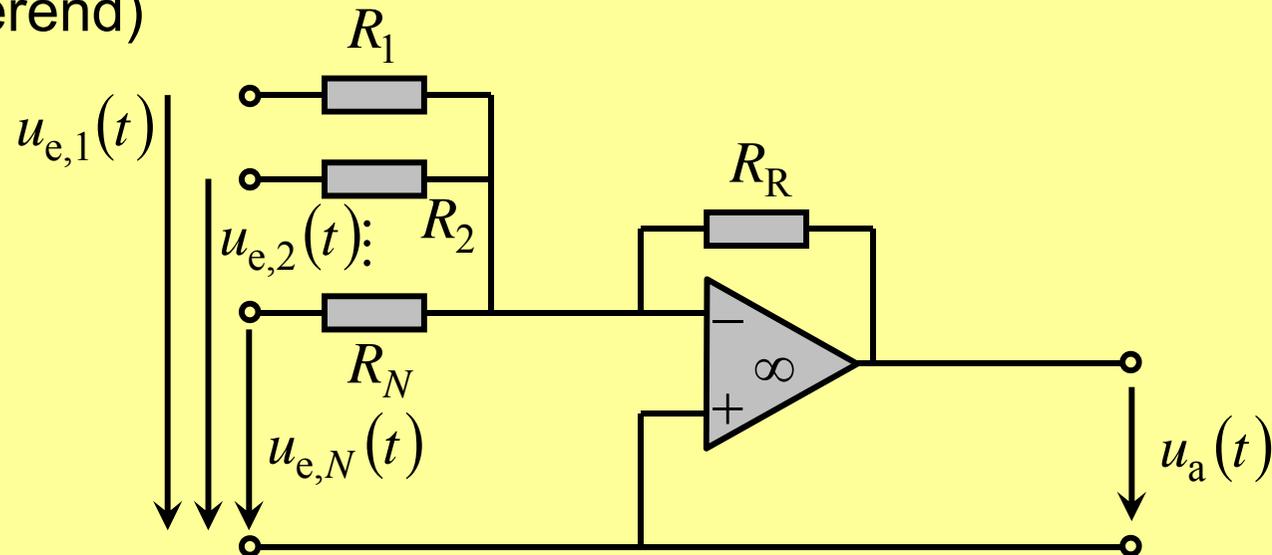
## 1.6.1 Fusion auf Signalebene

---



## 1.6.1 Fusion auf Signalebene

Beispiel: Addition von Spannungen mittels **Operationsverstärker**  
(invertierend)



- Ausgangsspannung: Gewichtete Summation der Eingangsspannungen:

$$u_a(t) = - \left( \frac{R_R}{R_1} u_{e,1}(t) + \frac{R_R}{R_2} u_{e,2}(t) + \dots + \frac{R_R}{R_N} u_{e,N}(t) \right)$$

- Voraussetzung: Übereinstimmender Definitionsbereich der Eingänge, d.h. gleichzeitig anliegende Eingangssignale: Kein Speicher

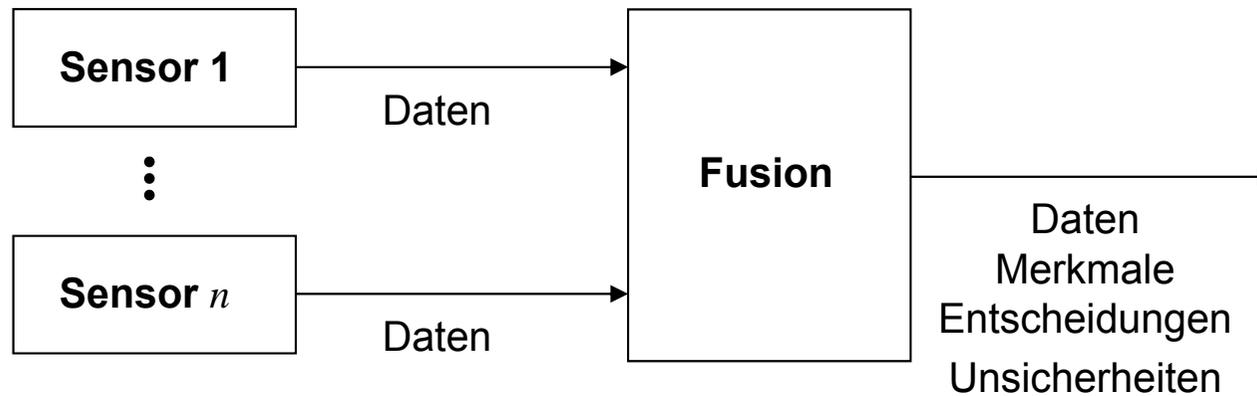
## 1.6.2 Fusion auf Datenebene

---

- Anwendbar auf in Daten abgebildete Signale
- In der Bildverarbeitung: Fusion auf Bilddaten-Ebene (pixel-level fusion)
- (Minimal) vorverarbeitete Daten: **Niedriges Abstraktionsniveau**
- Nutzinformation liegt in unterschiedlichen Sensordaten vor (redundant/konkurrierend, komplementär, verteilt oder orthogonal)
- **Voraussetzungen:**
  - Homogene Sensoren (s. unten)  
Gleiche oder gleichartige physikalische Eigenschaften der Szene
  - Ausgerichtete Daten (evtl. zuvor Registrierung durchführen)
- **Ziel:**
  - Konkurrierende Fusion (z.B. Rauschunterdrückung)
  - Komplementäre Fusion  
(z.B. erweiterte Schärfentiefe, erweiterter Definitionsbereich)
- Bei der Fusion kann Information auf höherem Abstraktionsniveau genutzt werden: z.B. Merkmale

## 1.6.2 Fusion auf Datenebene

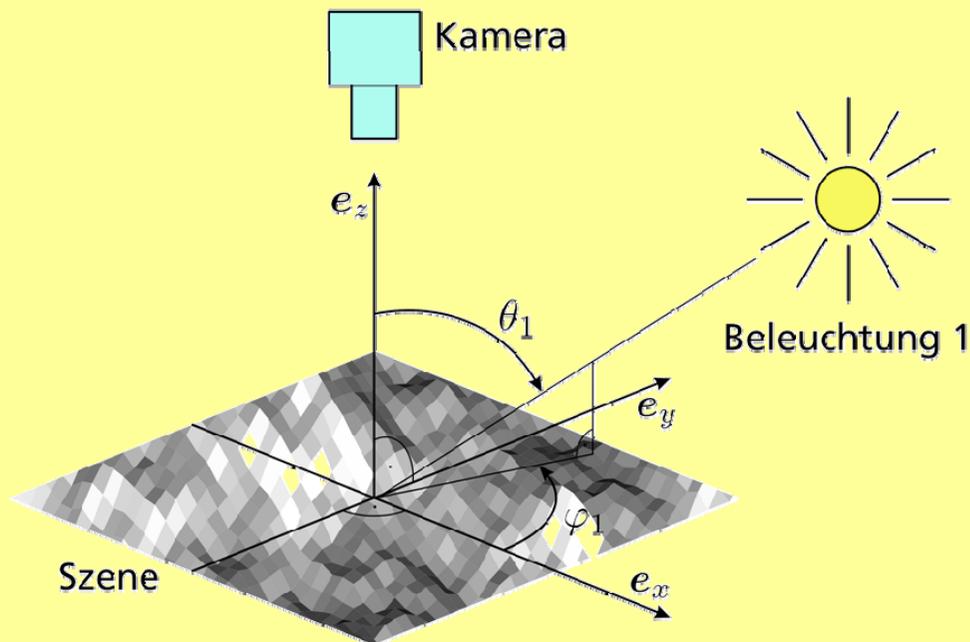
---



## 1.6.2 Fusion auf Datenebene

### Beispiel: Photometrisches Stereo

- Rekonstruktion von  $2\frac{1}{2}$ D-Gestalt und Reflektanz einer Oberfläche
- Sensordaten: Beleuchtungsserie: Variation der Beleuchtung bei ortsfester Kamera (virtuelle, homogene, kollokierte Sensoren)
- Vorwissen: Reflexionseigenschaften der Oberfläche (material- bzw. bearbeitungsabhängig)



