

# Einführung in die Informationsfusion

Dr.-Ing. Michael Heizmann

WS 2013/14



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)
- Schwerpunkte: Bildfusion, Informationsfusion, Einsatz in Automatisierungstechnik und Aufklärung, effiziente Implementierung
- Kontakt: [Michael.Heizmann@iosb.fraunhofer.de](mailto:Michael.Heizmann@iosb.fraunhofer.de), IOSB-Gebäude, Fraunhoferstraße 1, Sprechstunde nach Vereinbarung

## Hintergrund/Vorwissen der Teilnehmer

### ■ Studiengänge

Informatik	Rest
Informationswirtschaft	
Elektrotechnik	1
Maschinenbau	
Mathematik	
Geodäsie und Geoinformatik	
Diplom	10 %
Master	90 %

### ■ Vertiefungsrichtungen

Prozessautomatisierung (VF7)	5 %
Robotik und Automation (VF11)	15 %
Anthropomatik (VF13)	40 %
Kognitive Systeme (VF14)	40 %

### ■ Prüfung geplant als

Vertiefungsfach	60 %
Einzelprüfung/Atomares Modul	40 %

## Hintergrund/Vorwissen der Teilnehmer

### ■ Fachsemester

$\leq 4$	10 %
5-6	5 %
7-8	10 %
$> 8$	75 %

### ■ Bereits/momentan besuchte Veranstaltungen zum Thema

Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung (Beyerer)	20 %
Mustererkennung (Beyerer)	40 %
Stochastische Informationsverarbeitung (Hanebeck)	10 %
Informationsverarbeitung in Sensornetzwerken (Hanebeck)	15 %
...	

### ■ Erasmus-Studierende      0



## Prüfbarkeit in der Fakultät für Informatik:

Die Vorlesung »Einführung in die Informationsfusion« (2 SWS, 3 LP) ist im Diplom- und im Master-Studiengang in diesen Modulen prüfbar:

- VF7: Prozessautomatisierung
- VF11: Robotik und Automation
- VF12: Computergraphik (Master-Studiengang)
- VF13: Anthropomatik
- VF14: Kognitive Systeme

Die Kombination mit den Veranstaltungen des Lehrstuhls für Interaktive Echtzeitsysteme:

- Automatische Sichtprüfung und Bildverarbeitung (4 SWS, 6 LP)
  - Mustererkennung (2 SWS, 3 LP, Sommersemester)
  - Seminar Bildauswertung und -fusion (2 SWS, 3 LP, Sommersemester)
- zu einem Vertiefungsfach (Diplom:  $\geq 8$  SWS, Master:  $\geq 15$  LP) ist möglich und thematisch sinnvoll.

## 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)

- Kurz vor der Vorlesung: Vorschau (z.B. ohne Lösungen zu Aufgaben)
- Kurz nach der Vorlesung: Aktualisiert, mit Lösungen

## 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

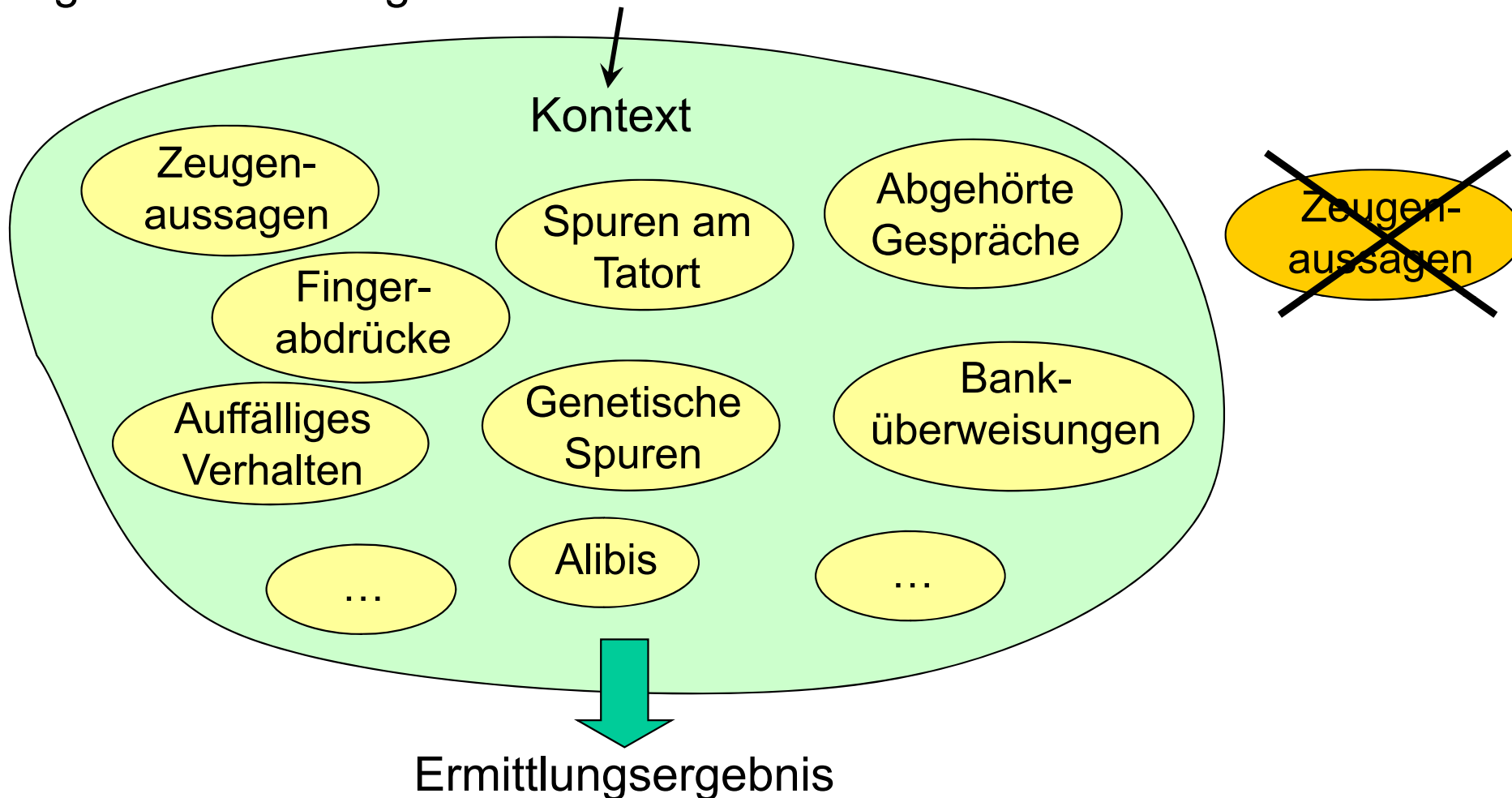
Aufgaben, Interaktion

## Ihre Erwartungen/Wünsche

	Zustimmung	Ablehnung
▪ Überblick, (allg.) Einführung, Motivation	IIIIII	
▪ Beispiele (mit Zahlen), reale Anwendungen, Praxis	IIIIIIIIII	
▪ Theorie, Ansätze, Verfahren	III	I
▪ Nicht zu viele Formeln	I	
▪ Algorithmen, Techniken	II	
▪ Verbindungen zu Maschinellern Lernen	II	
▪ Herausforderungen, Schwierigkeiten der IF	I	
▪ Verbindungen zu Mustererkennung	II	
▪ Hausaufgaben (nicht zu viele, besprochen) und Übungen	IIIIIIII	
▪ Programmieraufgaben	I	
▪ Papers zum Lesen (freiwillig)	II	
▪ Mehr als „nur“ Bildverarbeitung	I	
▪ Zusammenführung heterogener Informationsquellen	I	

## Beispiel: Kriminalistische Ermittlung

- Aufgabe: Aufklärung eines Falles



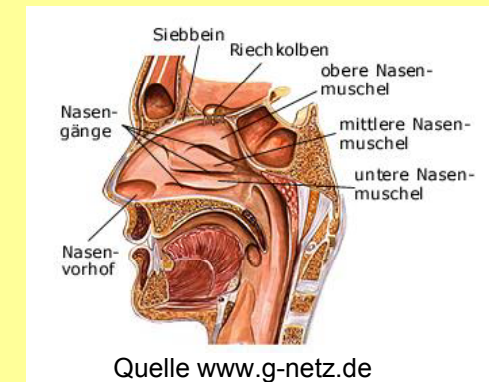
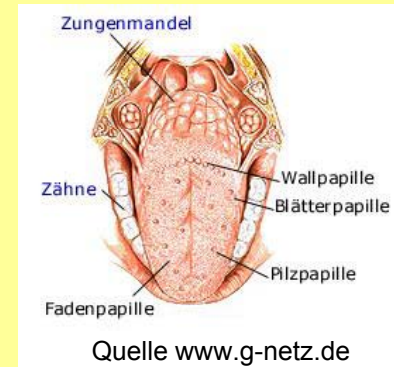
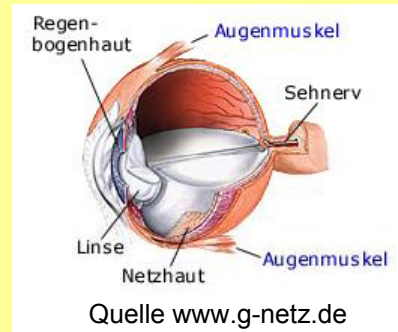
- Im Kontext **relevante Information** aus **allen Quellen** soll **erschöpfend** ausgewertet werden

# 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

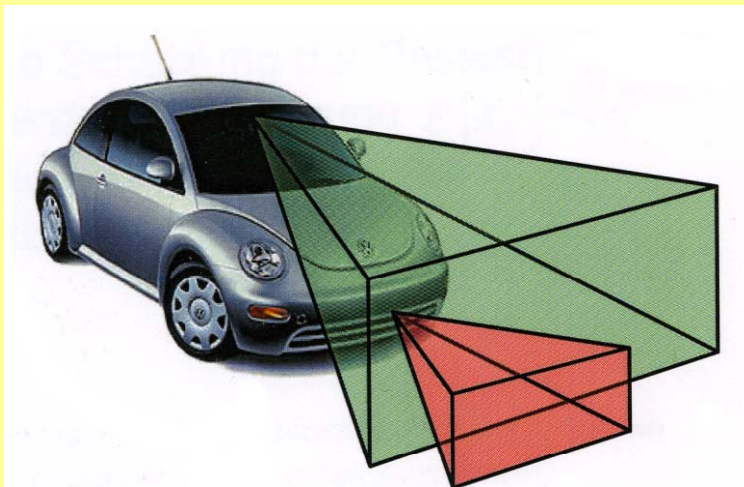
- Höhere Fahrsicherheit auch bei steigendem Verkehrsaufkommen
- Unterstützung des Fahrers

### Nachtsicht-Assistent

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



Quelle: Mercedes-Benz



Quelle: Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH)

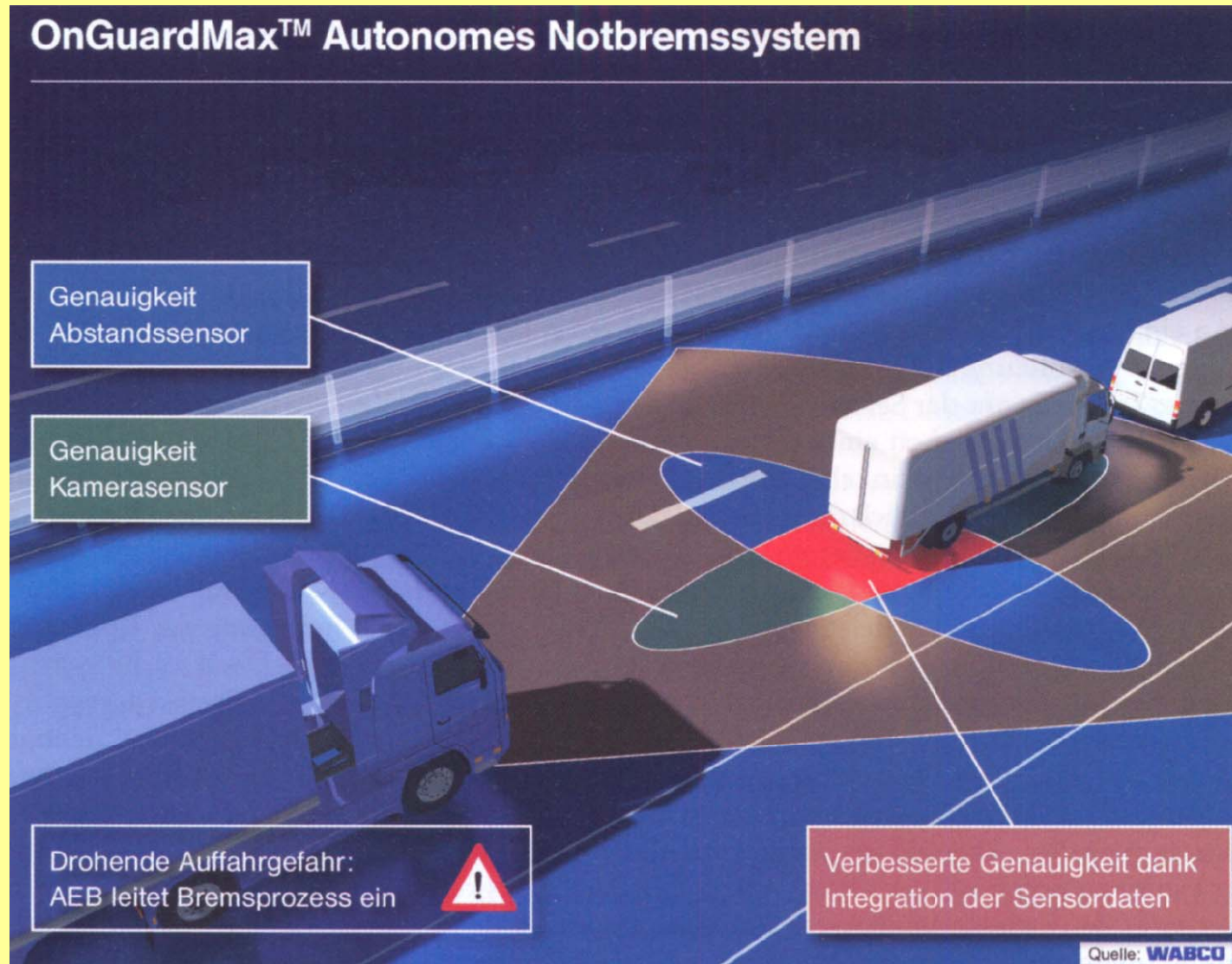
### Abstandsregelung (ACC), Notbremse

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



## Beispiel: Notbremssystem für Lkw

- Gezielte Nutzung der Vorteile unterschiedlicher Sensoren



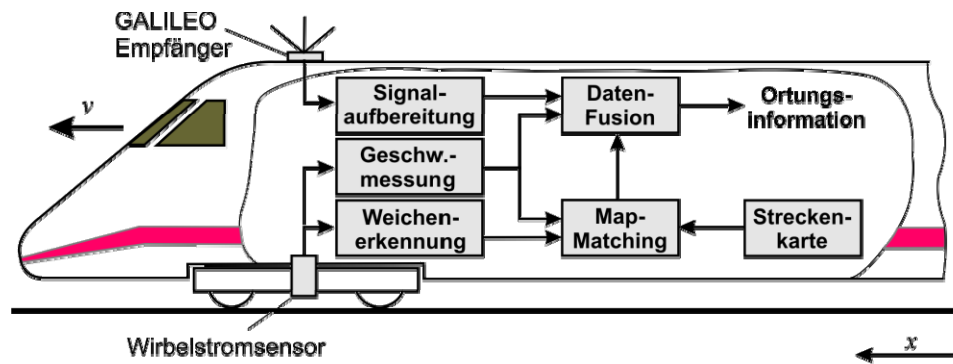
Quelle: Technology Review

## Beispiel: Ortung von Schienenfahrzeugen

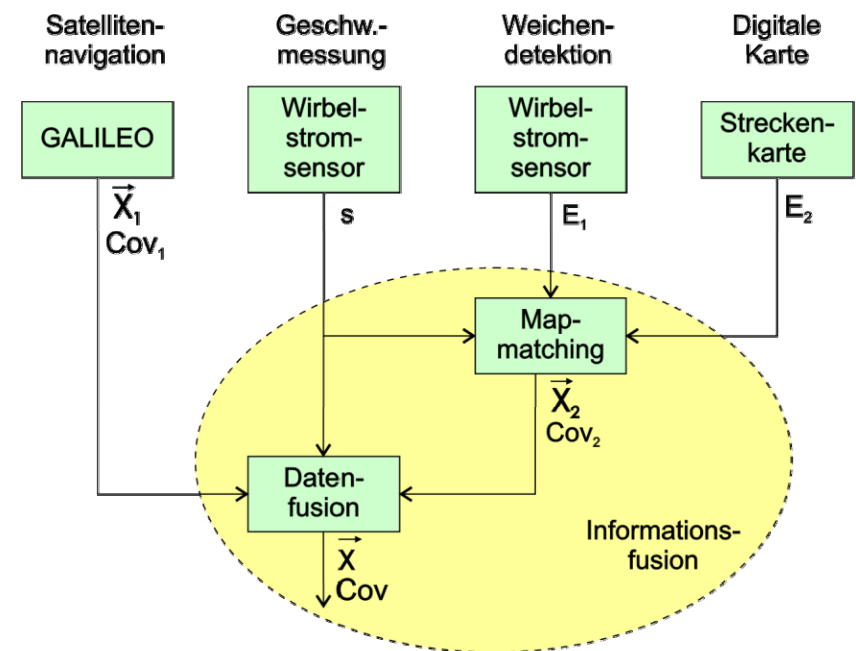
- Steigerung der Streckenkapazität durch geringere Blockabstände
- Genaue Ortung erforderlich: Fahrzeuggebunden

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**

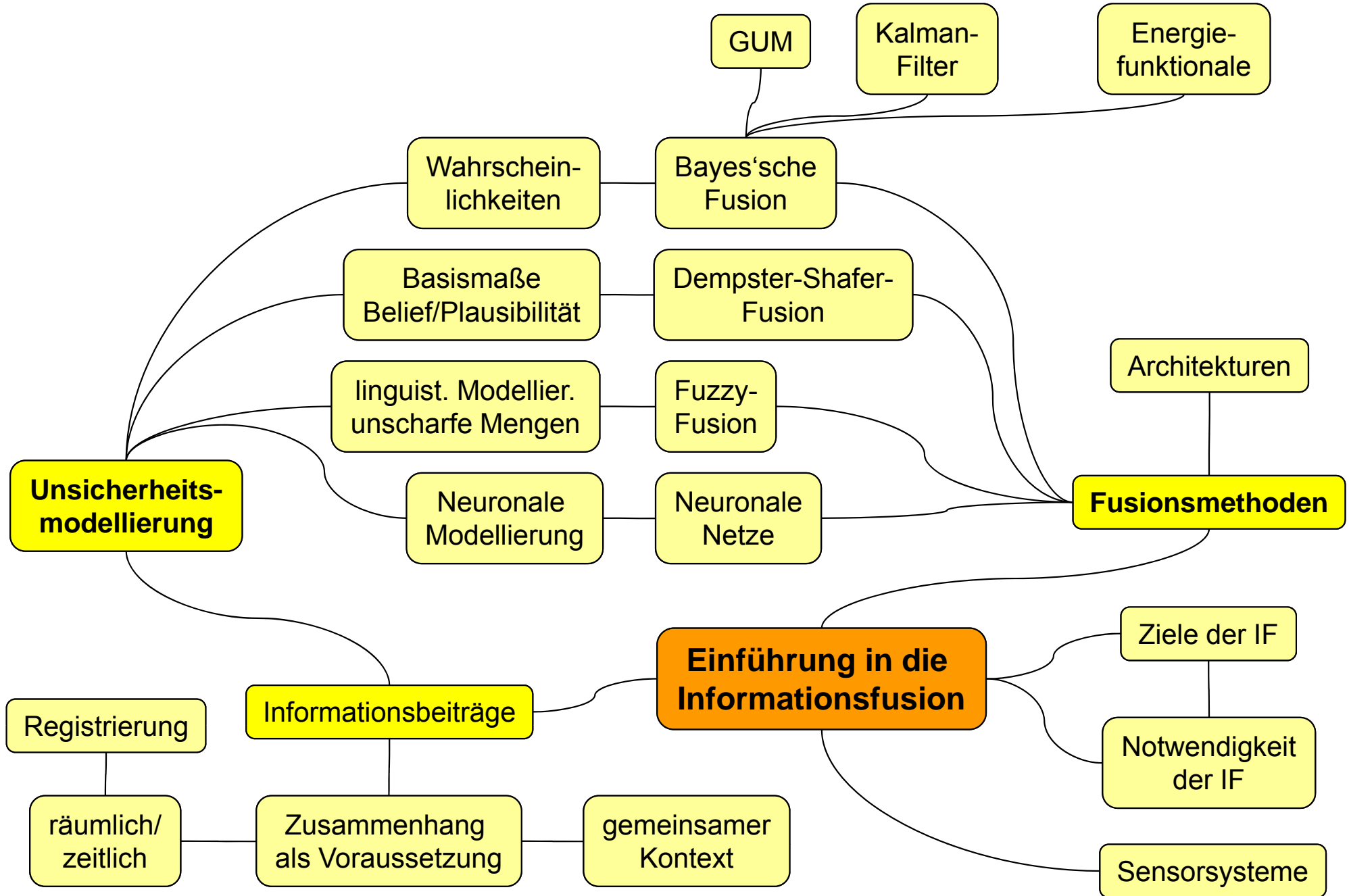
- Struktur
- Lernmethoden
- Bewertung

## 6. Registrierung

- Geometrische Transformationen
- Lineare Registrierung
- Merkmalsbasierte Registrierung

## 7. Energiefunktionale

- Formulierung
- Bayes'sche Interpretation
- Energieminimierung



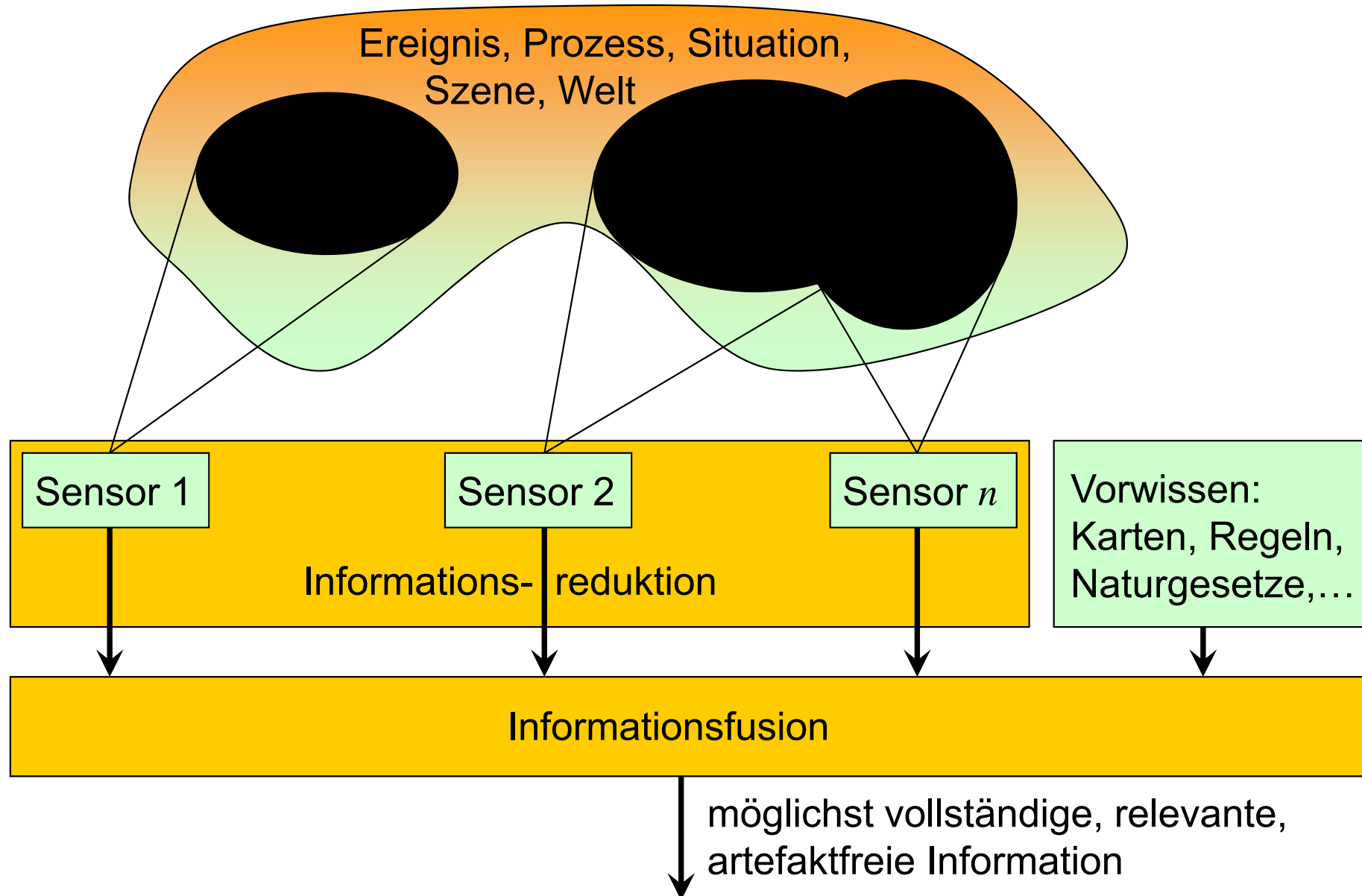
# 1. Einleitung

## 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>

© 2013 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

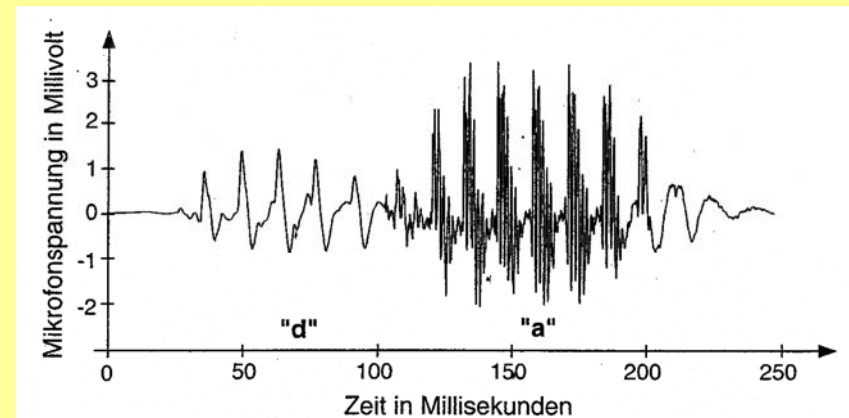
Beispiel: gesprochenes Wort „da“

→ Druck-Zeit-Funktion

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

→ Spannungs-Zeit-Funktion

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



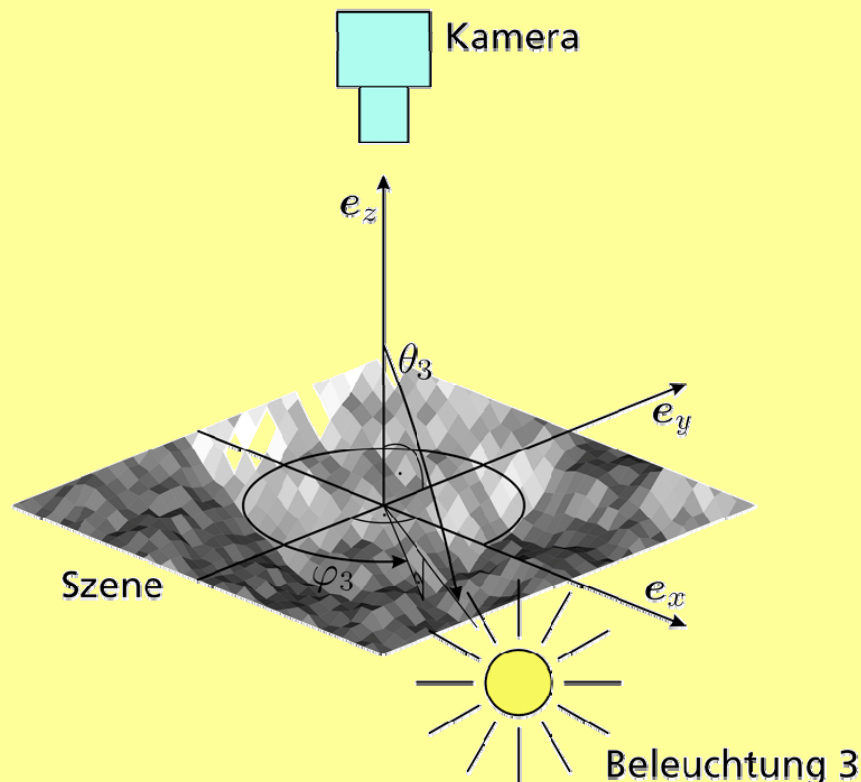
Quelle: Bernd Girod: Einführung in die Systemtheorie

## 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

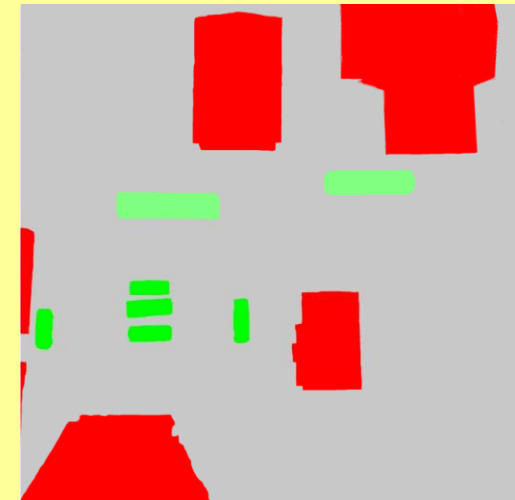
### Symbolische Information:

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

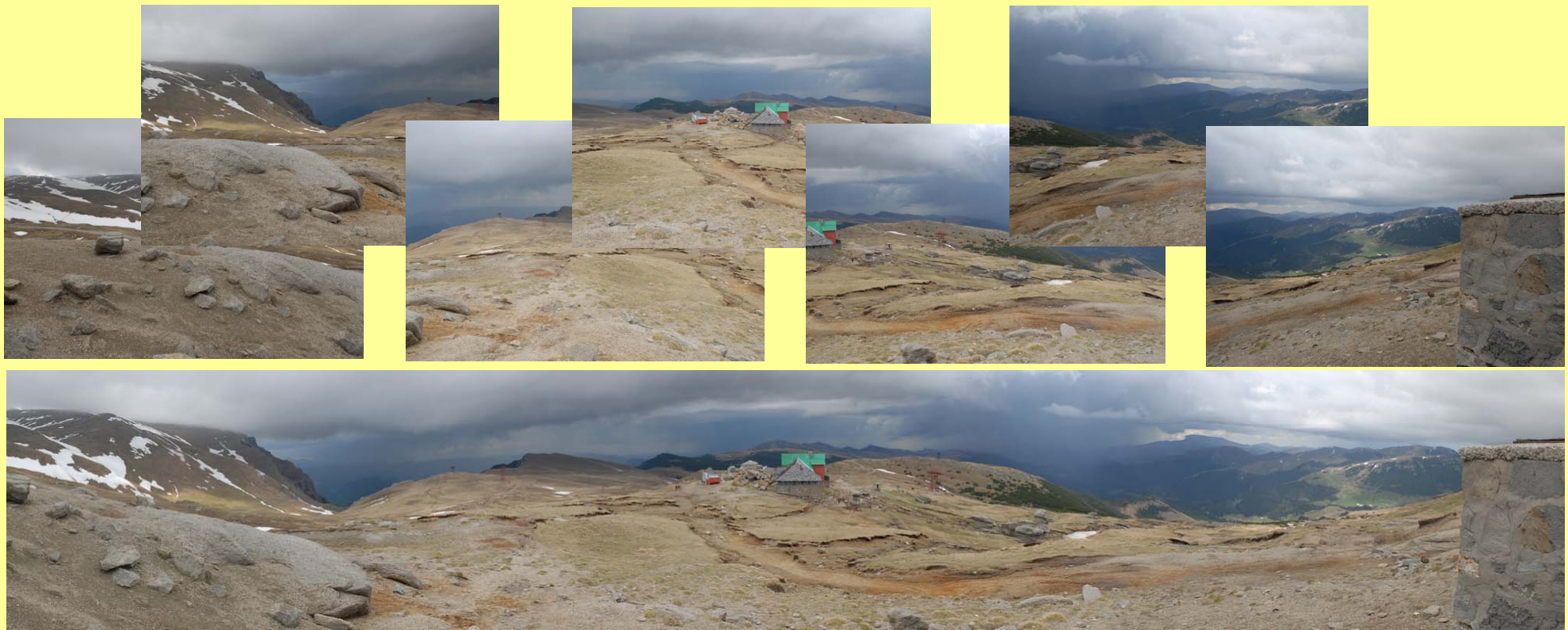
$D_1, D_2 = \mathbb{R} \times \mathbb{R}$

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

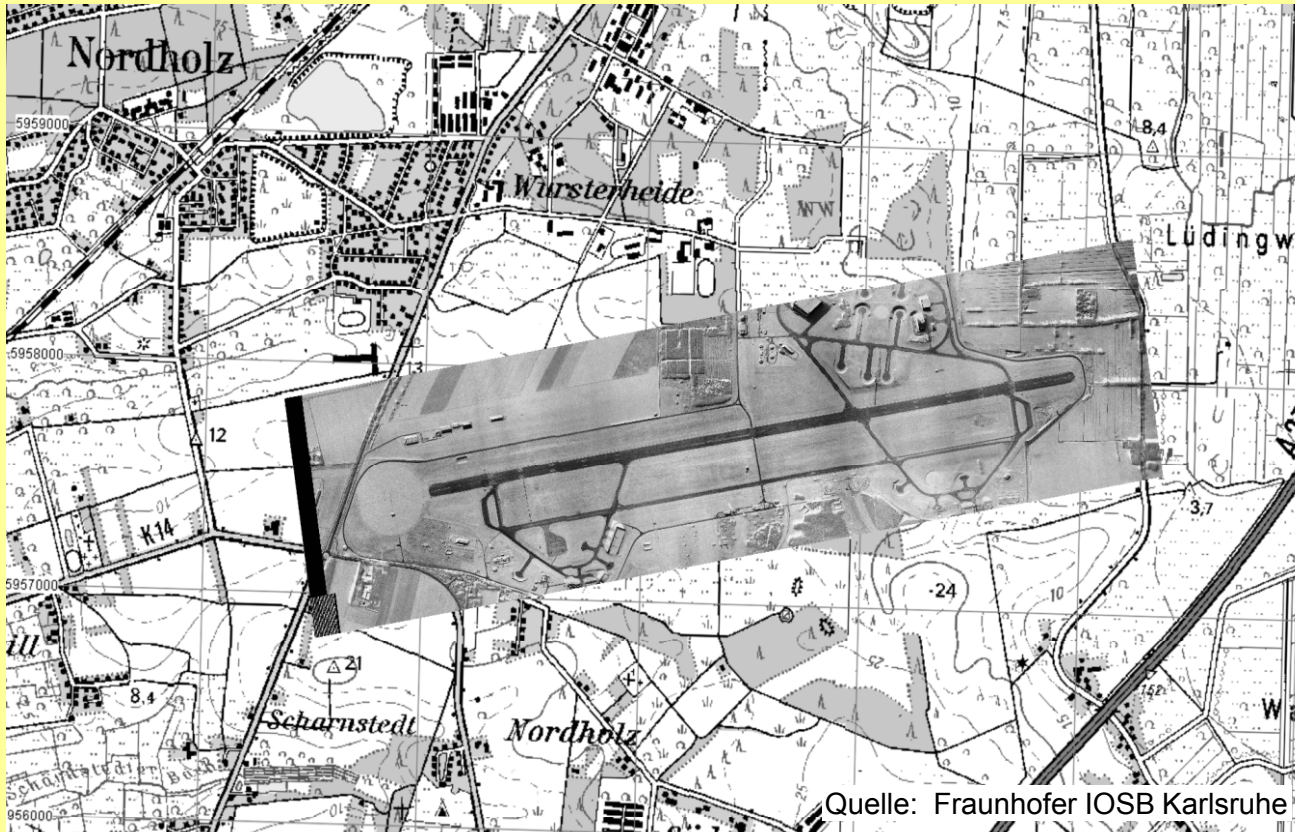
$D_1, D_2$  kompatibel       $W_1, W_2$  unterschiedlich

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:  $D_1 \cap D_2 = \emptyset \rightarrow$  Fusion so  
nicht möglich