## 1.6.2 Fusion auf Datenebene

- Auswertung durch Modellierung der beobachteten Intensität:  $g(\mathbf{x})$   
z.B. unter **Annahme idealer diffuser Reflexion**:  $g(\mathbf{x}) = \rho(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{b}_e^T \mathbf{n}_e(\mathbf{x})$   
(Lambert'sches Reflexionsgesetz)
- Aufnahme einer Beleuchtungsserie:

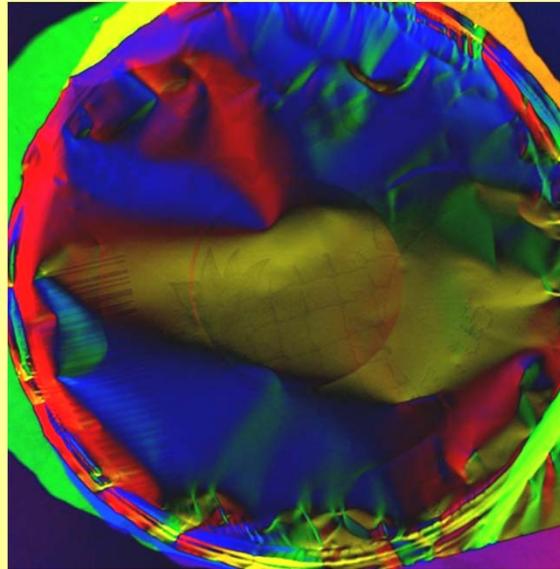
$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} g_1(\mathbf{x}) \\ \vdots \\ g_n(\mathbf{x}) \end{pmatrix} = \rho(\mathbf{x}) \cdot \mathbf{B}^T \mathbf{n}_e(\mathbf{x})$$

$\mathbf{g}(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^n$	: Beobachtungsvektor
$0 \leq \rho(\mathbf{x}) \leq 1$	: (Diffuse) Reflektanz
$\mathbf{n}_e(\mathbf{x}) \in \mathbb{R}^3$	: Normalen-Einheitsvektor
$\mathbf{b}_e = (\cos \varphi \sin \theta, \sin \varphi \sin \theta, \cos \theta)^T \in \mathbb{R}^3$	: Beleuchtungsrichtung
$\mathbf{B} = (\mathbf{b}_{e,1}, \dots, \mathbf{b}_{e,n}) \in \mathbb{R}^{3 \times n}$	: Beleuchtungsmatrix

## 1.6.2 Fusion auf Datenebene



Beleuchtungsserie



Normalenvektor  $n_e(x)$   
(Farbton: Azimut,  
Intensität: Polarwinkel)



Reflektanz  
 $\rho(x)$

- Ergebnis: Gute **Trennung von Gestalt und Reflektanz**
- Offensichtliche Abweichungen vom angenommenen Reflexionsmodell (spiegelnde Reflexionen): Noch akzeptable Ergebnisse

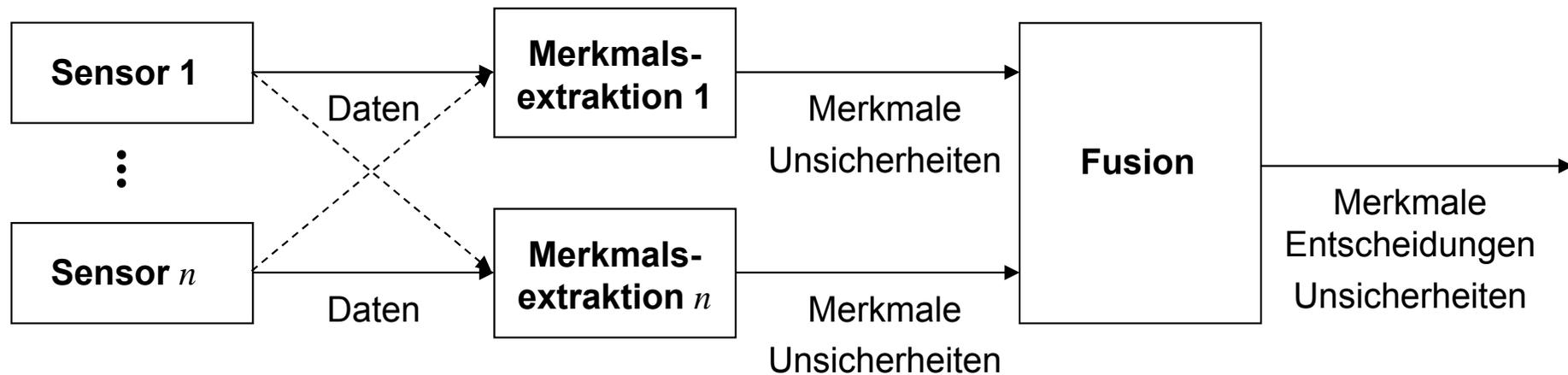
## 1.6.3 Fusion auf Merkmalsebene

---

- Fusion von extrahierten Merkmalen: **Mittleres Abstraktionsniveau**
- **Eingabe:** Merkmale (evtl. mit Unsicherheiten):
  - a) aus einzelnen Quellen (z.B. lokale Texturmerkmale)
  - b) durch simultane Auswertung sämtlicher Daten (z.B. mittlere Intensität eines Ortes bei einer Beleuchtungsserie)
- **Ausgabe:** Merkmale/Entscheidungen, (evtl. mit Unsicherheiten)
- **Voraussetzung:**
  - bei a) Sensoren, welche die Gewinnung gleichartiger Merkmale erlauben; Merkmale liegen unabhängig voneinander in den Daten der Sensoren vor
  - bei b) homogene Sensoren
- **Ziele:**
  - Verbesserung der Gewinnung von Merkmalen
  - Zugang zu Merkmalen, die über die Daten verteilt vorliegen

## 1.6.3 Fusion auf Merkmalsebene

- Evtl. Einbeziehung von Informationen aus höheren Abstraktionsebenen
- Korrespondiert zur Fusion auf Sensorebene oder auf zentraler Ebene

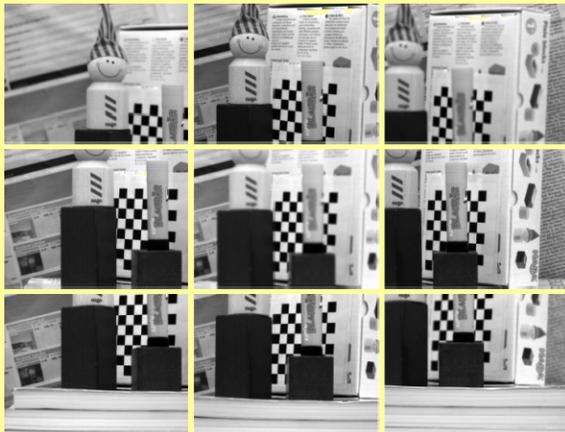


## 1.6.3 Fusion auf Merkmalsebene

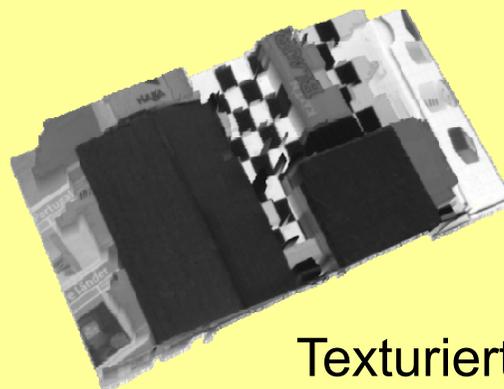
### Beispiel: Tiefenkarten

#### aus Fusion von Depth from Stereo und Depth from Defocus

- Stereo-Serie: Auswertung der Disparität → Tiefenkarte
- Fokus-Serie: Auswertung der Schärfe → Tiefenkarte