$W_1 = W_2$       Symbole



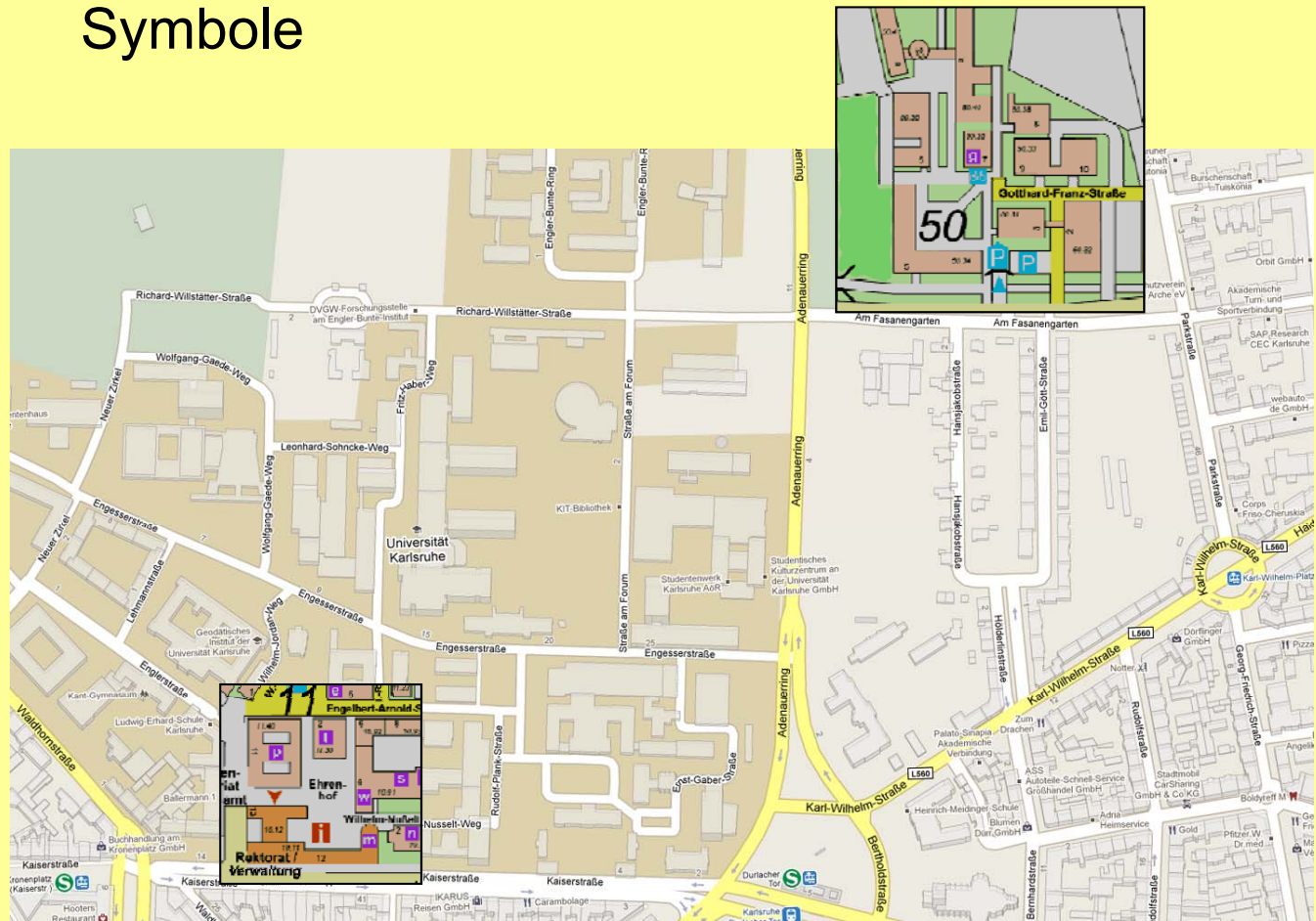
## 1.3 Grundlage: Gemeinsamer Kontext

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

Beispiel: Karte-Karte-Referenzierung

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

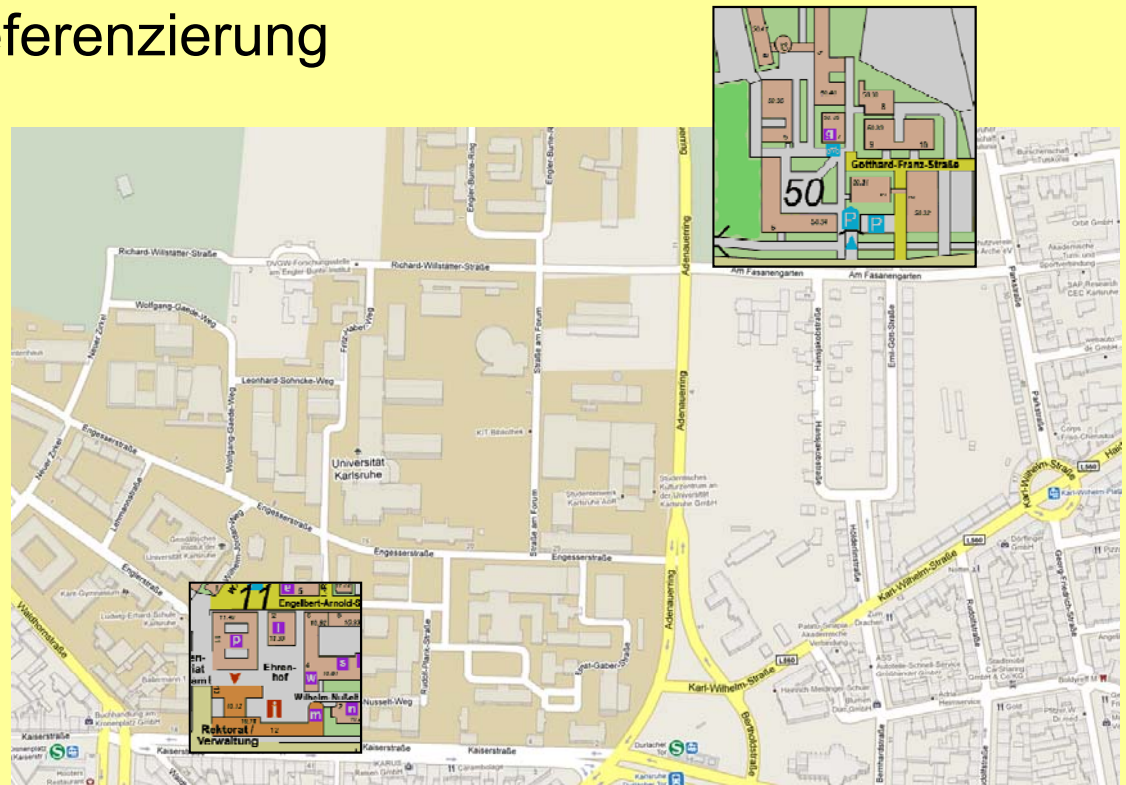


# 1.3 Grundlage: Unsicherheitsbehaftete Information

## Gegenbeispiel: Karte-Karte-Referenzierung

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

Aber: Widersprüche zu „Hintergrundkarte“ möglich



Quelle: maps.google.com

## 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



### 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.

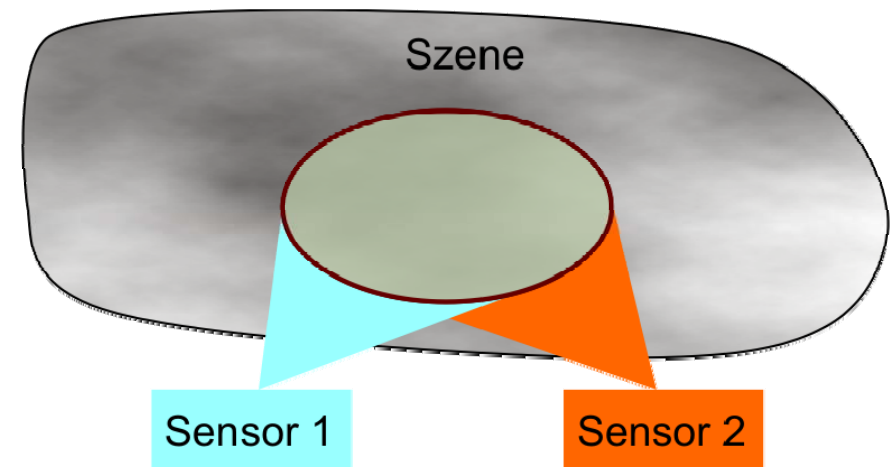
Grundsätzliche Frage:

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

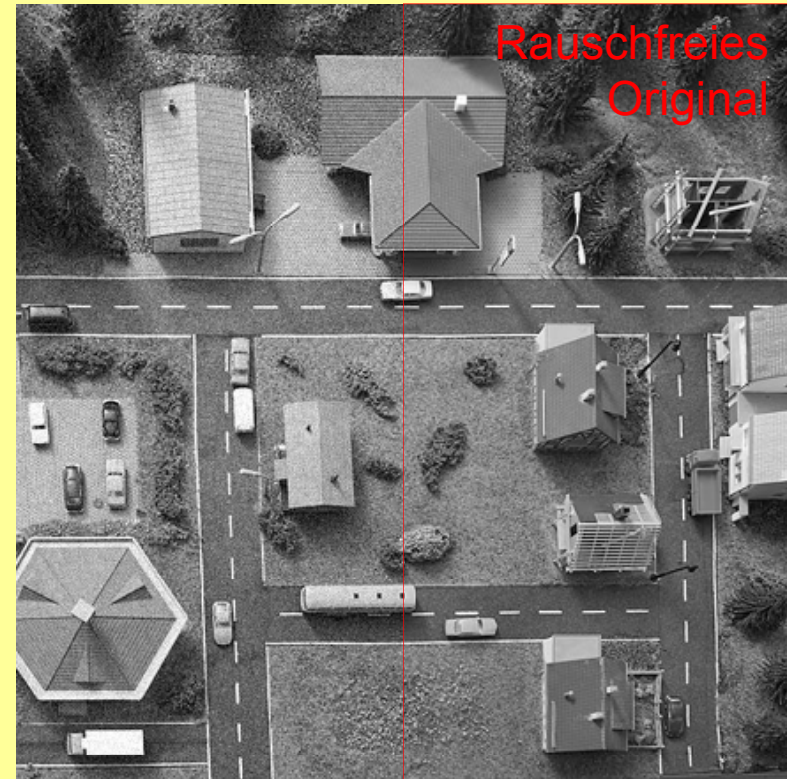


## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- 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

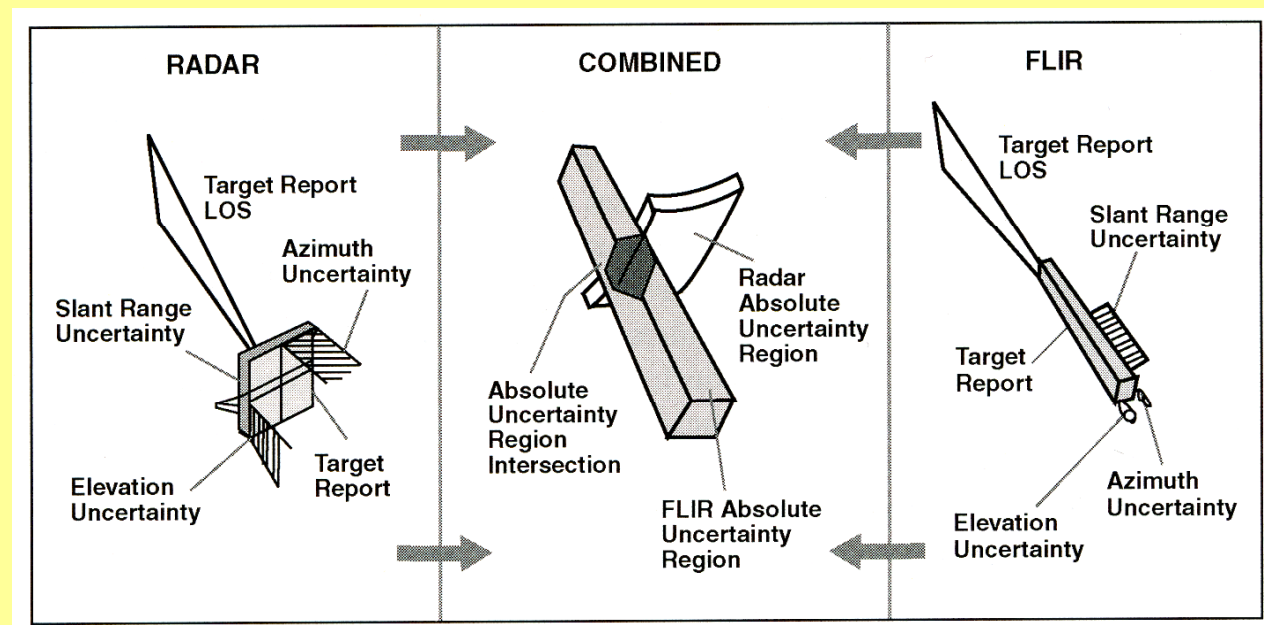
### Redundante/konkurrierende Information:

- 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



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

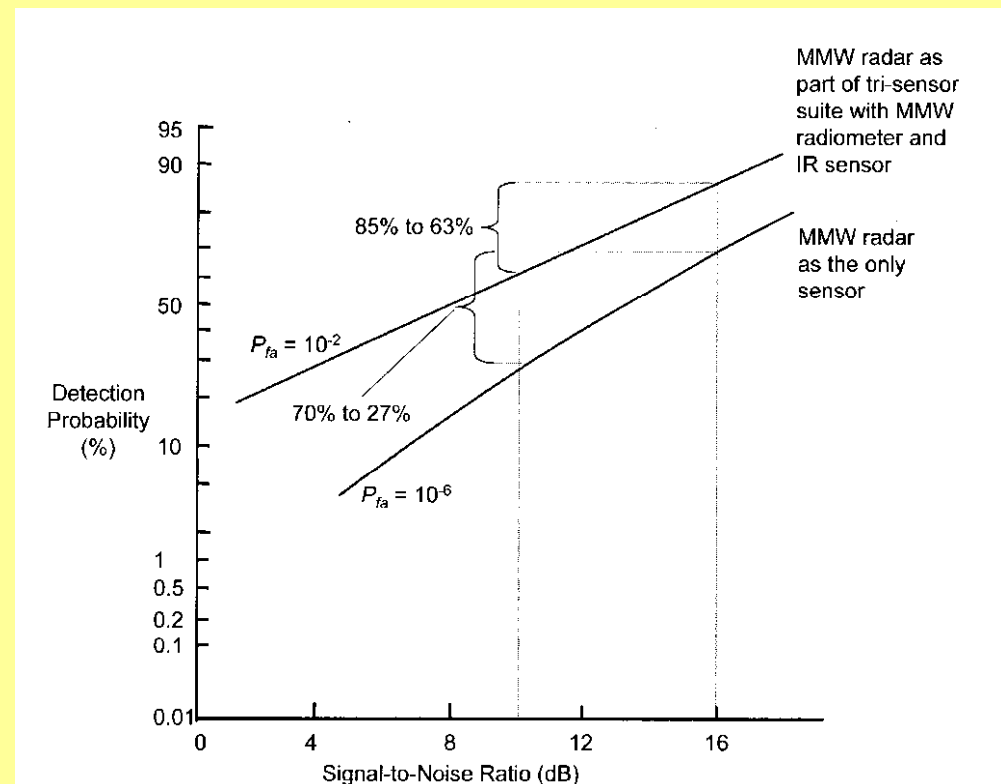
## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

### 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%.

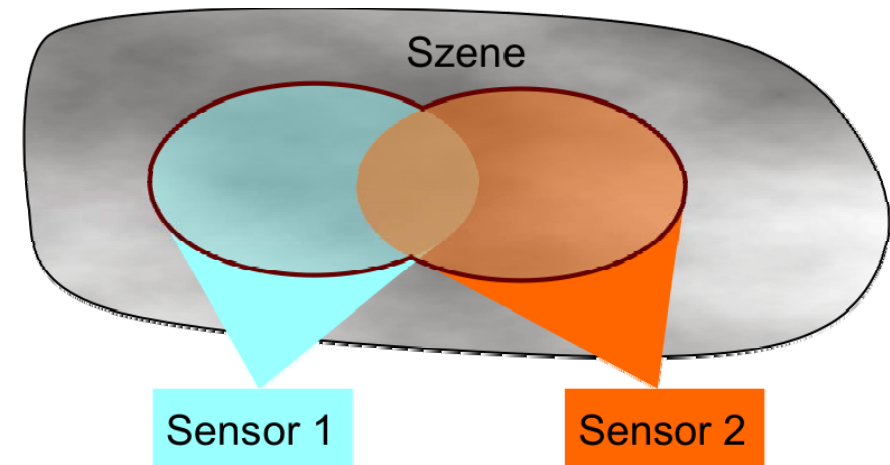


Quelle: L. A. Klein: Sensor and Data Fusion  
MMW: millimeter-wave

## 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

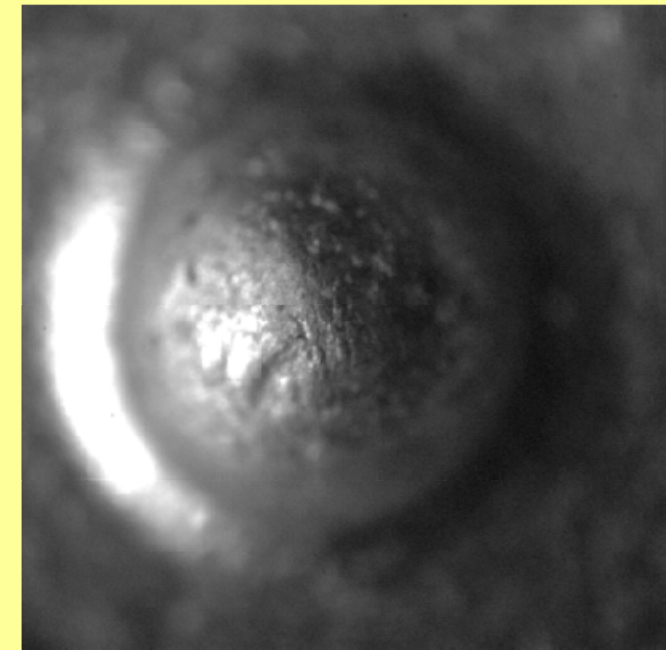
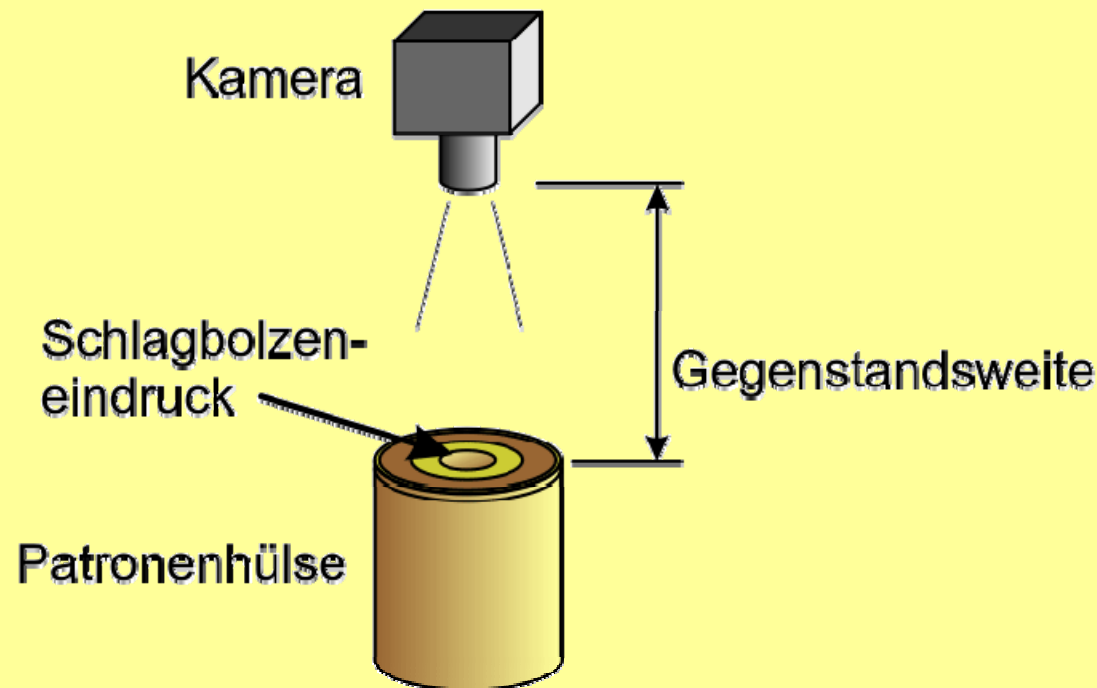




## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

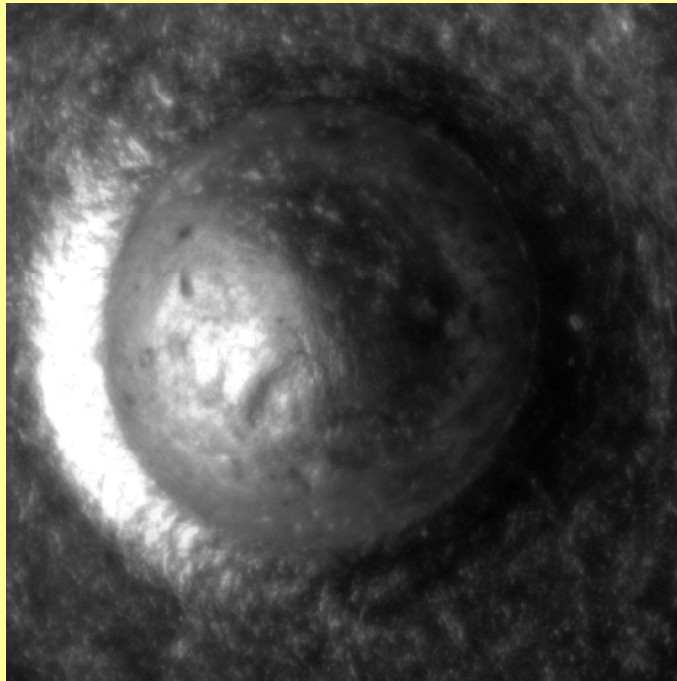
### Beispiel für komplementäre Information: **Fokusserie**

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



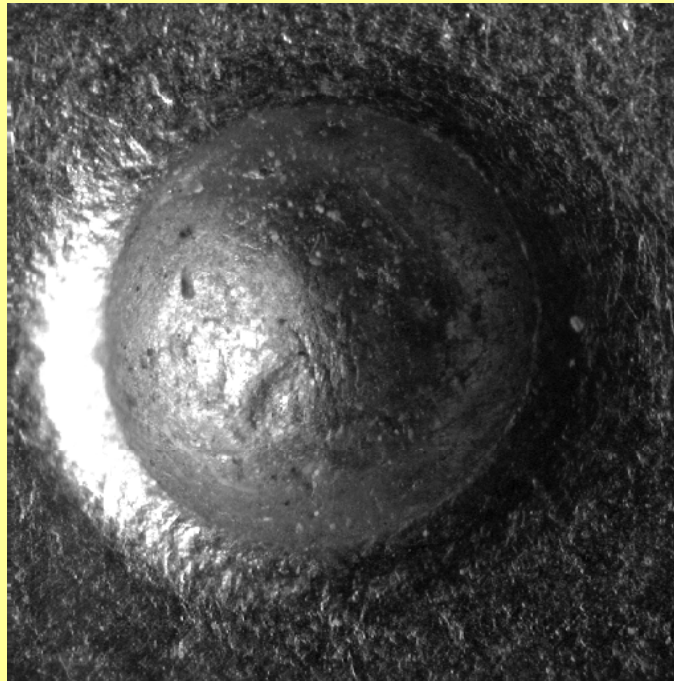
## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Verknüpfung der Einzelbilder der Bildserie:  
Synthetisch erhöhte Schärfentiefe



Mittelung

→ Kontrastarmes Bild



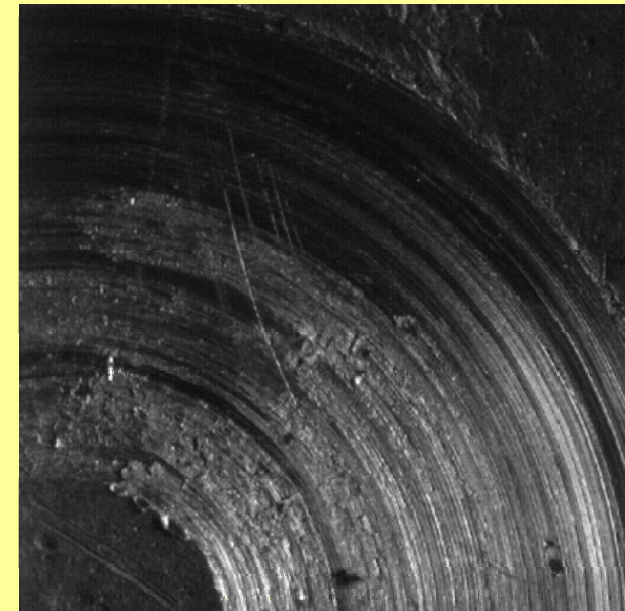
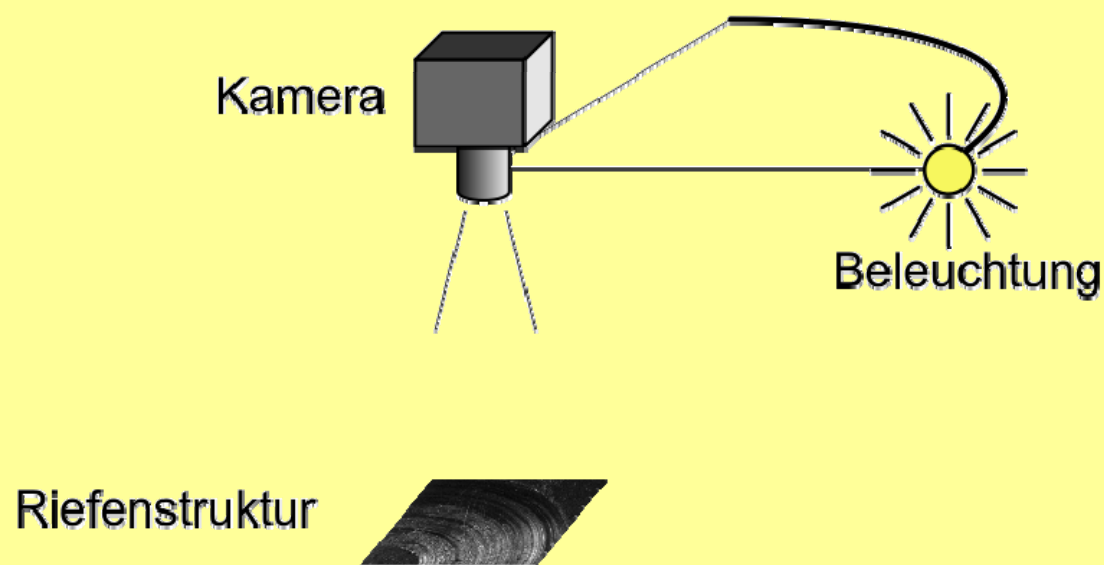
Ausschneiden und Zusammenfügen  
fokussierter Bereiche

→ Erhöhte Schärfentiefe

## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

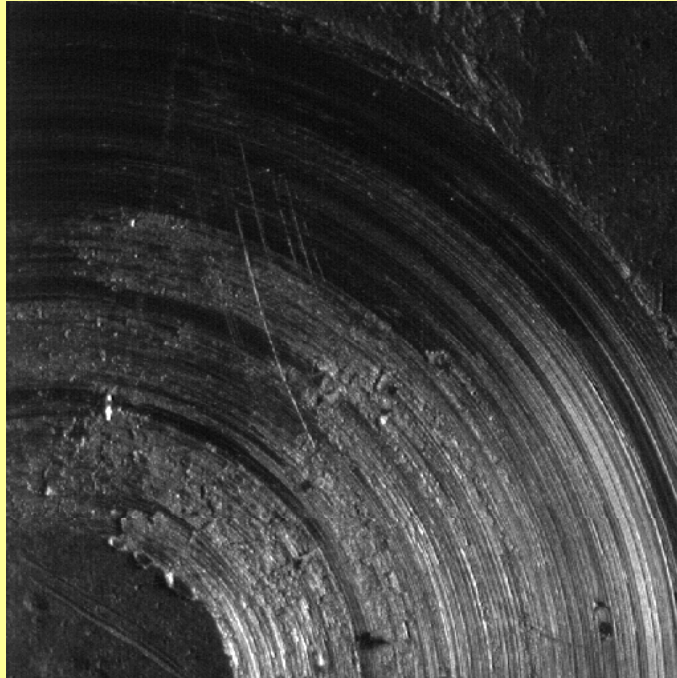
### Beispiel für komplementäre Information: **Beleuchtungsserie**

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

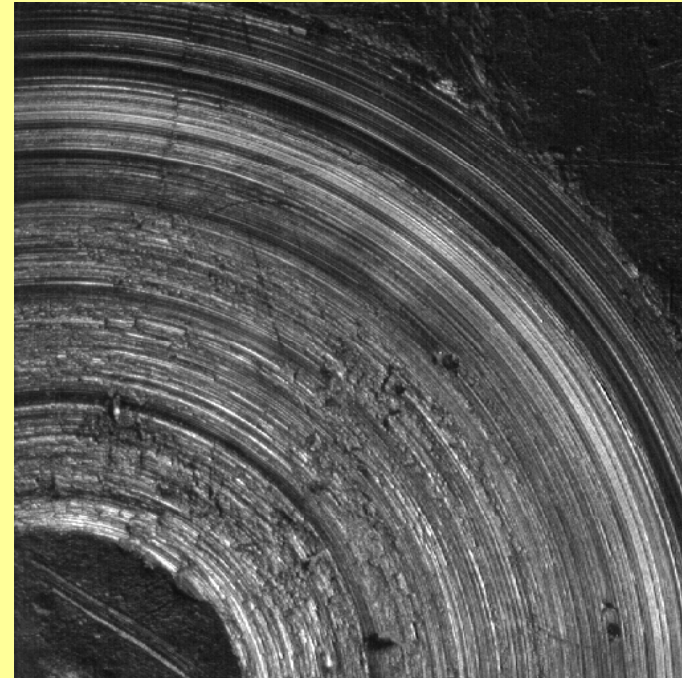


## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Optimierung des lokalen Kontrasts



Bildserie

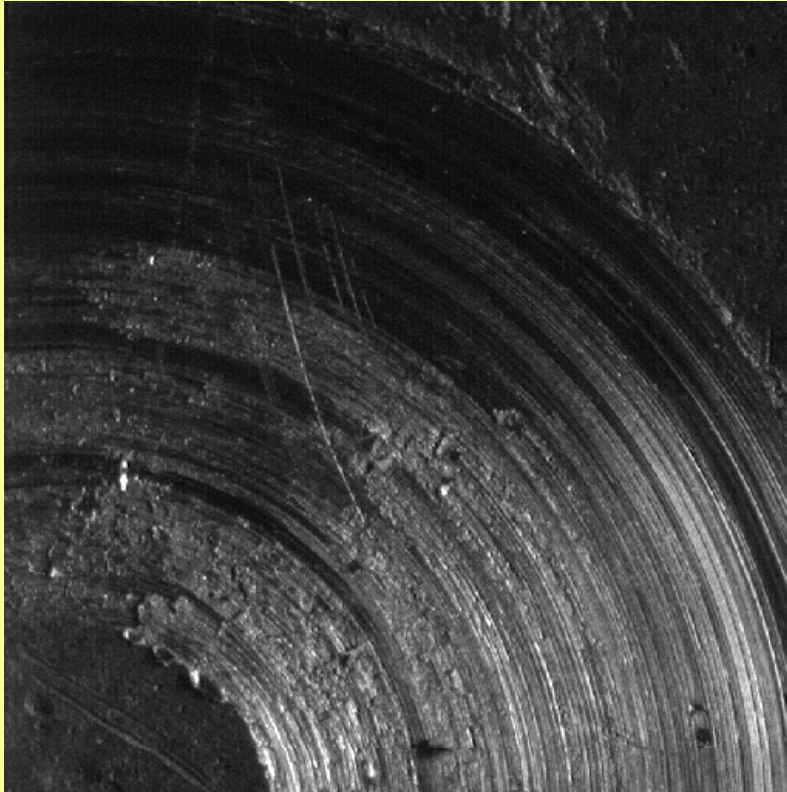


Ausschneiden und Zusammenfügen  
kontrastreicher Bereiche  
→ Erhöhte Sichtbarkeit der Strukturen

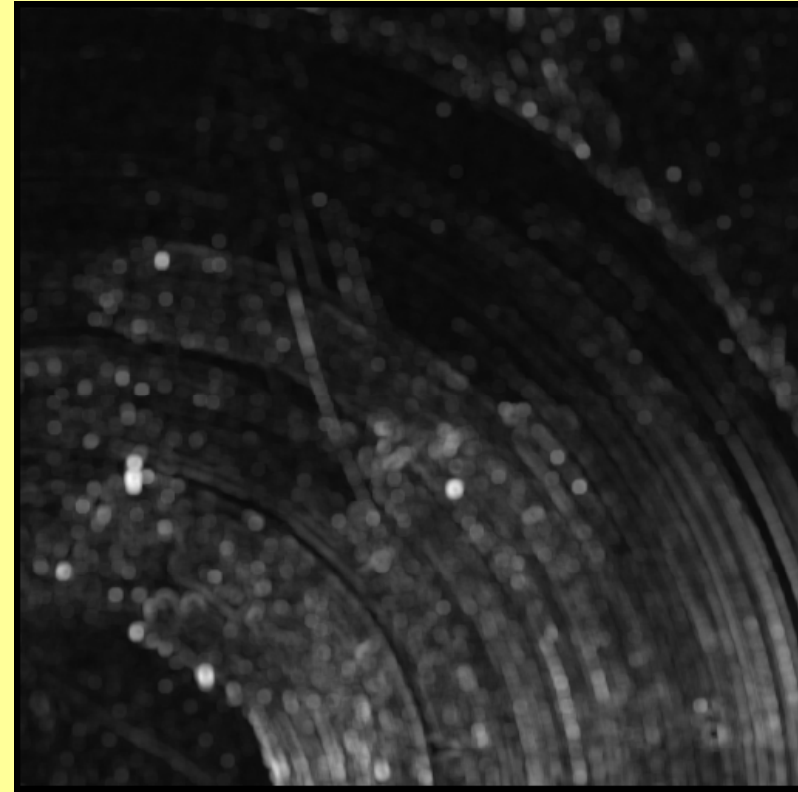


## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Bestimmung des lokalen Kontrasts



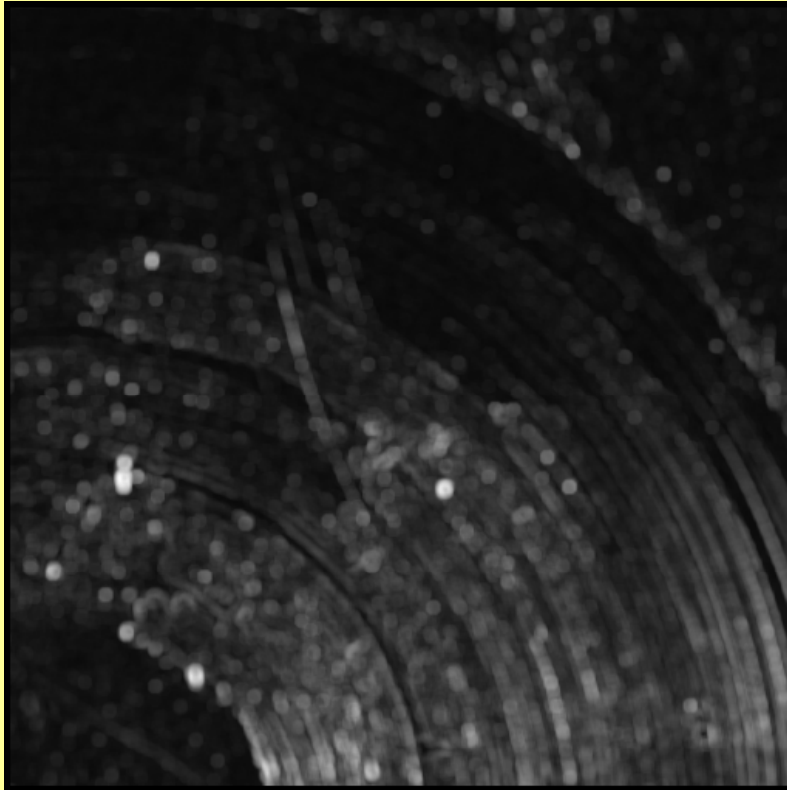
Bildserie



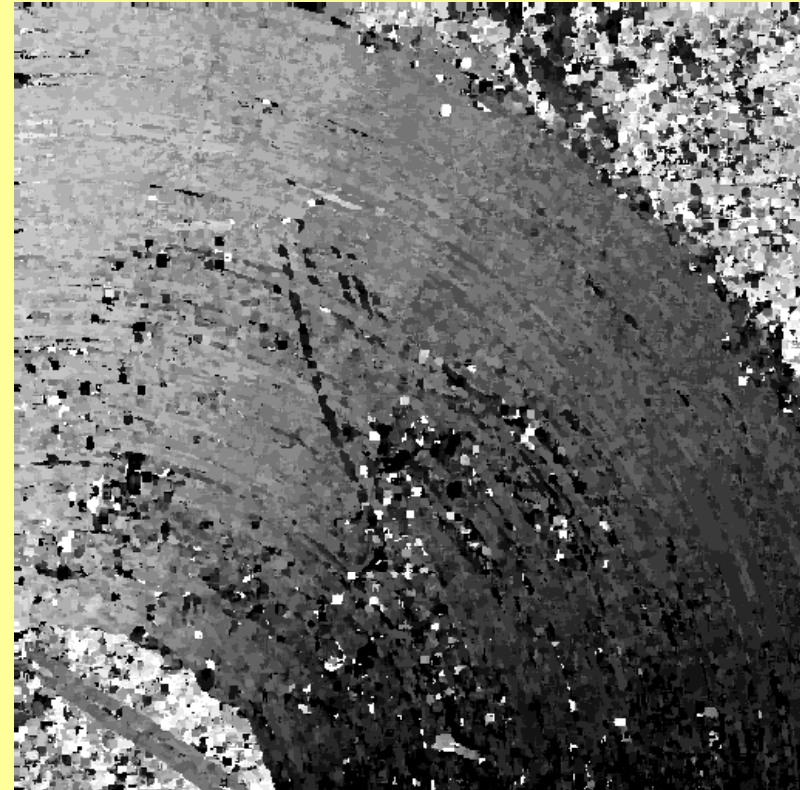
Bestimmung  
der lokalen Standardabweichung  
→ Merkmal für den lokalen Kontrast in  
allen Bildern der Serie

## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Maximierung des lokalen Kontrasts