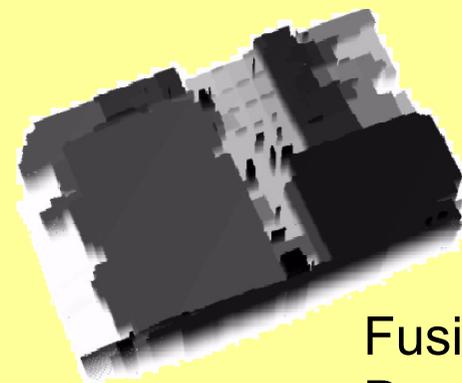
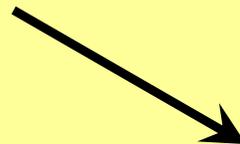
Kombinierte Stereo-  
und Fokusserie



Texturiertes 3D-Modell



nur Depth from Stereo

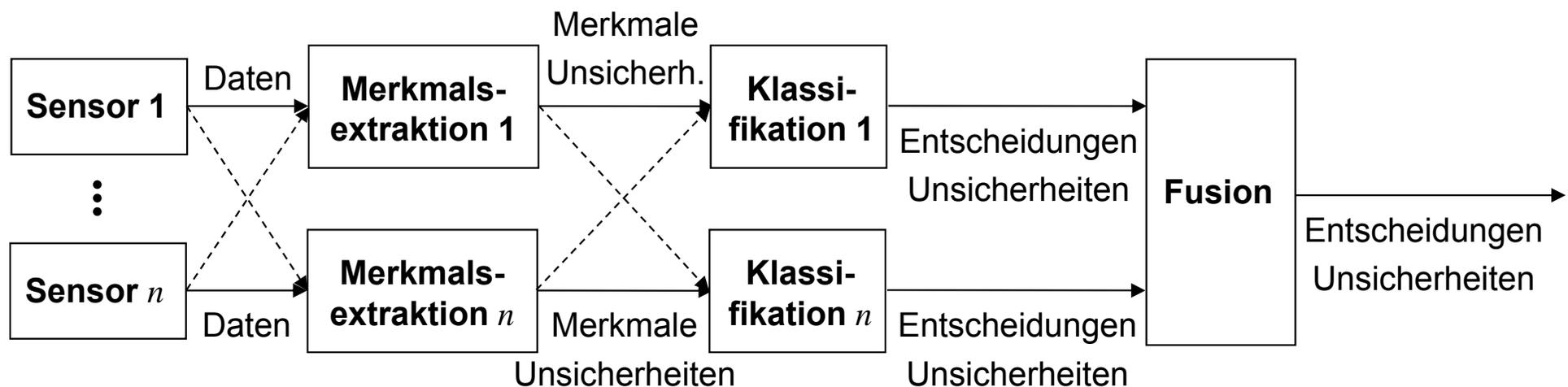


Fusion von  
Depth from Stereo und  
Depth from Defocus



## 1.6.4 Fusion auf Entscheidungsebene

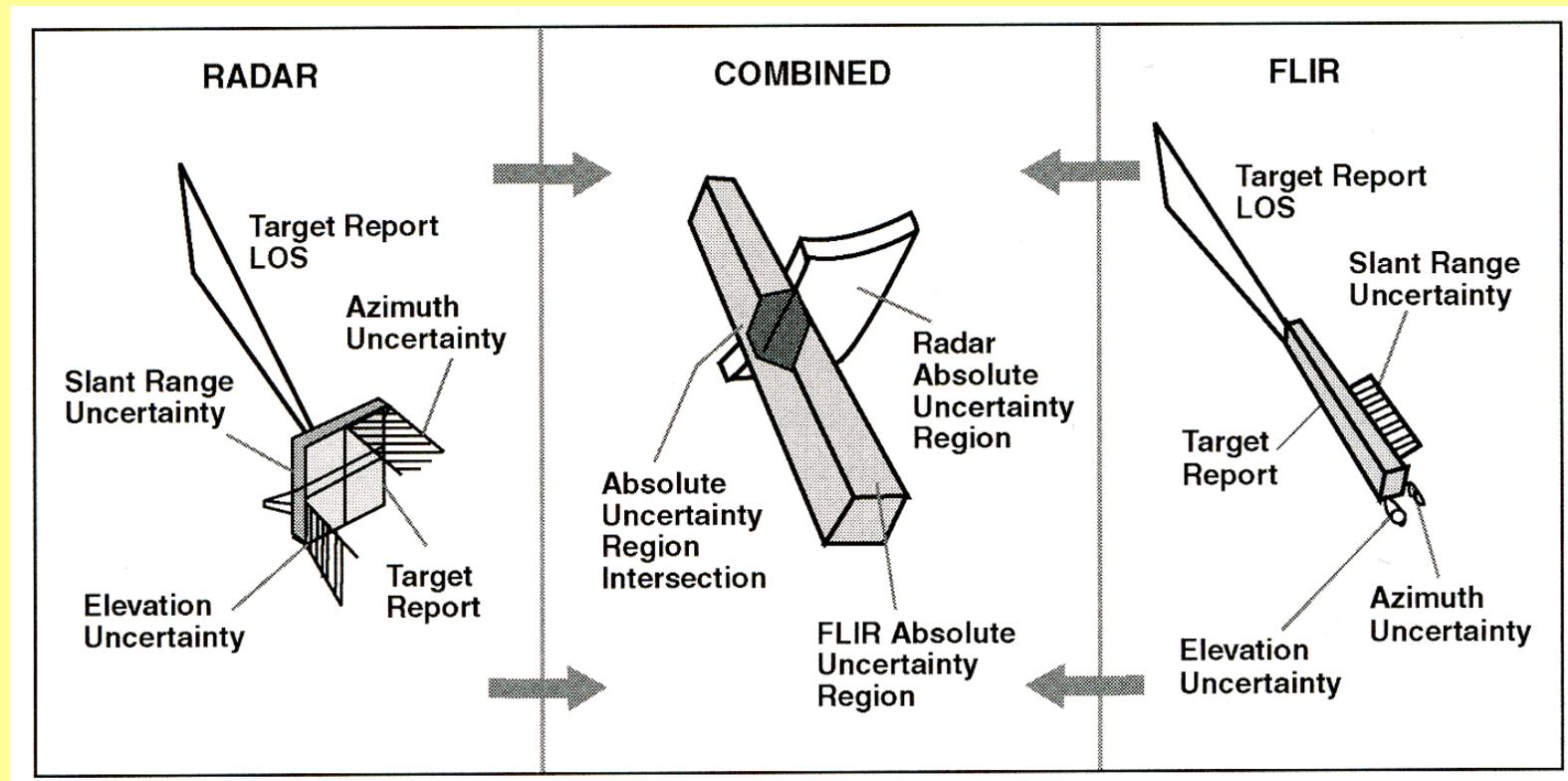
- Merkmalsextraktion und Klassifikation vor Fusion:  
**Hohes Abstraktionsniveau**
- Eingabe: Entscheidungen (evtl. mit Unsicherheiten),  
Ausgabe: Entscheidungen (evtl. mit Unsicherheiten)
- Voraussetzung: **Entscheidungen** können **unabhängig voneinander aus den Daten und Merkmalen der Sensoren** getroffen werden
- **Ziel:** Verbesserte Klassifikation (z.B. bzgl. Zuverlässigkeit), etwa zur Fehlerdetektion oder Objekterkennung
- Korrespondiert zur Fusion auf Sensorebene