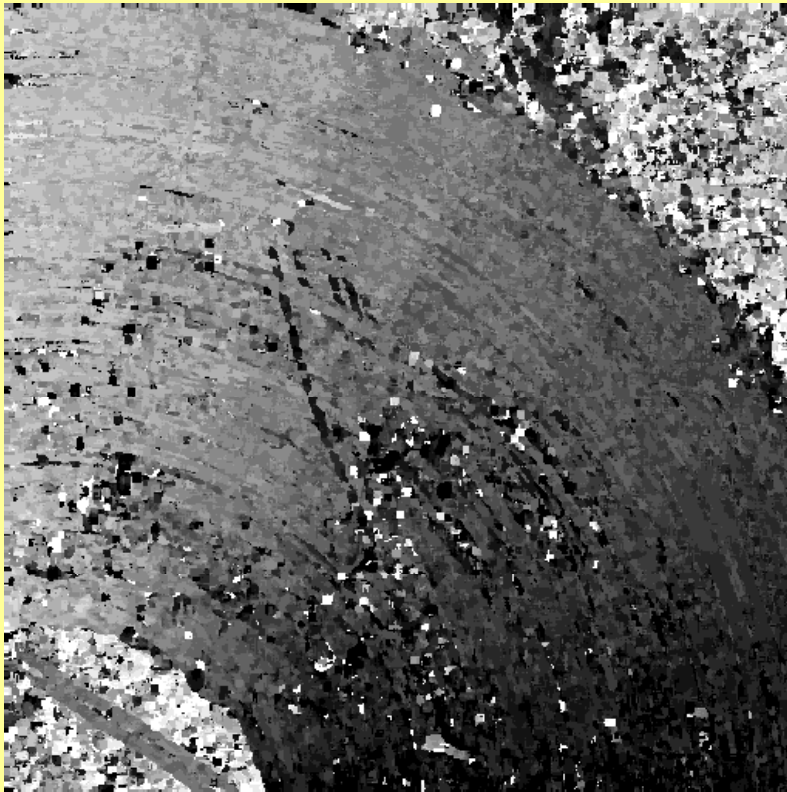
Lokaler Kontrast



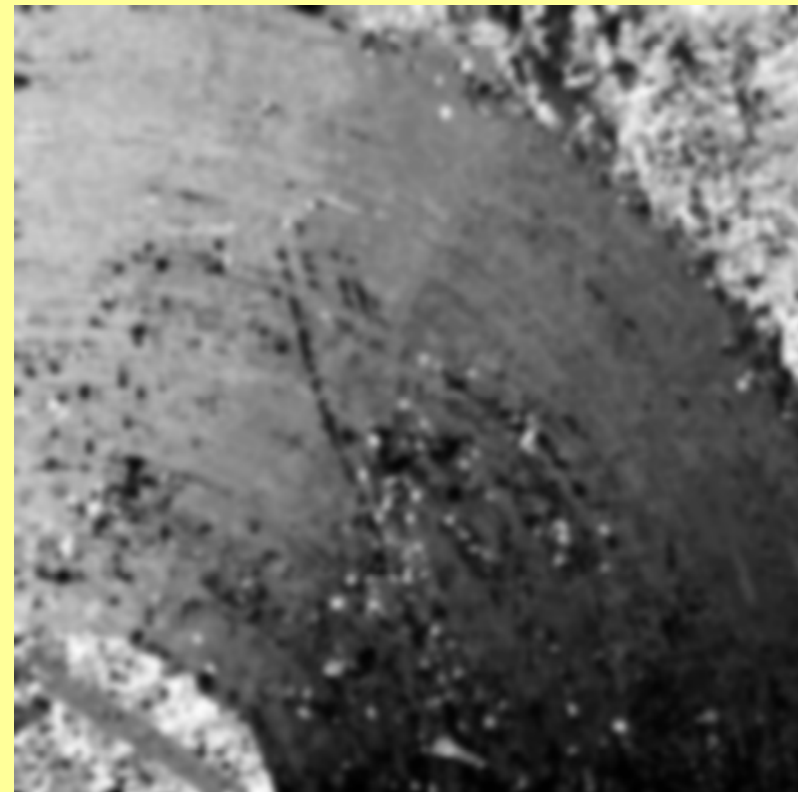
Für jeden Bildpunkt: Suche des maximalen Kontrasts  
→ Nummer des Bildes mit dem höchsten Kontrast  
„Fusionskarte“

## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Maximierung des lokalen Kontrasts



Nummer des Bildes mit  
maximalem Kontrast  
„Fusionskarte“

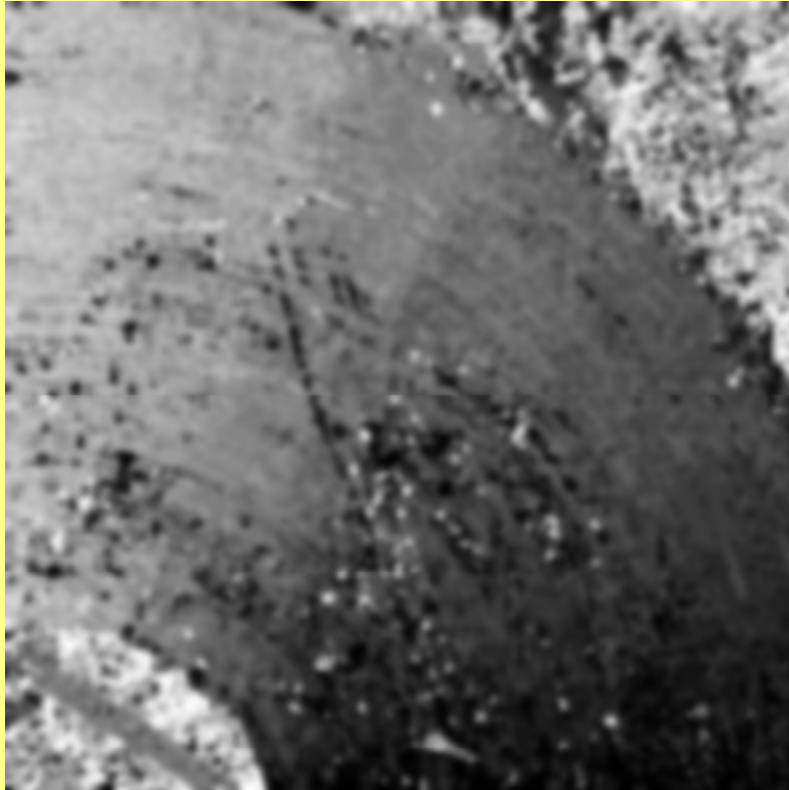


Elimination von unerwünschten harten  
Übergängen in der Fusionskarte  
→ Glättung der Fusionskarte

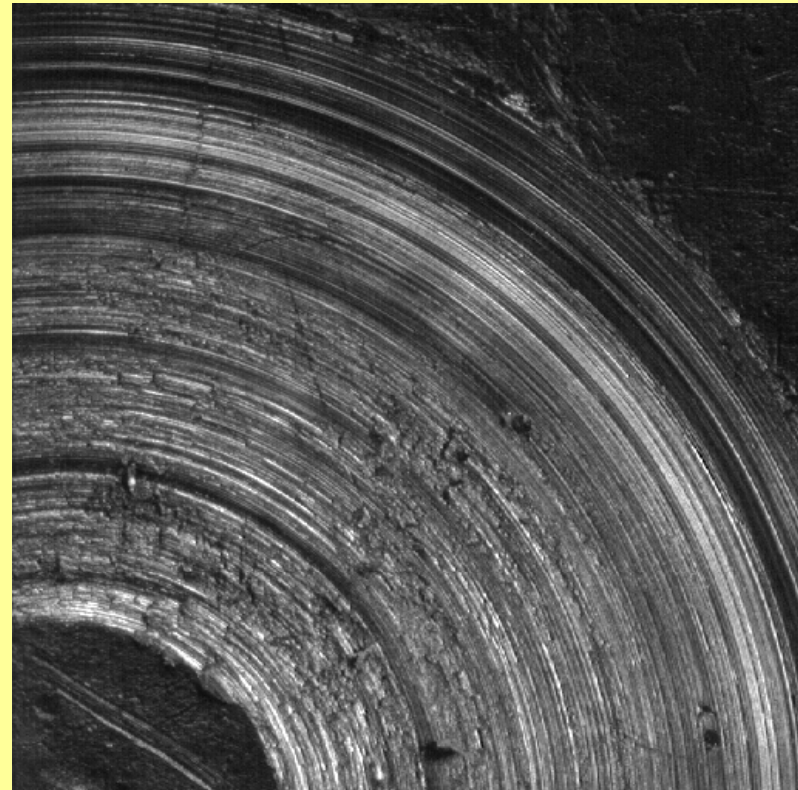


## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

- Maximierung des lokalen Kontrasts



Geglättete Fusionskarte

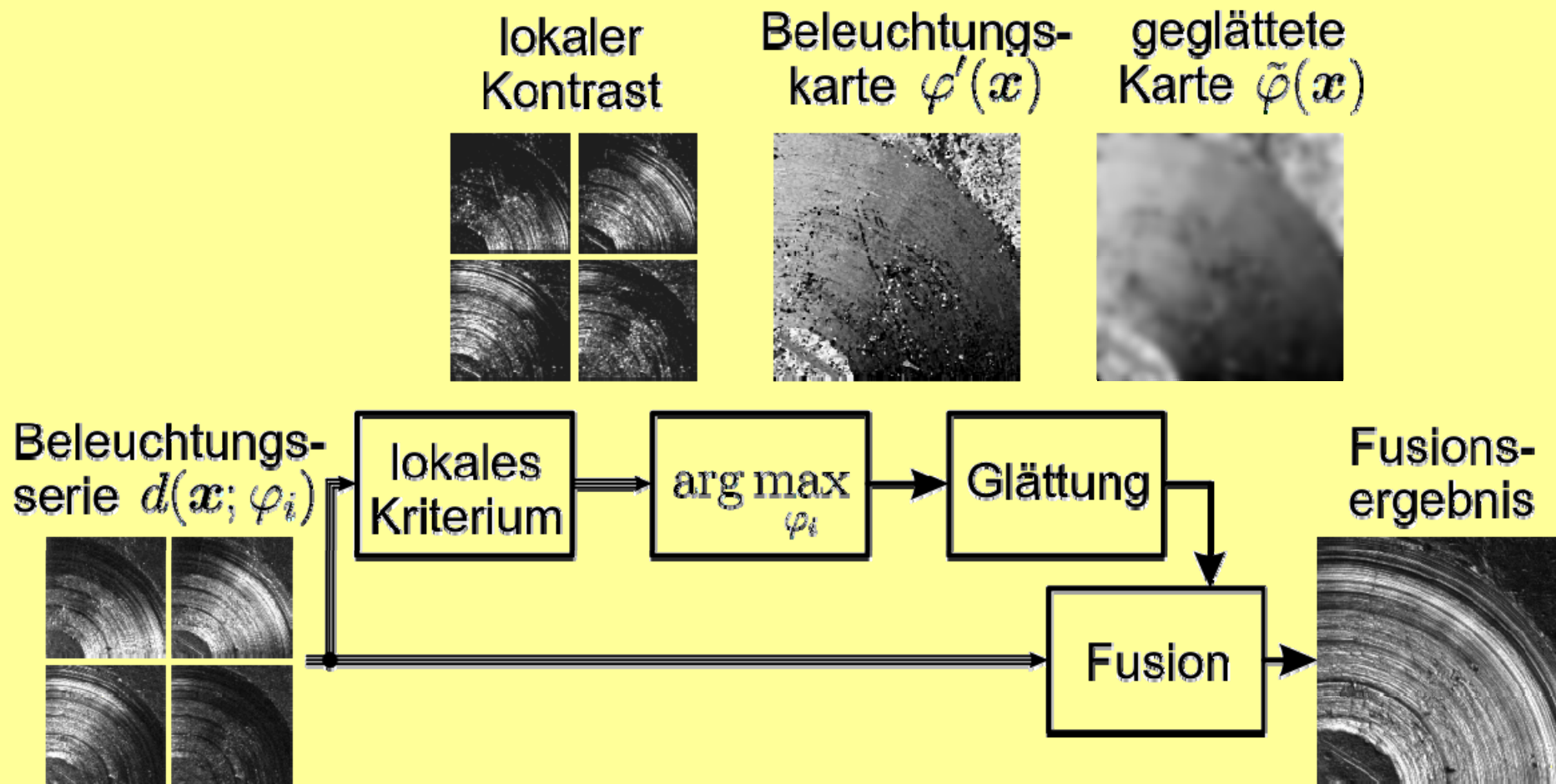


Anwendung der geglätteten Fusionskarte als Lookup-Tabelle auf die originale Bildserie



## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

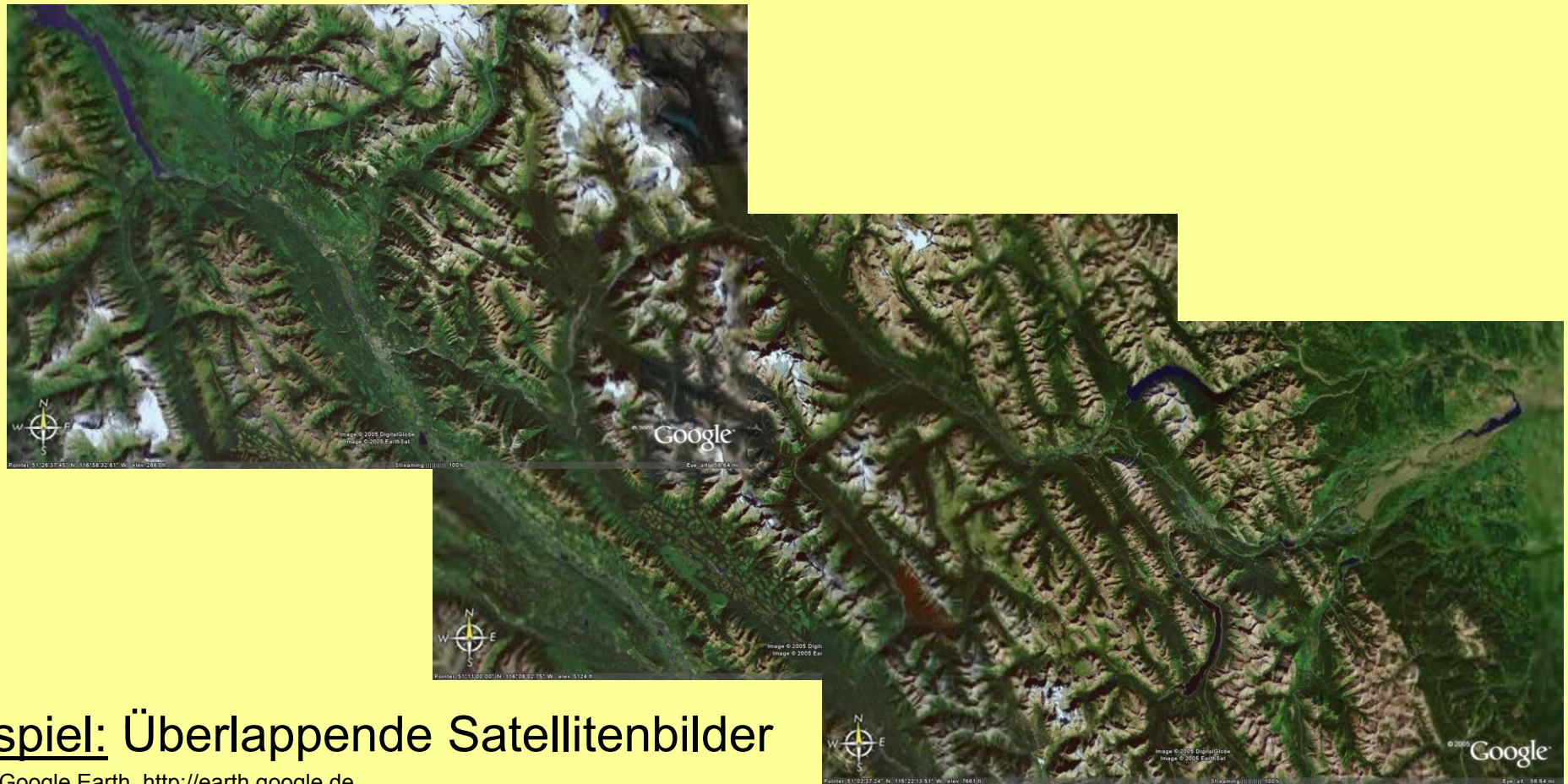
- Blockschaltbild: Optimierung des lokalen Kontrasts



## 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)

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



## 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)

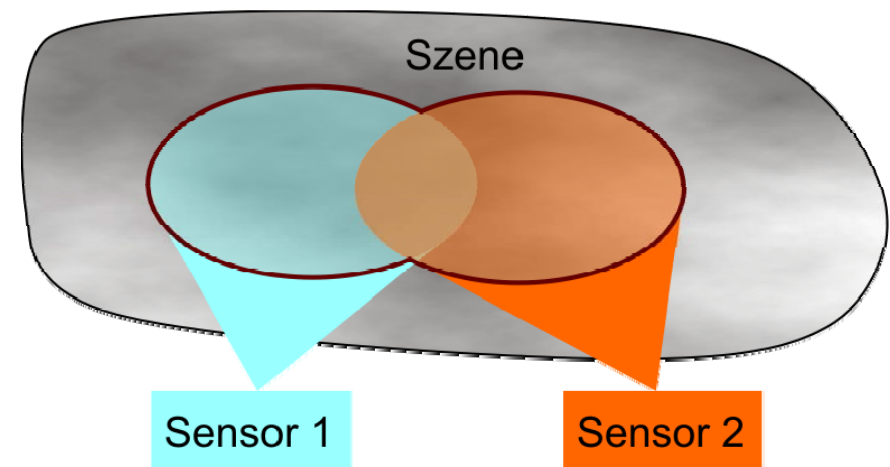
$$S(\mathbf{x}) = \frac{I - \min_{p \in \{R, G, B\}} (d(\mathbf{x}, p))}{I}$$



## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

### ■ Verteilte Information

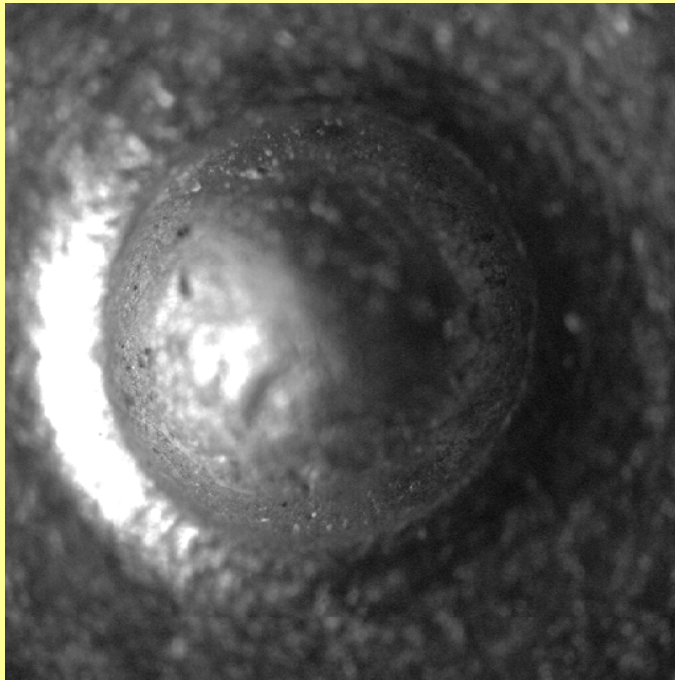
- Nutzinformation liegt verteilt über die Informationsquellen vor
- Erst die **Auswertung sämtlicher Informationsquellen** erlaubt Aussagen über die Zielgröße
- Komplementäre Fusion von extrahierten Merkmalen
- Beispiele:
  - Tiefenkarten aus Stereo-Serien oder Fokusserien (*depth from focus*)
  - Photometrisches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