## 1.6.4 Fusion auf Entscheidungsebene

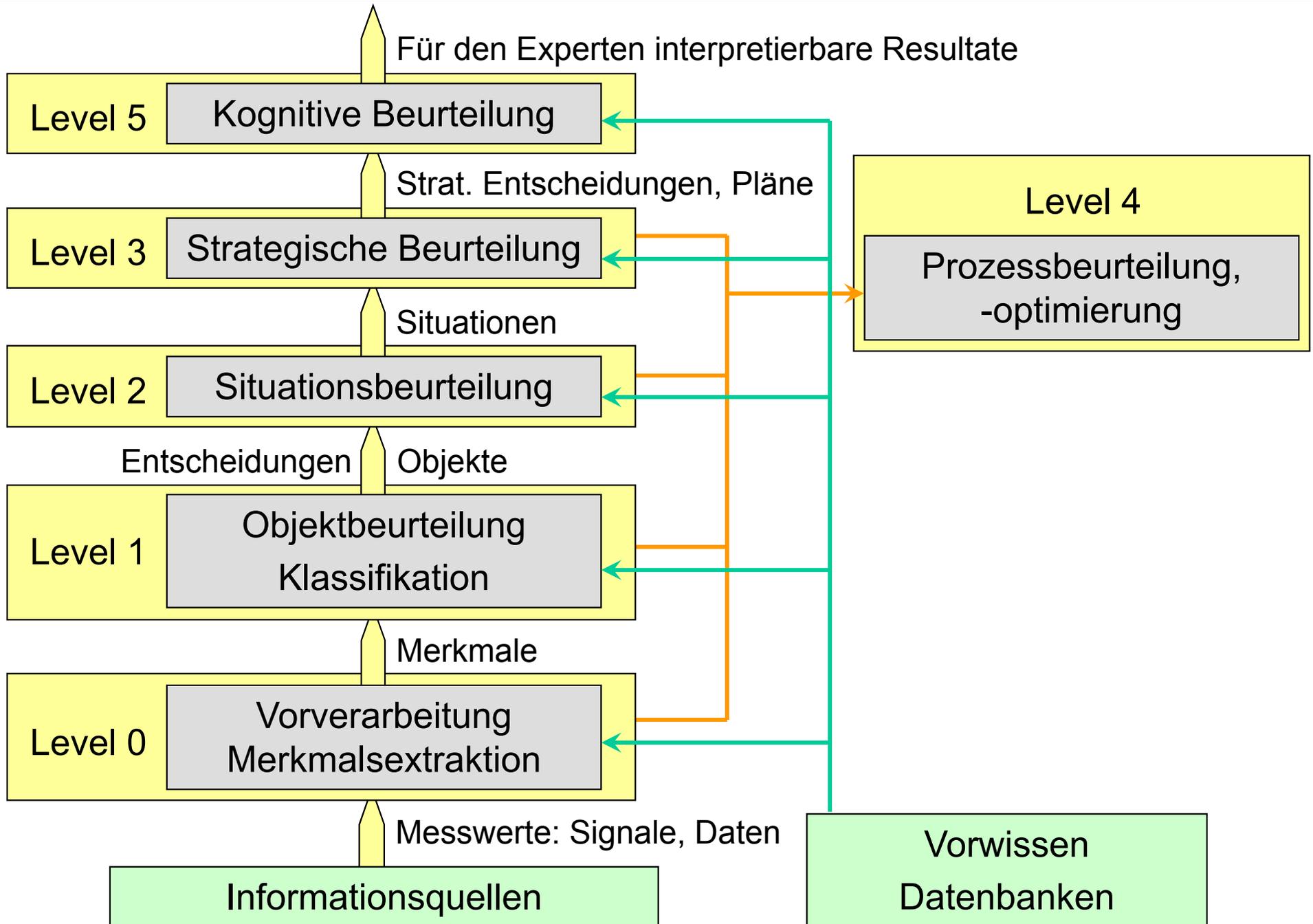
### Beispiel: Fusion von Radar- und FLIR- (forward-looking IR-) Daten

- Jedes Sensorsystem führt die Objektdetektion für sich alleine aus (Merkmalsextraktion und Klassifikation)
- Objekthypothesen (Klassifikationsergebnisse) werden durch Konjunktion fusioniert



Quelle: D. L. Hall, J Llinas: Handbook of Multisensor Data Fusion

# 1.6.5 Funktionales Modell für Abstraktionsebenen



## 1.6.5 Funktionales Modell für Abstraktionsebenen

---

### **JDL-** (Joint Directors of Laboratories-) **Modell** (1986)

- Militärischer Hintergrund
- Vereinheitlichung der Terminologie
- Verallgemeinerung von Fusionsaufgaben

### **Kritik**

- Theoretisches Modell, wirkt konstruiert
- Levels nicht immer vorhanden
- Levels nicht immer eindeutig zuordenbar
- Rein hierarchische Modellierung,  
keine Charakterisierung der verwendeten Methoden

## 1.6.6 Zentralisierte Fusion

---

Synonym: Pre-individual sensor processing fusion, Measurement fusion,  
Fusion auf zentraler Ebene

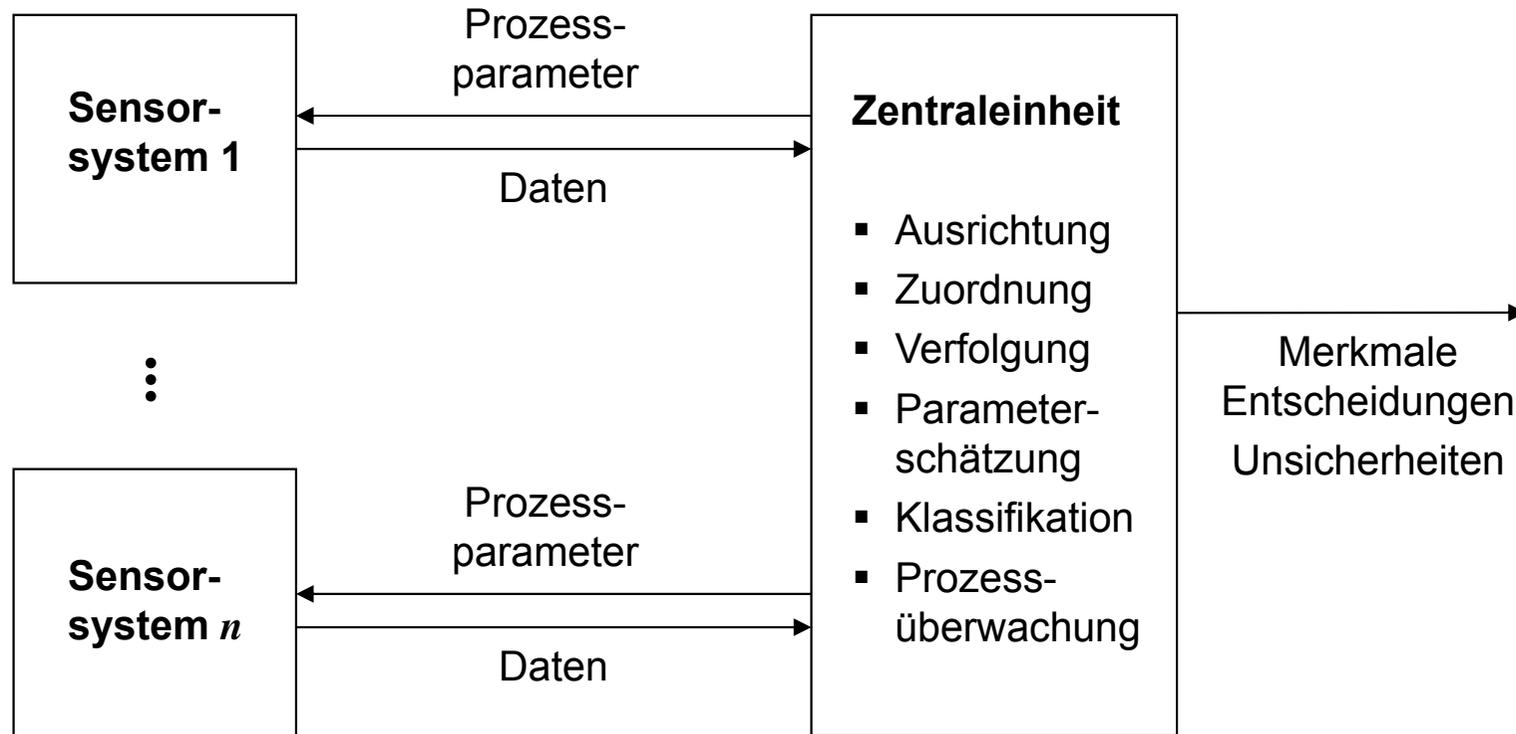
- Sensorsysteme ohne wesentliche eigene Informationsverarbeitung (evtl. Störungsunterdrückung)
- Fusion auf **niedrigem Abstraktionsniveau (Datenfusion)** in der Zentraleinheit

- + Anwendbar, wenn entscheidungsrelevante Nutzinformation über mehrere Sensorsysteme verteilt vorliegt
- + Meist höhere Genauigkeit des Fusionsergebnisses
- Höherer Kommunikationsaufwand, höherer Rechenaufwand in Zentraleinheit
- Komplexerer Aufbau im Vergleich zur verteilten Fusion

Ausgabe der Sensorsysteme:

- Messdaten
- Unsicherheiten

## 1.6.6 Zentralisierte Fusion



## 1.6.7 Verteilte Fusion

---

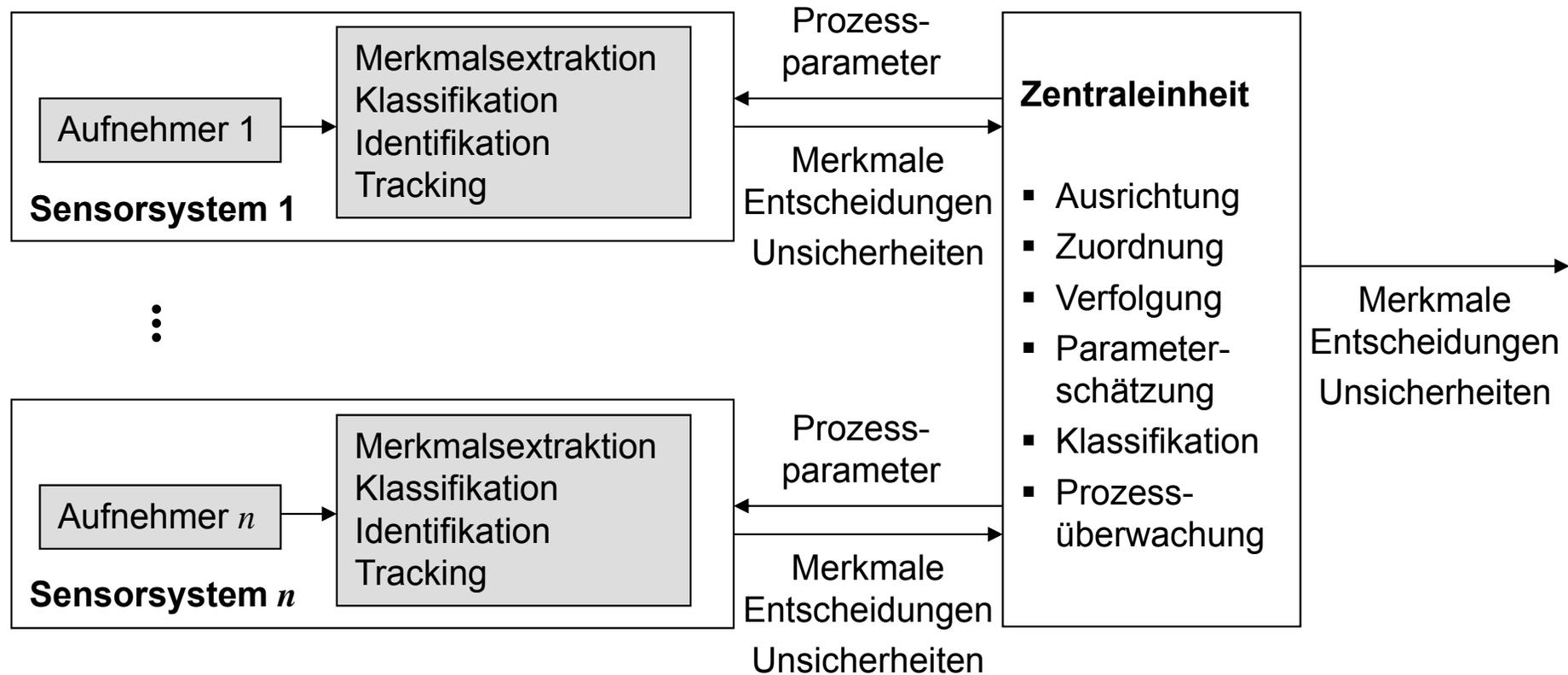
Synonym: Autonome Fusion, Post-individual sensor processing fusion, Track fusion, „Fusion auf Sensorebene (sensor-level fusion)“ (!)

- **Maximale Verarbeitungstiefe** in den Sensorsystemen (Merkmalsextraktion, Klassifikation)
- Fusion auf **höherem Abstraktionsniveau** (Merkmale, Entscheidungen) in der Zentraleinheit
- + Datenauswertung individuell an die Sensordaten anpassbar
- + I.d.R. moderater Kommunikationsaufwand, moderater Rechenaufwand in Zentraleinheit
- + Gute Erweiterbarkeit
- Voraussetzungen:
  - Sensorsysteme werten voneinander unabhängige Objektcharakteristika aus
  - Merkmale liegen nicht über mehrere Sensorsysteme verteilt vor

Ausgabe der Sensorsysteme:

- Merkmale, Entscheidungen
- Unsicherheit des Ergebnisses

## 1.6.7 Verteilte Fusion



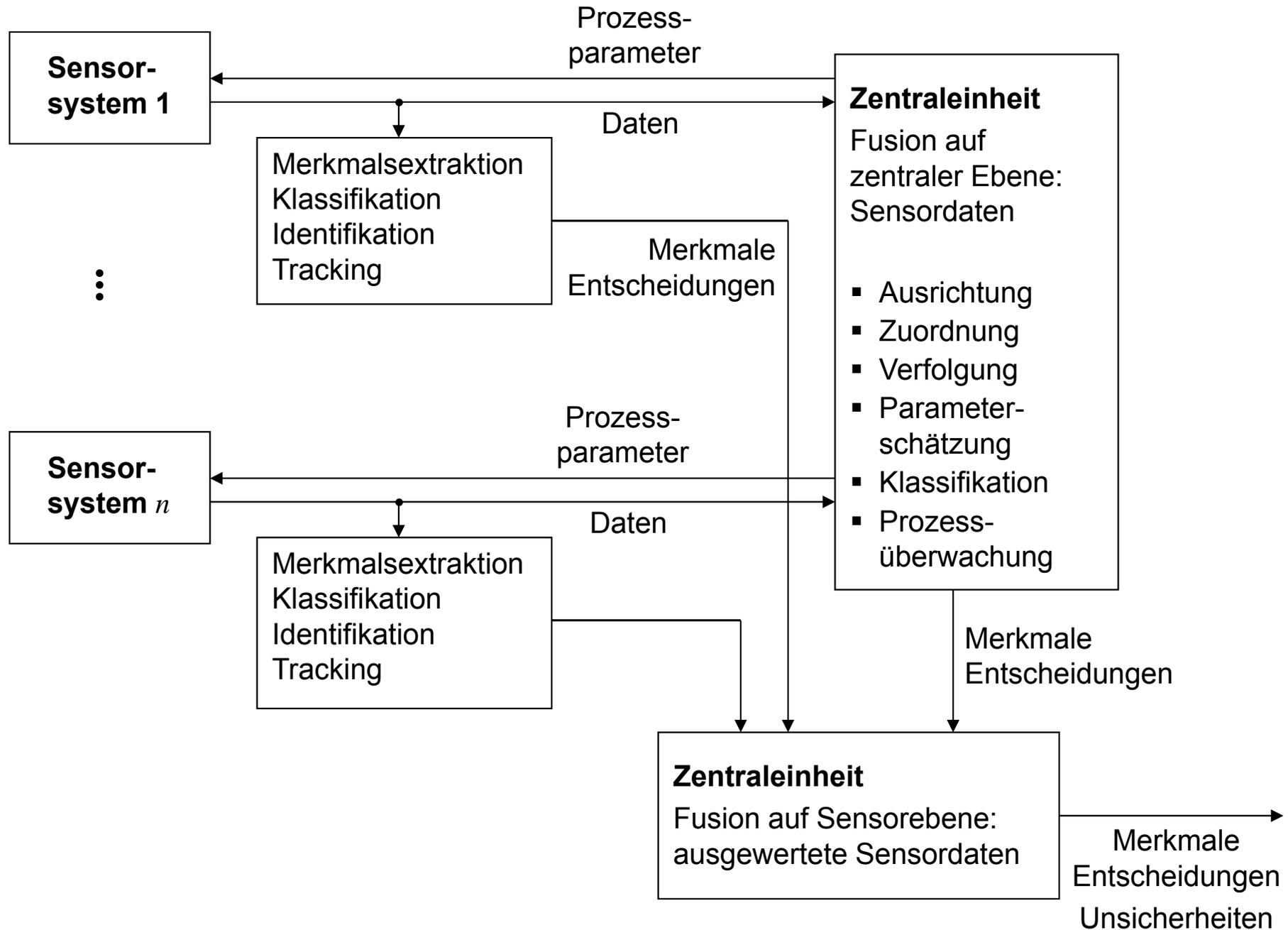
## 1.6.8 Hybride Fusion

---

Kombination der Ansätze der verteilten und zentralisierten Fusion

- Fusion auf **unterschiedlichen Abstraktionsniveaus** möglich
- Ergebnis einer zentralisierten Fusion wird bei einer verteilten Fusion berücksichtigt (oder umgekehrt)
- Auch hierarchische Fusionsstrukturen mit mehreren Fusionszentren auf unterschiedlichen Abstraktionsniveaus denkbar
  