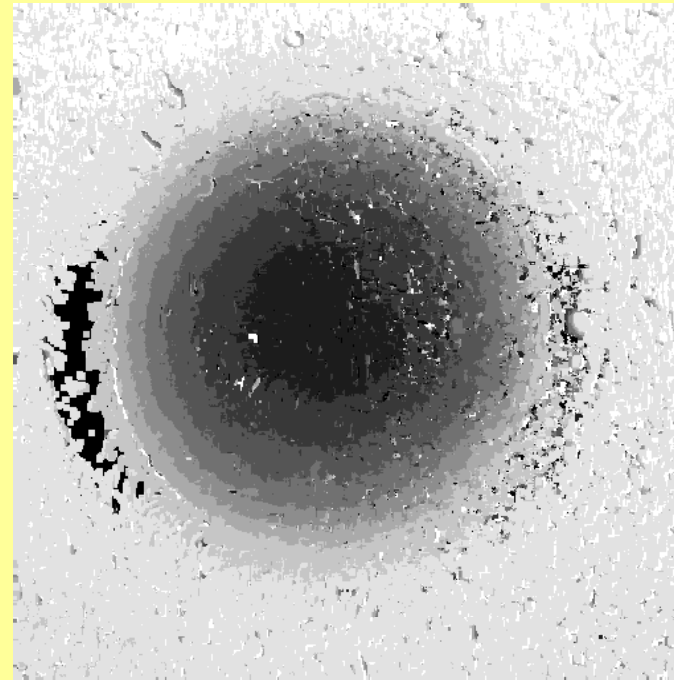
## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

### Beispiel für verteilte Information: **Fokusserie**

- 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)



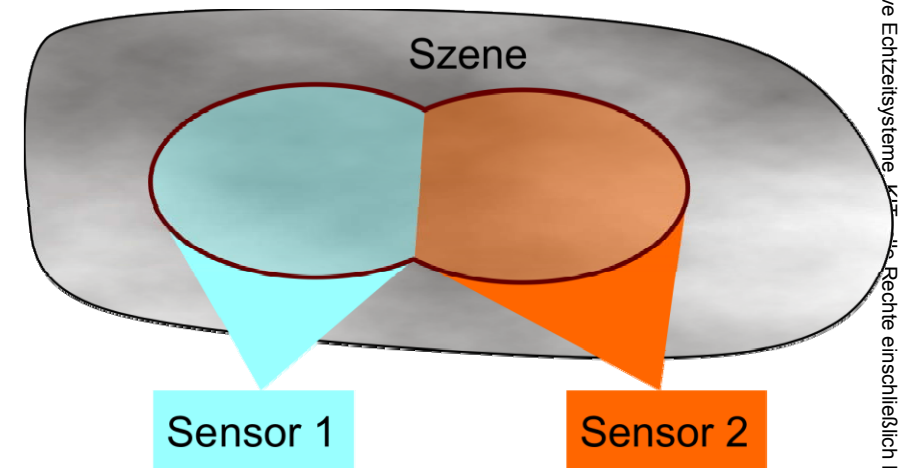
Tiefenkarte  
(schwarz: tief, weiß: hoch)



## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

### ■ Orthogonale Information

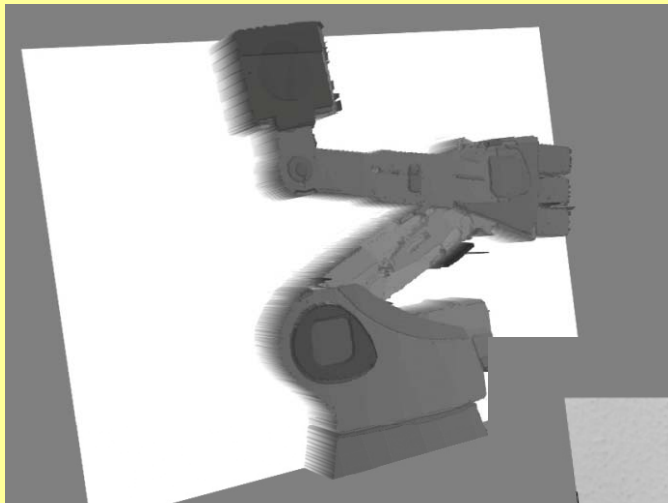
- Zu fusionierende Informationen enthalten Nutzinformation über **disjunkte Eigenschaften der Szene**, z.B. unterschiedliche physikalische Größen
- Verknüpfung von Merkmalen oder Entscheidungen
- Beispiel:  
Verknüpfung von Grauwertbildern (Reflektanzeigenschaften der Szene) und Tiefenkarten (3D-Gestalt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



## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

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

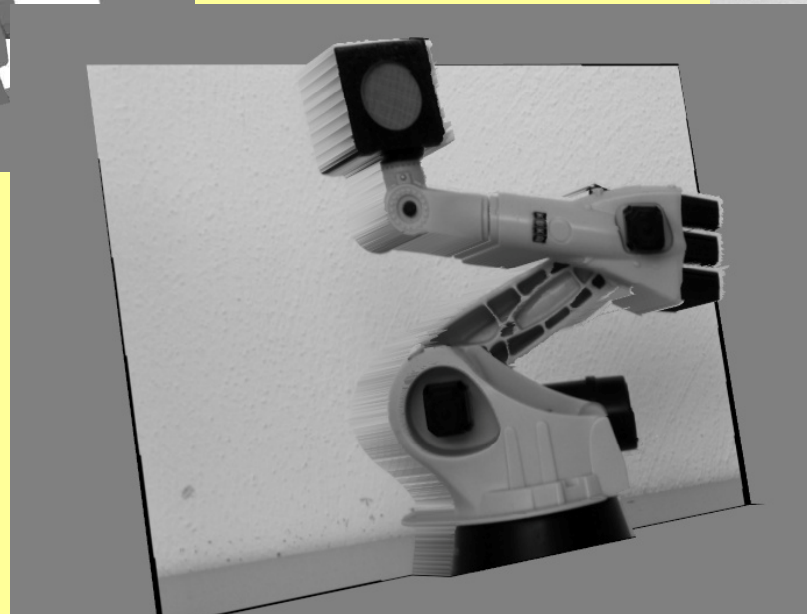
- 3D-Modell aus Stereo-Auswertung
- Reflektanz aus einem Kamerabild



3D-Modell



Reflektanz



Texturiertes 3D-Modell

## 1.4 Informationsgehalt der Signale und Daten

---

### Zusammenfassung:

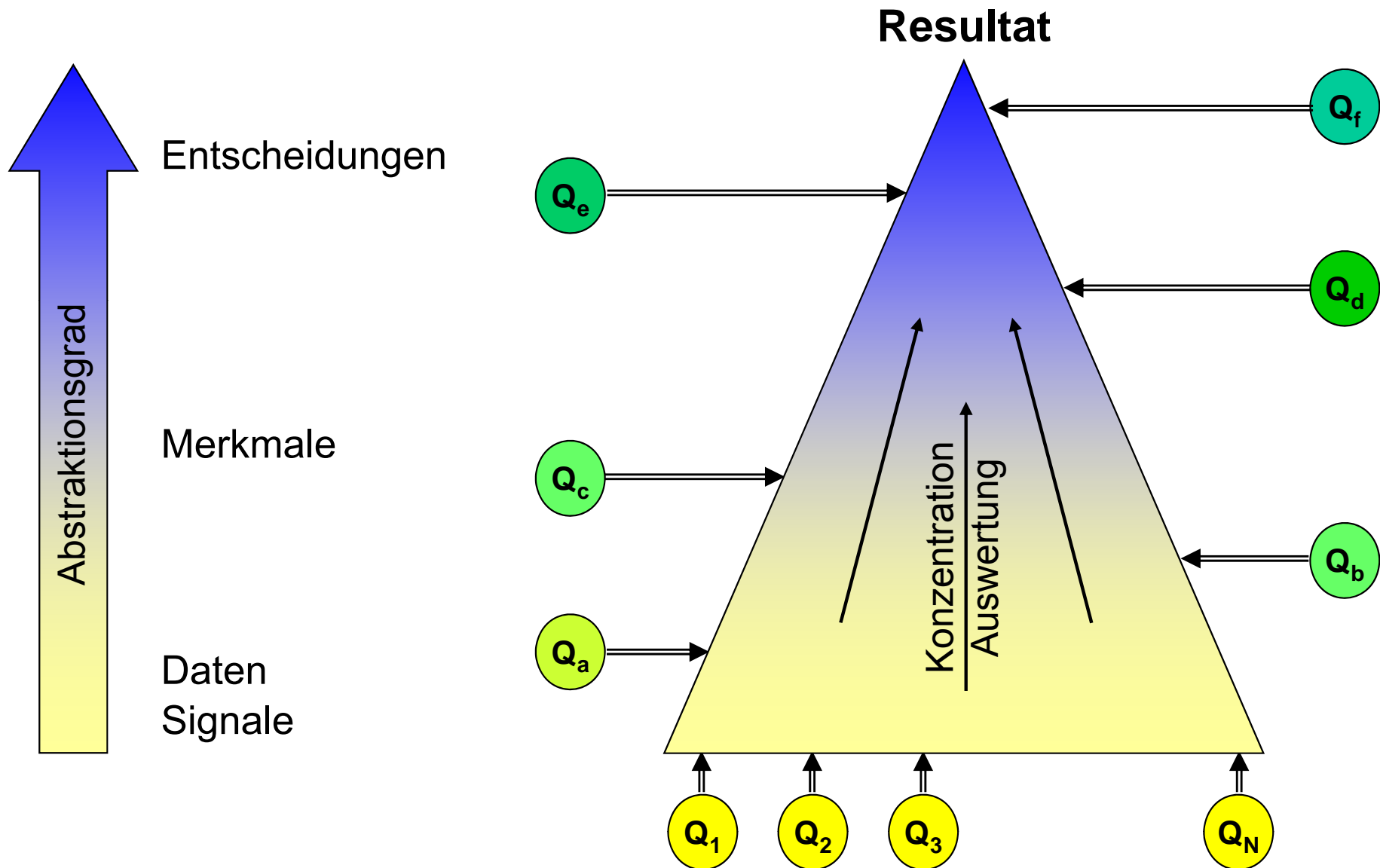
- Jede Informationsquelle kann nur einen Teil der insgesamt verfügbaren Information beschreiben.
- Diese Informationen stehen in **unterschiedlichen Zusammenhängen** zueinander:
  - **Redundante** (konkurrierende) Information:  
Quellen enthalten Nutzinformation in gleicher Weise
  - **Komplementäre** 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



Architektur einer Fusionsmethodik lässt sich einteilen nach:

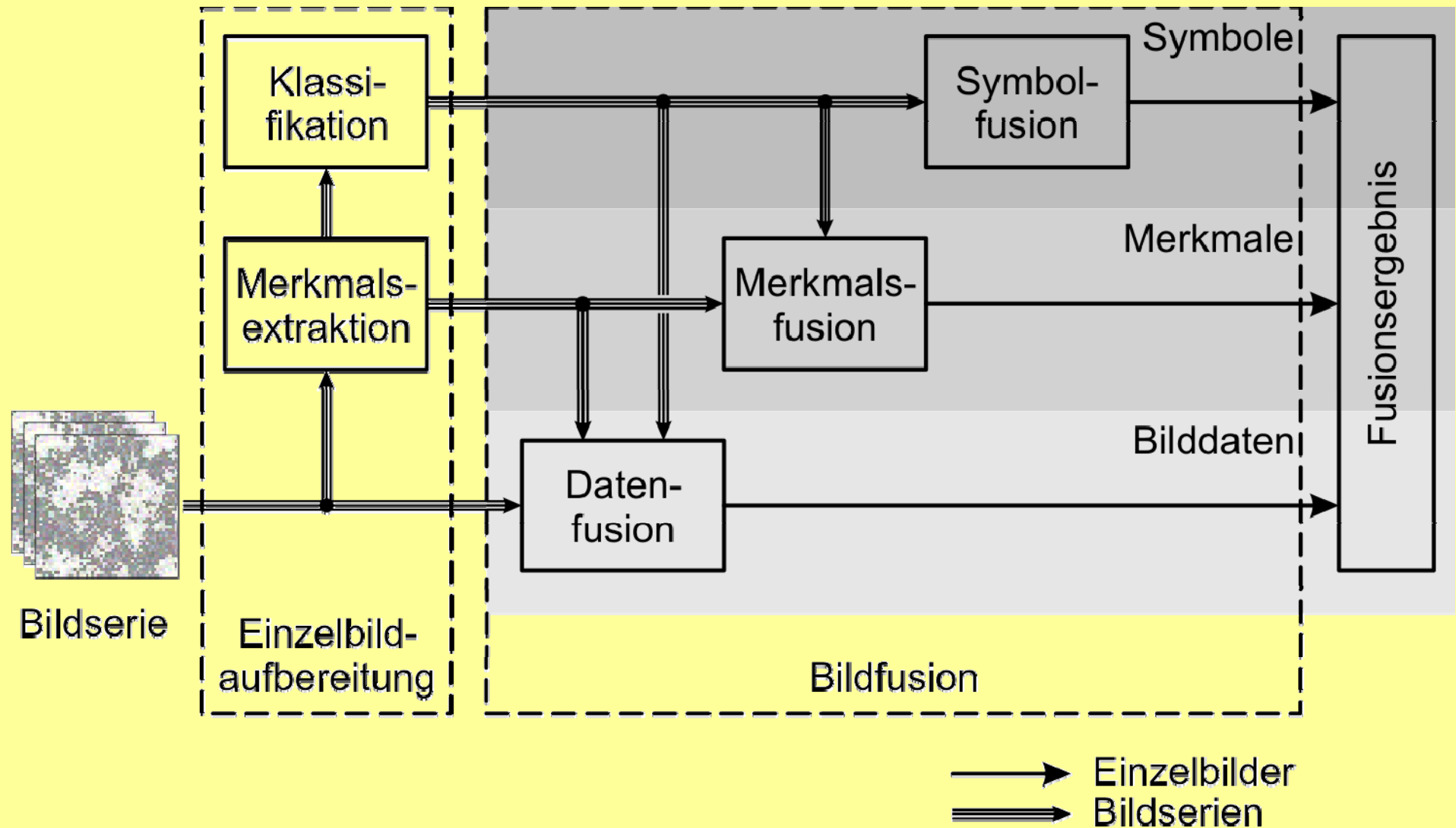
- **Abstraktionsgrad**, auf dem die Information zur Fusion vorliegt  
→ Fusion auf Signalebene, Datenebene, Merkmalsebene, Entscheidungsebene
- **Auswertungstiefe** in den Komponenten (Sensoren, Zentraleinheit)  
→ verteilte Fusion, zentralisierte Fusion, hybride Fusion

**Sinnvolle Architektur** hängt ab von

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



### 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	X			X			X		
Erstellung von Tiefenkarten aus Fokusserien	X				X			X	
Erstellung von Tiefenkarten aus Stereoserien	X				X			X	
Fusion von Tiefenkarten		X			X	X		X	
Fusion von Tiefenkarte und Grauwertbild zu texturiertem 3D-Modell	X	X			X			X	
Kombination von Farbauszügen zu einem Farbbild	X			(X)	X		(X)	X	
Bestimmung der Farbsättigung aus Farbauszügen	X				X			X	
Kriminalistische Ermittlung	X	X	X		X	X			X
Menschliche Wahrnehmung	X	X	X		(X)	X			X
Fahrerassistenz: Sensorielle Unterstützung der menschlichen Wahrnehmung	X	X				X			X
Fahrerassistenz: Maschinelle multisensorielle Hinderniserkennung	X	X			X	(X)			X
Ortung von Schienenfahrzeugen	(X)	X	X		X			X	(X)
Karte-Bild-Referenzierung	X		X	(X)	(X)	(X)	(X)	(X)	X
Karte-Karte-Referenzierung			X			X			X
Multispektrale Teleskopaufnahmen	X	(X)		(X)	X			X	
Fusion von Radar und FLIR			X			X			X