- Kombiniert die Vorzüge der Ansätze der zentralisierten und verteilten Fusion, z.B.
  - + Erweiterbarkeit
  - + Anwendbar, wenn entscheidungsrelevante Merkmale über mehrere Sensorsysteme verteilt vorliegen
- Hohe Komplexität
- Sehr hoher Kommunikationsaufwand, hoher Rechenaufwand in den Zentraleinheiten

## 1.6.8 Hybride Fusion



## 1.6 Architektur

---

### Zusammenfassung:

- Fusionsarchitekturen lassen sich auf unterschiedliche Arten beschreiben:
  - Nach dem **Abstraktionsgrad**, auf dem die Fusion stattfindet:  
Fusion auf Signal-, Daten-, Merkmals-, Entscheidungsebene
  - Nach der **Aufgabenverteilung** zwischen Sensorsystem und Zentraleinheit (dem „Ort“, an dem die Fusion stattfinden):  
Zentralisierte, verteilte, hybride Fusion
- Die Wahl einer geeigneten Fusionsarchitektur hängt u.a. ab von:
  - Aufgabenstellung, Fusionsziel
  - Fähigkeiten der Sensorsysteme und der Zentraleinheit
  - Kapazität der Kommunikationskanäle

## 1.7 Sensorsysteme

---

Einteilung nach **Eingangsignal**, z.B.

- Geometrische Größen (z.B. Länge, Distanz, Winkel, Geschwindigkeit)
- Weitere mechanische Größen (z.B. Gewicht, Druck)
- Zeit (absolut, Differenzen)
- Klimatische Größen (z.B. Temperatur, Feuchtigkeit, Windstärke)
- Optische Größen (z.B. Lichtintensität, Spektrum, Texturen)
- Akustische Größen (z.B. Schalldruck, Frequenz)
- Elektrische Größen (z.B. Spannung, Stromstärke)
- Chemische/biologische Größen (z.B. pH-Wert, Radioaktivität)

## 1.7 Sensorsysteme

---

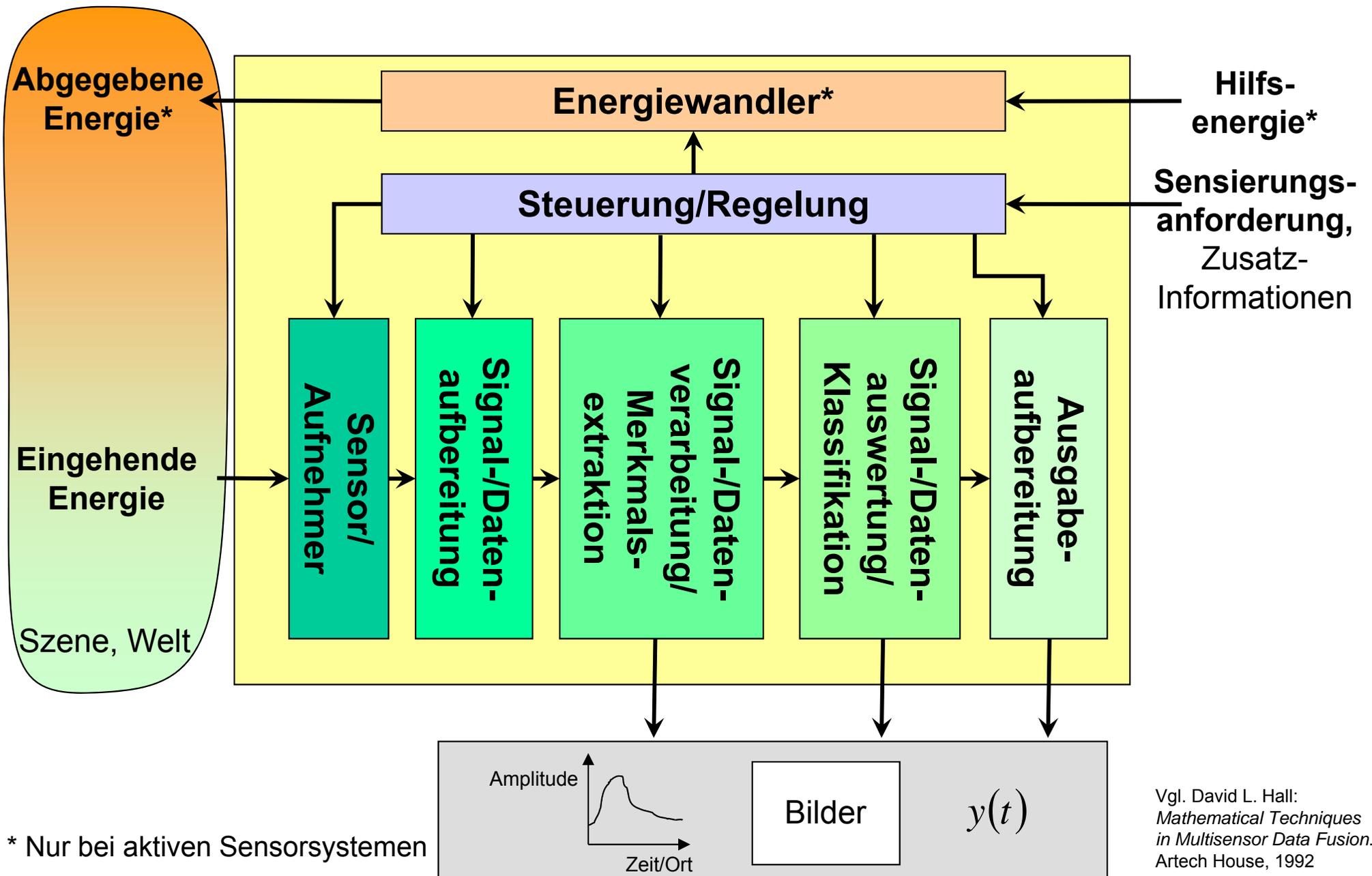
### Einteilung nach **fusionsrelevanten Eigenschaften**

- Wirkmechanismus/Struktur
- Homogene/heterogene Sensoren
- Beschreibung der Unsicherheit
- Zuverlässigkeit
- Kommensurabilität
- Kollokiertheit

### Einteilung nach **weiteren Eigenschaften** (weniger fusionsrelevant), z.B.

- Aktive/passive Sensorsysteme
- Virtuelle Sensorsysteme
- Mathematische Modellierung
- Anwendungsbereiche
- Kosten, Material

# 1.7.1 Struktur von Sensorsystemen



\* Nur bei aktiven Sensorsystemen

Vgl. David L. Hall: *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*. Artech House, 1992

## 1.7.2 Homogene und heterogene Sensorsysteme

---

### Homogene Sensoren/Sensorsysteme

- Identische Sensorprinzipien
- Erfassung der gleichen bzw. von vergleichbaren physikalischen Messgrößen

Bei **homogenen** Sensorsystemen:

- Verarbeitung der Daten meist ohne aufwendige Vorverarbeitung möglich
- Gleiche Störeinflüsse
- Beispiel: Grauwertkameras mit gleicher spektraler Sensorcharakteristik

Bei **heterogenen** Sensorsystemen:

- I.d.R. Vorverarbeitung der Daten (Merkmalsextraktion, Klassifikation) erforderlich, damit Information verknüpfbar wird
- Meist unterschiedliche Störeinflüsse
- Beispiele:
  - Sensorsysteme mit unterschiedlicher Spektralempfindlichkeit
  - Sensorsysteme für unterschiedliche Messgrößen (z.B. Grauwert- und 3D-Daten)

## 1.7.2 Homogene und heterogene Sensorsysteme

Beispiel für homogene Sensorsysteme:

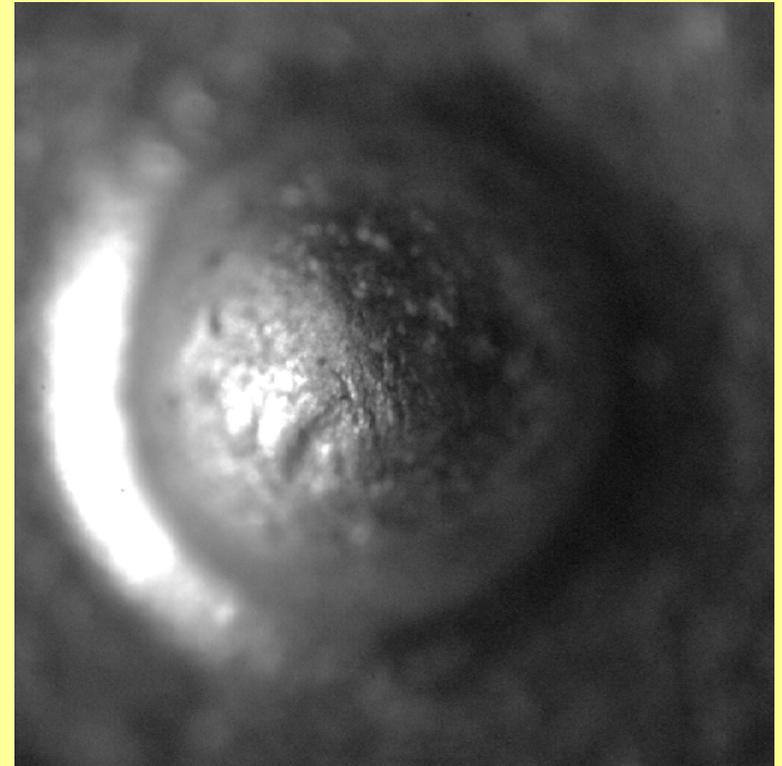
### **Bildserien in der automatischen Sichtprüfung**

- Falls gewünschte Information über Szene nicht in Einzelaufnahme erlangbar ist, z.B. aufgrund
  - Objekteigenschaften (Zugänglichkeit, Reflexionsverhalten)
  - Kameraeigenschaften (Schärfentiefe, Dynamik, Auflösungsvermögen)
- **Variation** der relativen Kameraposition, der Beleuchtung usw., so dass in der resultierenden Bildserie die Szene ausreichend erfasst wird
- **Sonderfälle:** + Bildserien mit derselben Kamera, aber zeitlich sequentiell erfasst: **virtuelle** Sensorsysteme (s.u.)  
+ Orts- und orientierungsfeste Sensorsysteme: **kollokierte** Sensorsysteme (s.u.)

## 1.7.2 Homogene und heterogene Sensorsysteme

Beispiel: **Homogenes Sensorsystem**  
mit lateral ortsfester Kamera

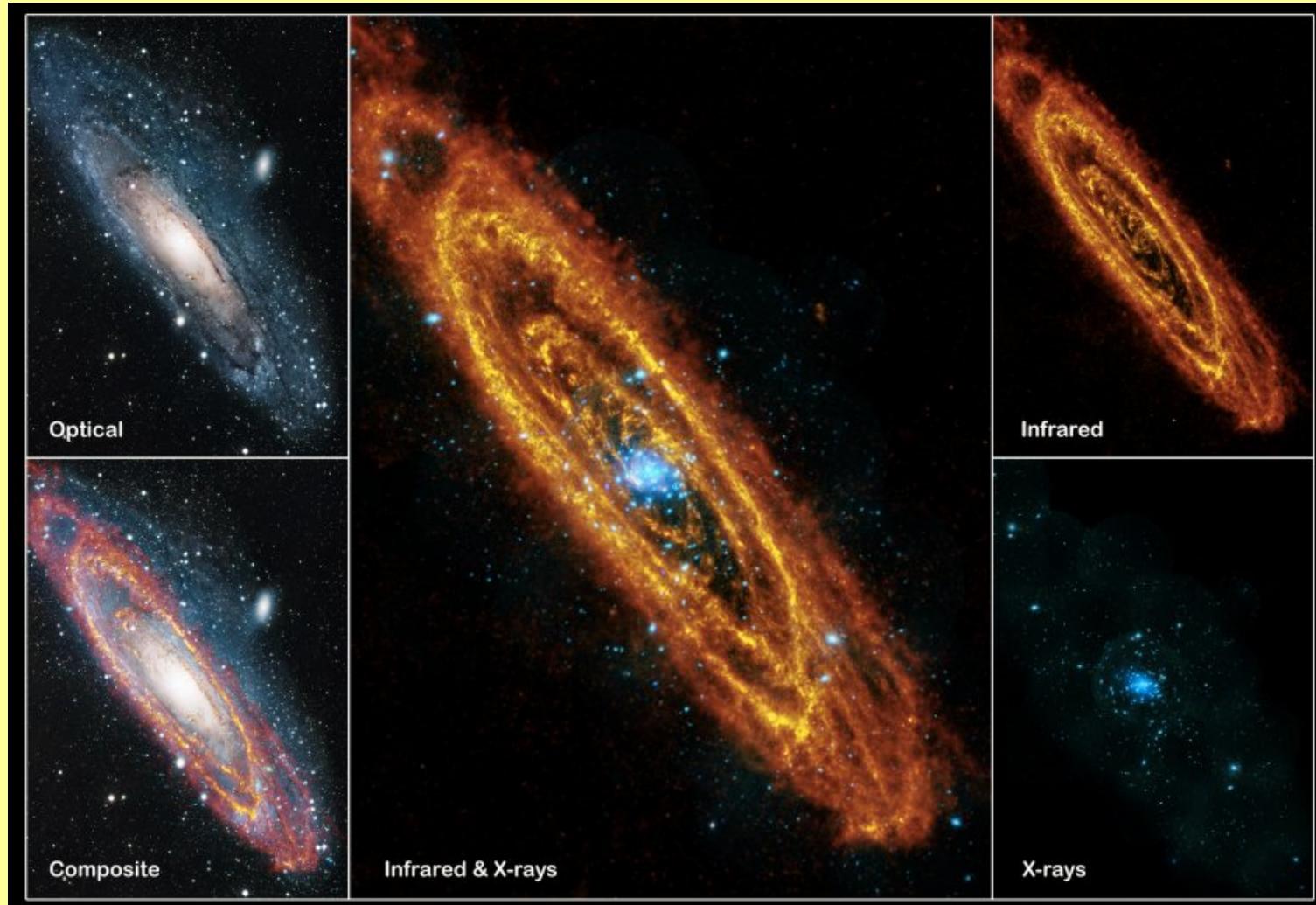
Variation des Aufnahmeabstands



## 1.7.2 Homogene und heterogene Sensorsysteme

### Beispiel: Heterogenes Sensorsystem

Bilddaten in unterschiedlichen Spektralbereichen



Quelle: Spiegel Online/ ESA/ Herschel/ PACS/ SPIRE/ XMM-Newton/ EPIC/ MPE

## 1.7.2 Homogene und heterogene Sensorsysteme

### Beispiel: Homogenes Sensorsystem

- Gleichartige Sensorsysteme (z.B. gleiche spektrale Empfindlichkeit)
- Sensorsysteme nicht ortsfest (bewegte Kamera)