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

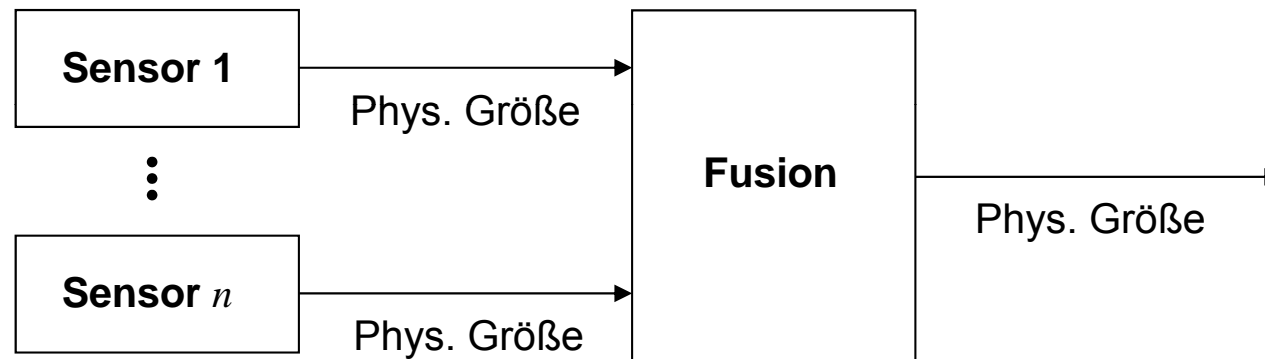
## 1.6.1 Fusion auf Signalebene

---

- 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

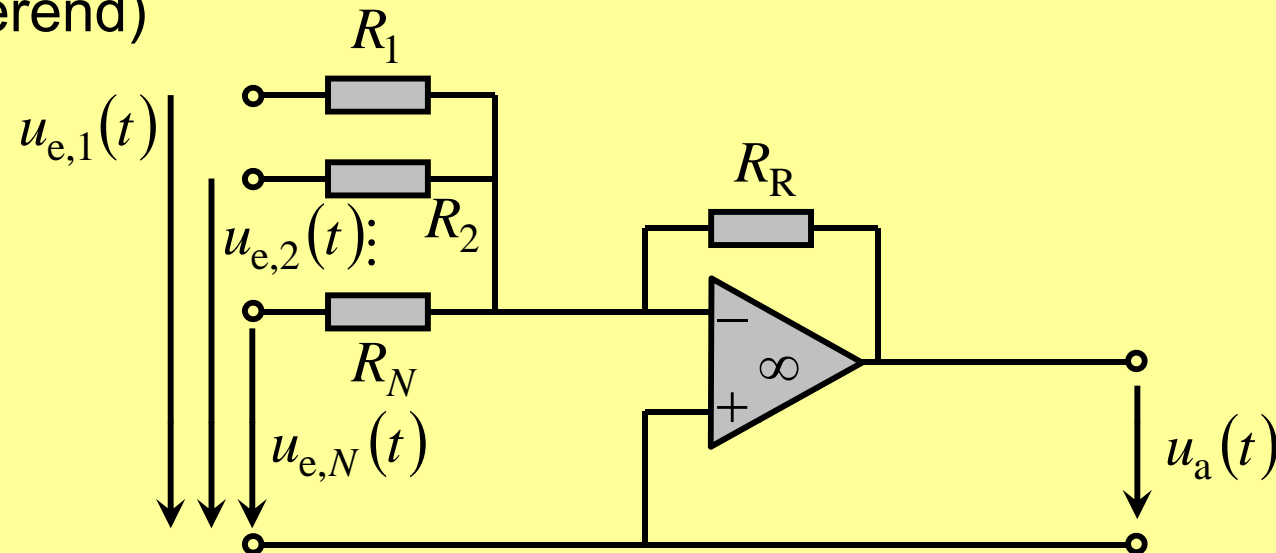
## 1.6.1 Fusion auf Signalebene

---



## 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

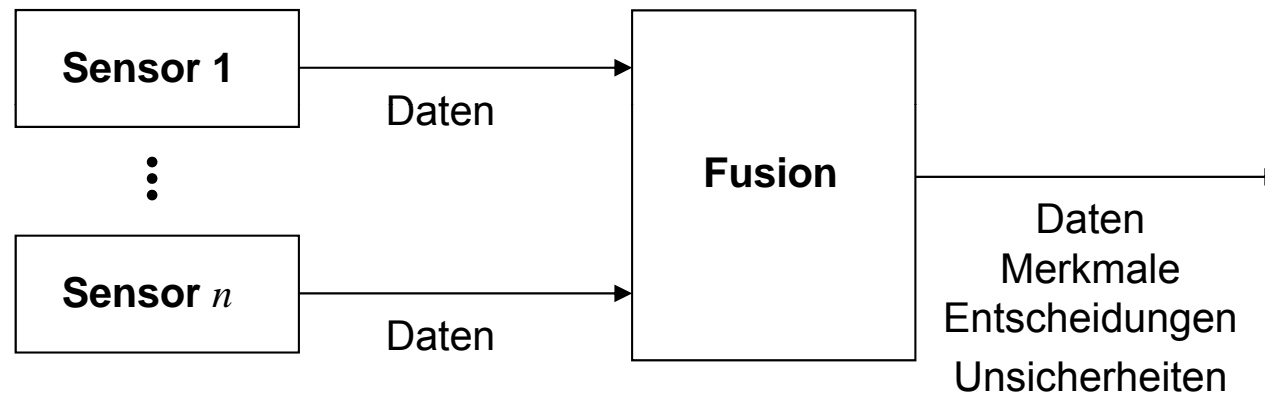


## 1.6.2 Fusion auf Datenebene

---

- 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

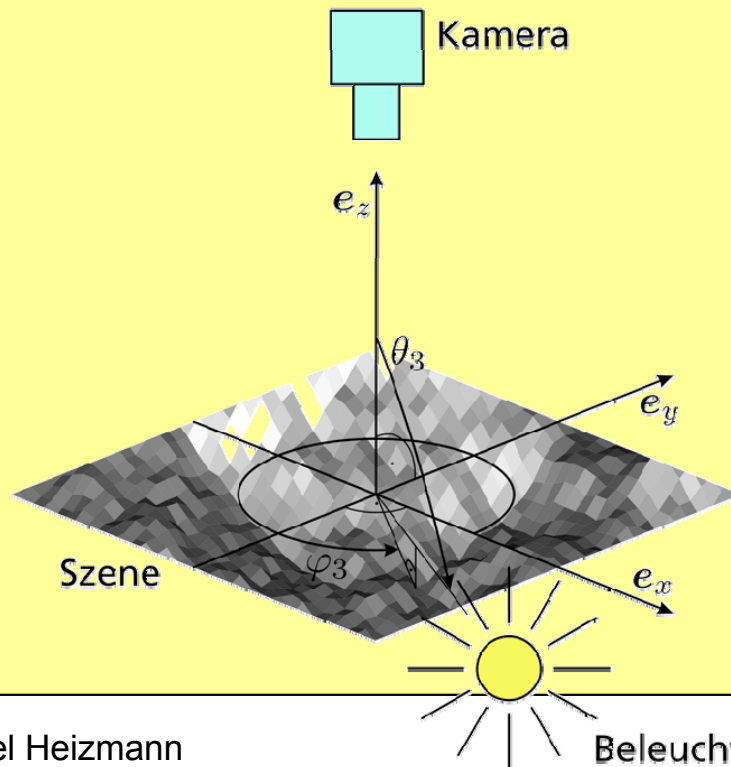
## 1.6.2 Fusion auf Datenebene



## 1.6.2 Fusion auf Datenebene

### Beispiel: Photometrisches Stereo

- Rekonstruktion von 2½D-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

- Für drei Beleuchtungsrichtungen  $n = 3$  :

Direkte Inversion der Beobachtungsgleichung  $g(x) = \rho(x) \cdot B^T n_e(x)$

$$n(x) := \rho(x) \cdot n_e(x) = (B^T)^{-1} g(x)$$

$$\rho(x) = \|n(x)\|, \quad n_e(x) = \frac{n(x)}{\rho(x)}$$

Betrag von  $n(x)$  : Reflektanz

Richtung von  $n(x)$  : Normalen-Einheitsvektor

$B^T$  invertierbar,  
falls Beleuchtungs-  
richtungen nicht  
koplanar  $\Leftrightarrow \det(B^T) \neq 0$

- Für mehr als drei Beleuchtungsrichtungen:

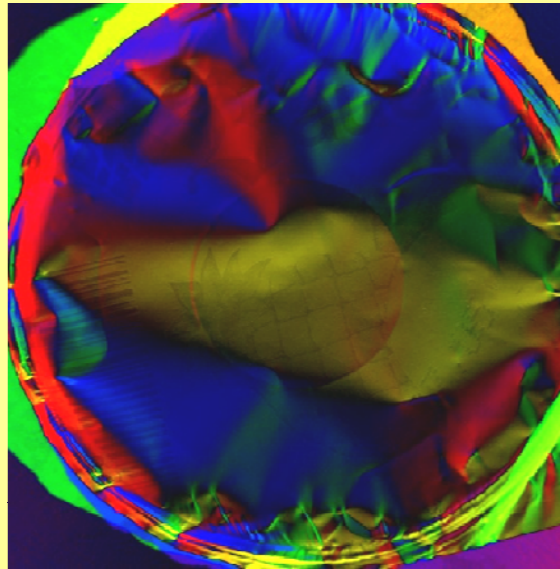
$$n(x) := \rho(x) \cdot n_e(x) = (B B^T)^{-1} B g(x) \quad (B B^T)^{-1} B : \text{Pseudoinverse von } B^T$$

→ Least-squares Schätzung

## 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

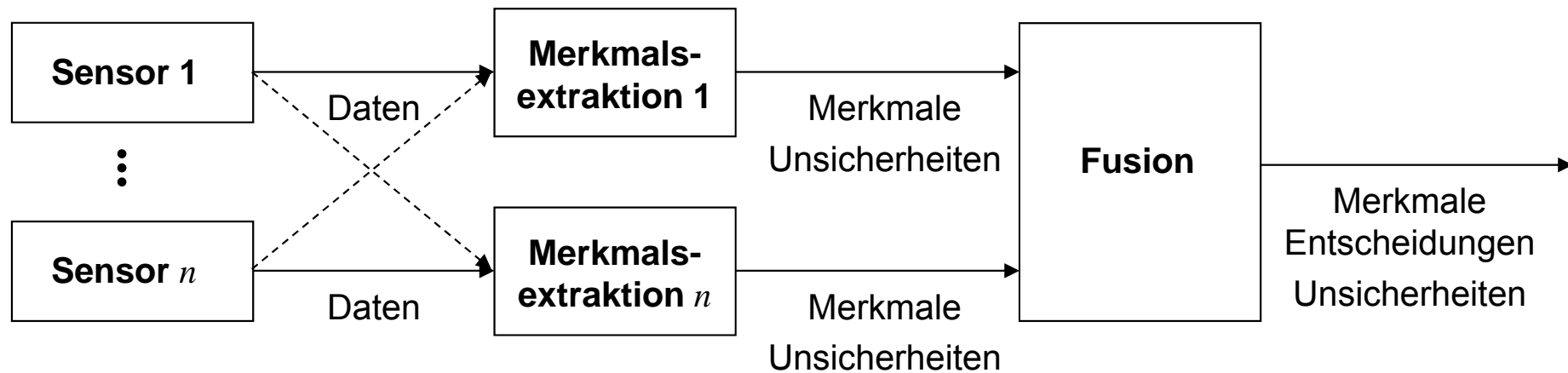


## 1.6.3 Fusion auf Merkmalsebene

- 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

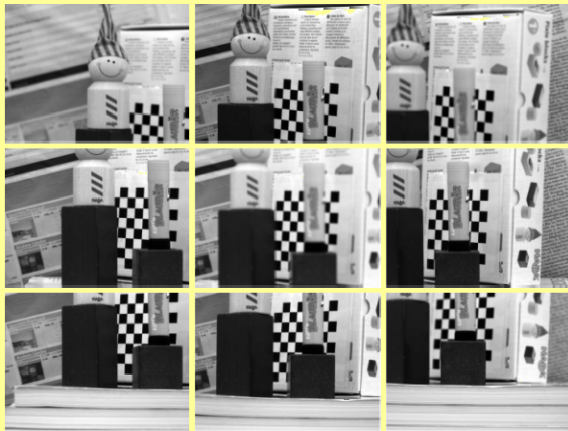


## 1.6.3 Fusion auf Merkmalsebene

### Beispiel: Tiefenkarten

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

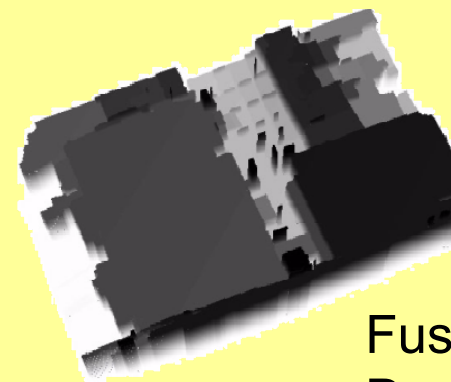
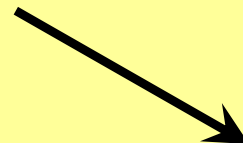
- Stereo-Serie: Auswertung der Disparität → Tiefenkarte
- Fokus-Serie: Auswertung der Schärfe → Tiefenkarte



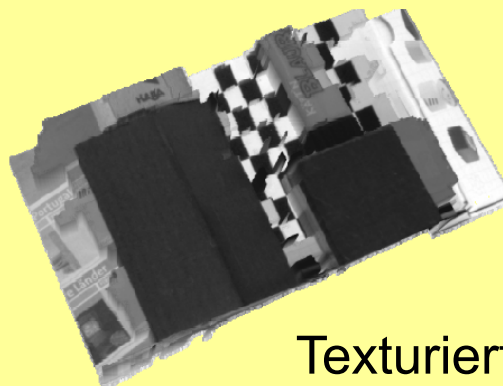
Kombinierte Stereo-  
und Fokusserie



nur Depth from Stereo



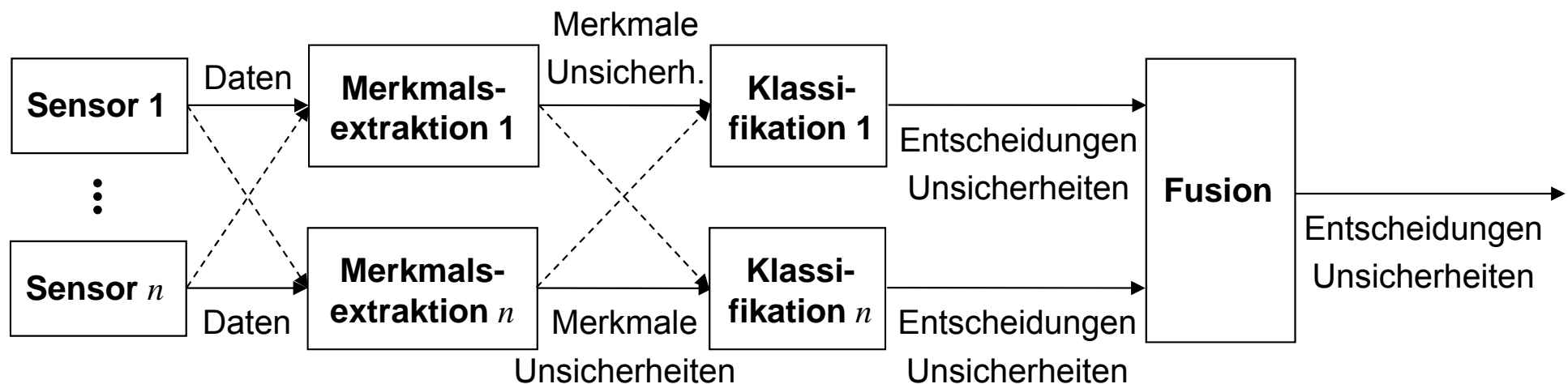
Fusion von  
Depth from Stereo und  
Depth from Defocus



Texturiertes 3D-Modell

## 1.6.4 Fusion auf Entscheidungsebene

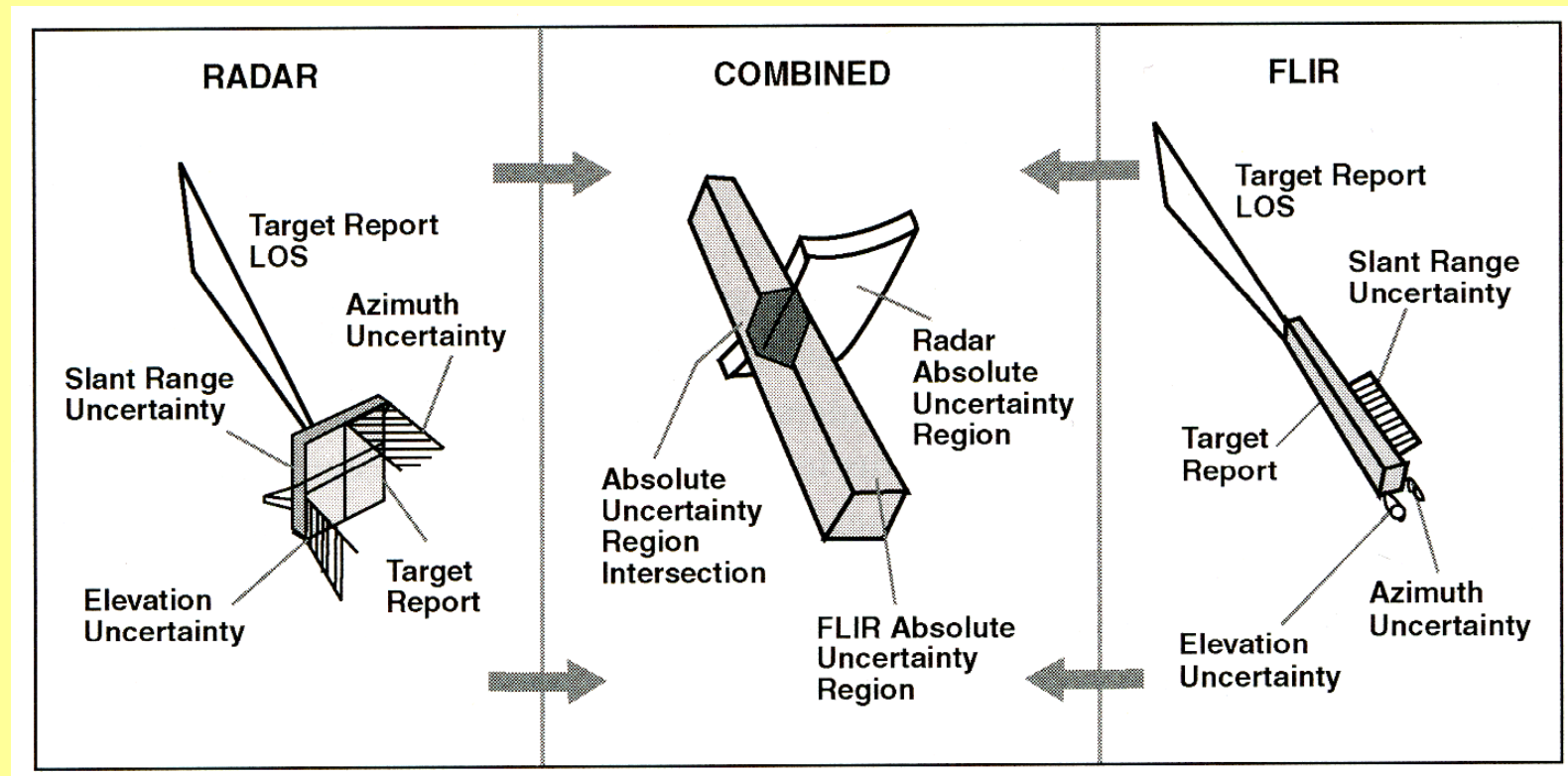
- Merkmalsextraktion und Klassifikation vor Fusion:  
**Hohes Abstraktionsniveau**
- Eingabe: Entscheidungen (evtl. mit Unsicherheiten),  
Ausgabe: Entscheidungen (evtl. mit Unsicherheiten)
- Voraussetzung: **Entscheidungen** können **unabhängig voneinander aus den Daten und Merkmalen der Sensoren** 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

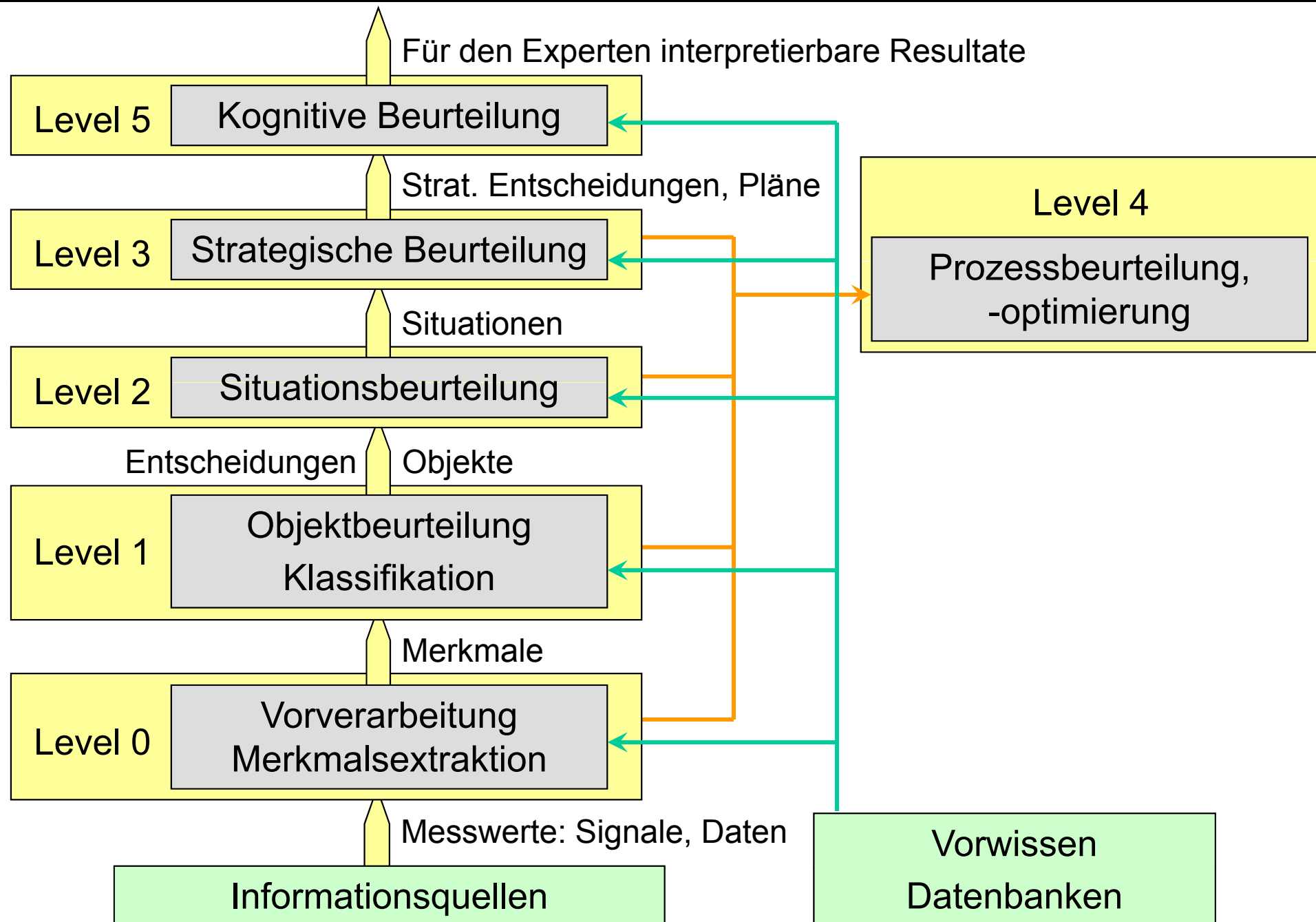
### Beispiel: Fusion von Radar- und FLIR- (forward-looking IR-) Daten