## 1.7.3 Aktive und passive Sensorsysteme

### Aktive Sensorsysteme

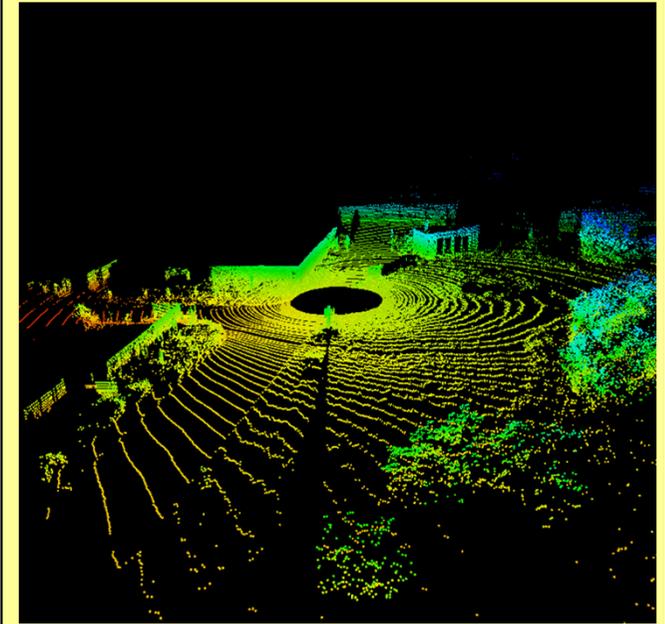
- Hilfsenergie wird vom Sensorsystem geliefert
- Manipulation der Umwelt, um ein physikalisches Phänomen herbeizuführen
- Aktives Modul: Energiewandler
- Tendenziell geringe Genauigkeit erreichbar

### Passive Sensorsysteme

- Keine unerwünschte Beeinflussung der Umwelt („See but not be seen“)
- Tendenziell höhere Genauigkeiten erreichbar

**Anmerkung:** In der elektrischen Messtechnik ist eine andere, nicht kompatible Definition von aktiven/passiven Sensorsystemen gebräuchlich: Aktive Sensorsysteme liefern selbst eine Energie (Spannung, Strom), passive nicht.

### Beispiel: Laser-Scanner



### Beispiel: IR-Kamera



Quelle: ©2004 by FLIR Systems  
www.infracor.com

## 1.7.4 Weitere Charakteristika

---

- **Kommensurabilität**

Gleichdimensionalität

Bilder: Grundsätzlich kommensurable Daten (zweidimensional)

- **Virtuelle Sensoren**

Datenerfassung durch dasselbe Sensorsystem, aber mit mindestens einem variiertem Erfassungsparameter

Beispiel: Grauwertkamera: Mind. unterschiedliche Erfassungszeitpunkte

- **Kollokiertheit**

Datenerfassung mit konstanter relativer Position des Sensorsystems und -ausrichtung sowie konstantem Abbildungsmaßstab:

**Identische Ausschnitte** der Szene

- Beispiele:

- Stationäre Kamera, die mehrere Aufnahmen macht

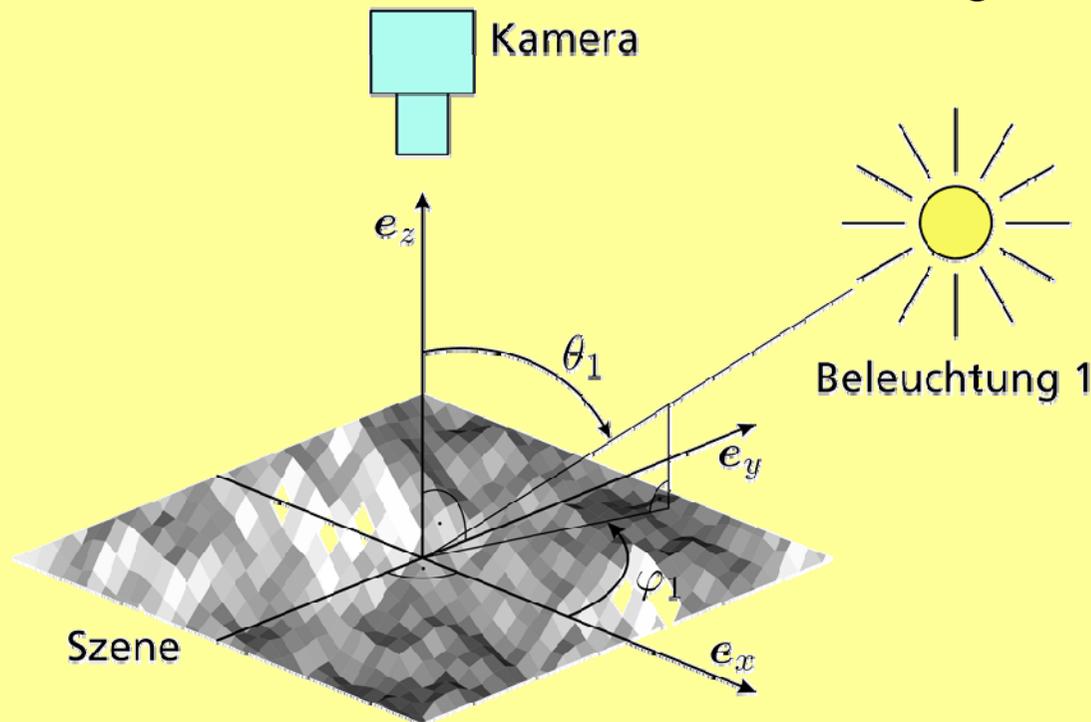
- RGB-Kamera: Unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit

- Falls Sensorsysteme nicht kollokiert sind: Registrierung erforderlich  
Identifikation von Merkmalen und Ausrichtung mittels geometrischer Transformationen (siehe Kap. Registrierung)

## 1.7 Sensorsysteme

### Beispiel: Erfassung einer Beleuchtungsserie

- Ortsfeste Kamera, konstante Beobachtungsparameter
- Variierte Beleuchtung
- Aktive\*, kommensurable, virtuelle, homogene, kollokierte Sensorsysteme



\* wenn die Beleuchtung als Teil des Sensorsystems betrachtet wird: aktiv;  
wenn die Kamera für sich alleine betrachtet wird: passiv

# 1.7 Sensorsysteme

## Beispiele: Diverse Sensorsysteme und Kombinationen

	homogen	aktiv	kommen- surabel	virtuell	kollokiert
Stereokamera paar					
Stereokamera paar kombiniert mit Beleuchtung					
Farbkamera mit R-, G-, B-Kanal					
Laserscanner (Abtastung der Umgebung mit einem rotierenden Laserstrahl)					
Sensorsysteme bestehend aus Radarsensorik (flächige Messung) und IR-Kamera					
Sensorsysteme für die Zugortung					
Motordiagnostik (z.B. Körperschall, Lambda-Sonde, Luftmassenmessung, Temperatur etc.)					
Sonar (mehrere Erfassungen, z.B. U-Boot-Ortung von einem Schiff aus)					
Luftbilder: Eine Kamera erzeugt mehrere Bilder					
Luftbilder: Synthetic Aperture Radar (SAR) erzeugt mehrere Bilder					
Erfassung einer Beleuchtungsserie mit ortsfester Kamera					
Menschliche Wahrnehmung					

© 2015/16 Fraunhofer IOSB / LS Interaktive Echtzeitsysteme, KIT, alle Rechte einschließlich Kopier- und Weitergaberechte bei uns.

- Lawrence A. Klein: *Sensor and Data Fusion – A Tool for Information Assessment and Decision Making*. SPIE Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2004.
- David L. Hall: *Mathematical Techniques in Multisensor Data Fusion*. 2. Aufl., Artech House, 2004.
- David L. Hall, James Llinas (Hrsg.): *Handbook of Multisensor Data Fusion*. CRC Press, 2001.
- Belur V. Dasarathy (Hrsg.): *Decision Fusion*. IEEE Computer Society Press, 1994.
- Yunmin Zhu: *Multisensor Decision and Estimation Fusion*. Kluwer Academic Publishers, 2003.
- M. Heizmann, Fernando Puente León: *Bildfusion*. Informationsfusion in der Mess- und Sensortechnik, Universitätsverlag Karlsruhe, 2006.

Anmerkung: Literatur zu Informationsfusion ist häufig durch Fokussierung auf Anwendungen in der Fernerkundung und Aufklärung geprägt. Die dargestellten Methodiken sind dennoch meist universell anwendbar.