- 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

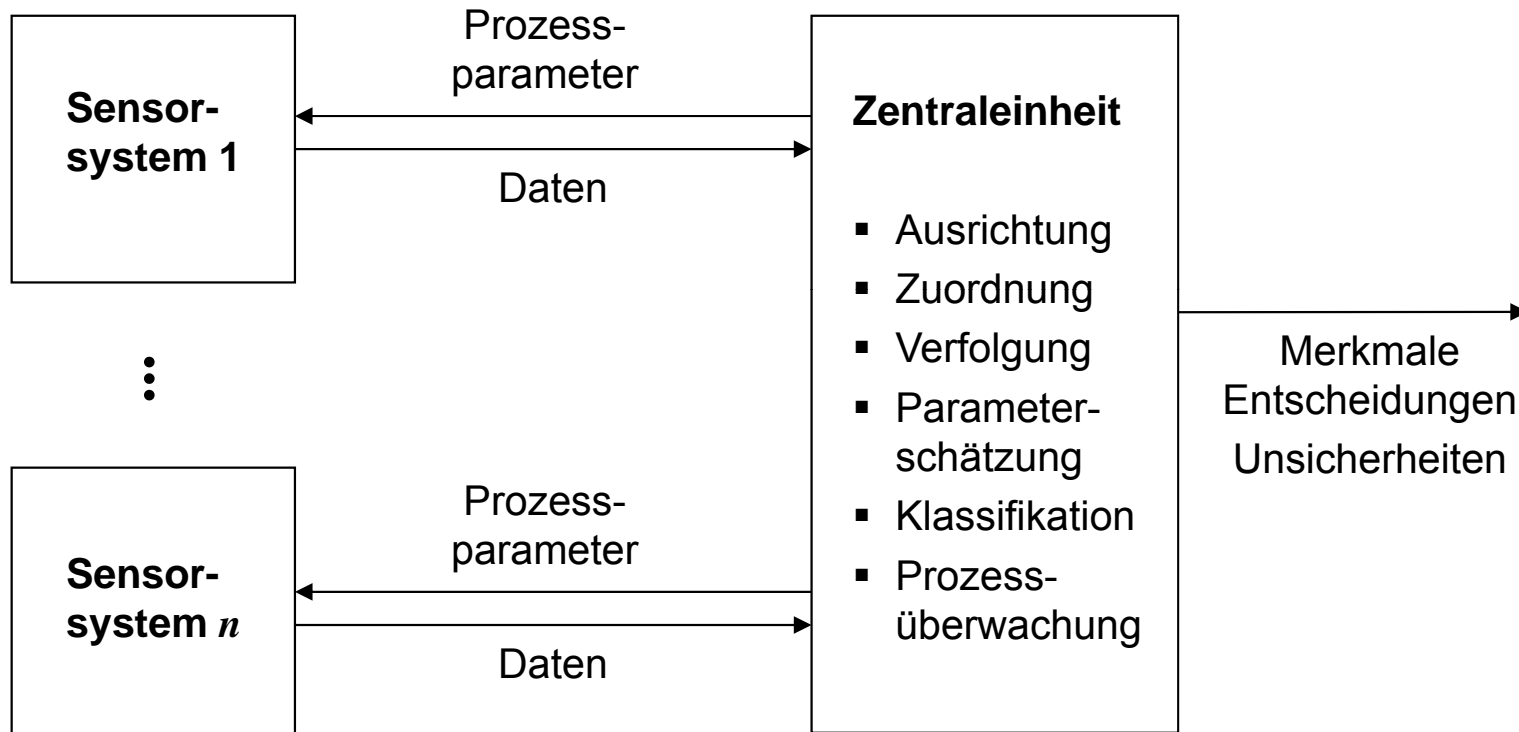
- Sensorsysteme ohne wesentliche eigene Informationsverarbeitung (evtl. Störungsunterdrückung)
- Fusion auf **niedrigem Abstraktionsniveau (Datenfusion)** in der Zentraleinheit

- + 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

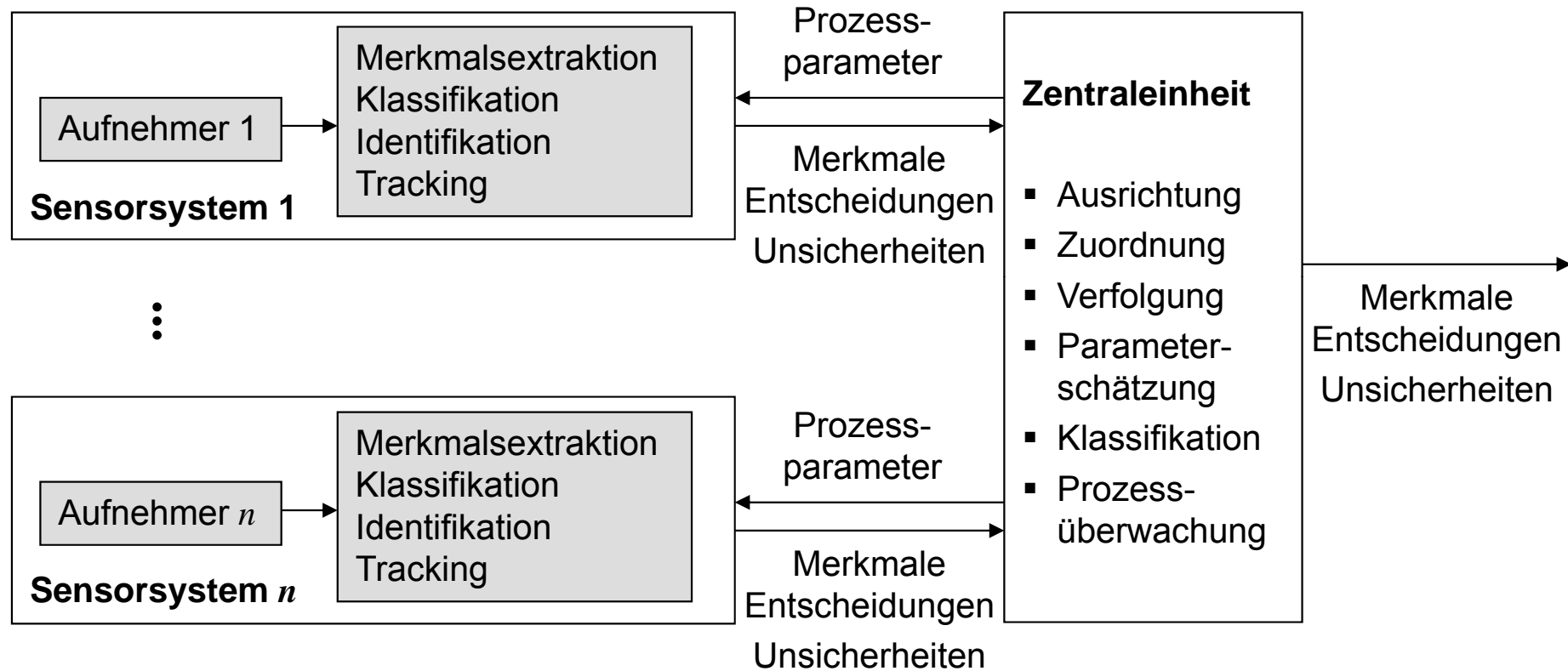
Synonym: Autonome Fusion, Post-individual sensor processing fusion, Track fusion, „Fusion auf Sensorebene (sensor-level fusion)“ (!)

- **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

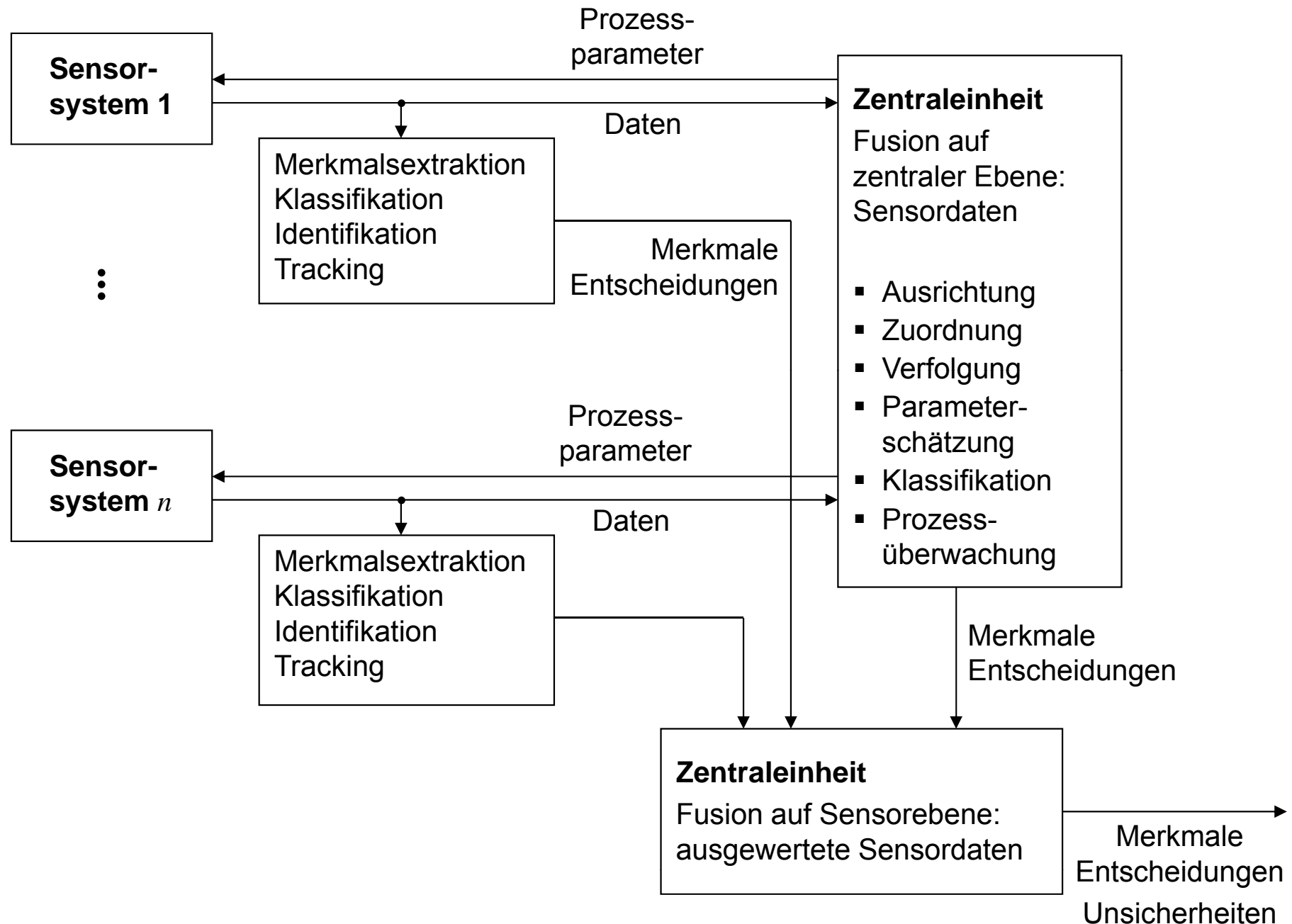
---

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



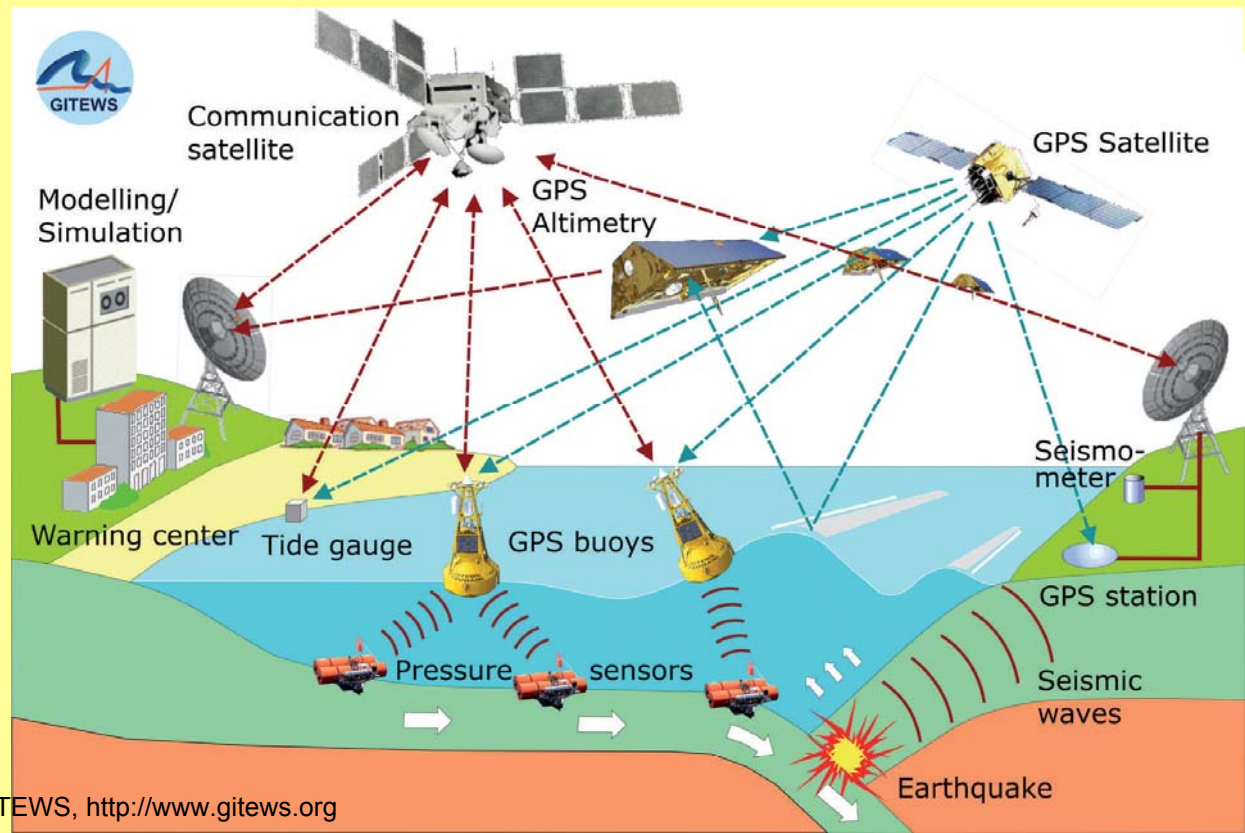
### Zusammenfassung:

- 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

## 1.6 Architektur

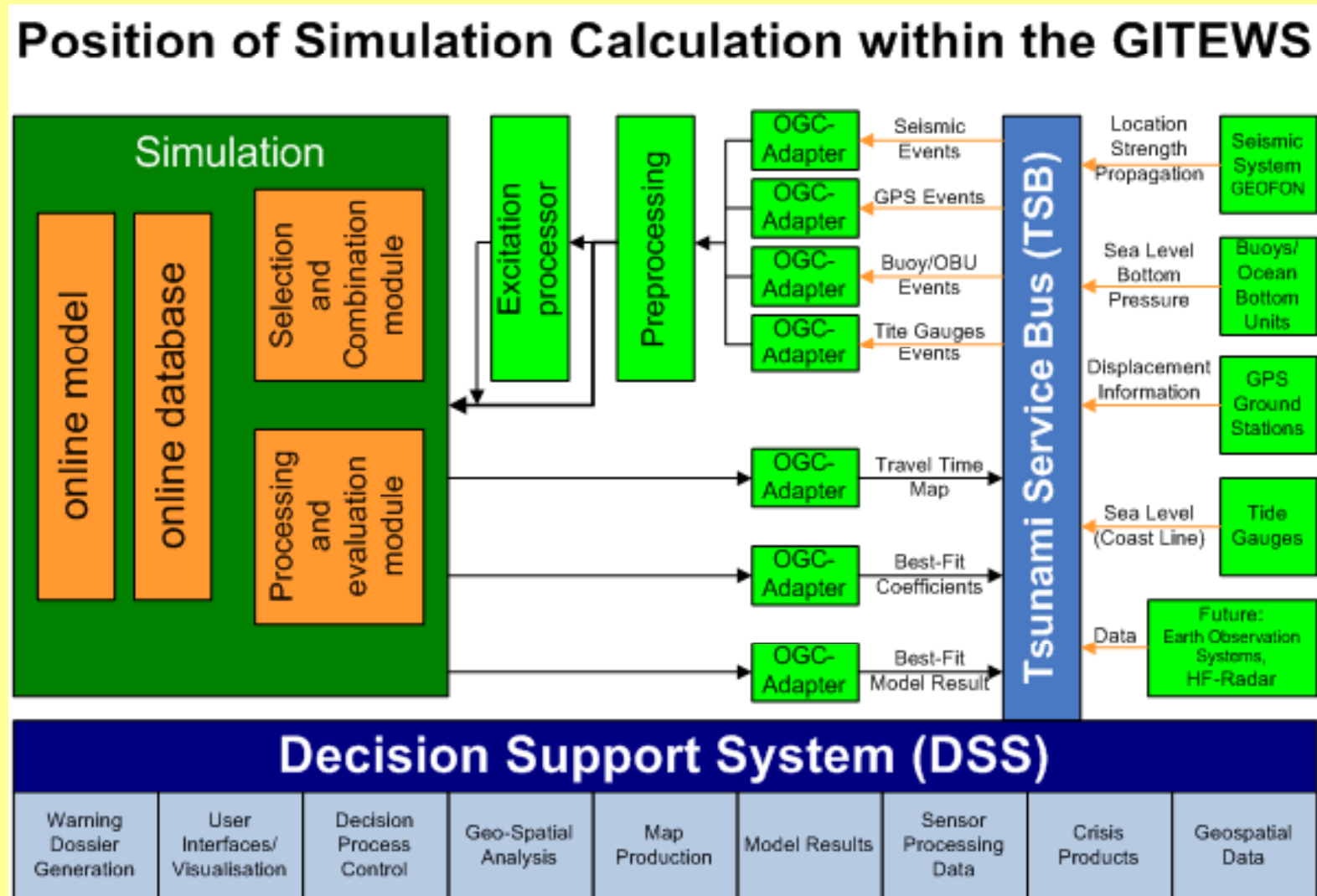
Beispiel: Tsunami-Warnsystem:

- Sensorsysteme:
  - Wasserstandssensoren
  - Seismometer
  - Positionsmessgeräte
- Simulation
- Kommunikationssystem



Quelle: German Indonesian Tsunami Early Warning System GITEWS, <http://www.gitews.org>

## 1.6 Architektur



Quelle: German Indonesian Tsunami Early Warning System GITEWS, <http://www.gitews.org>

## 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**

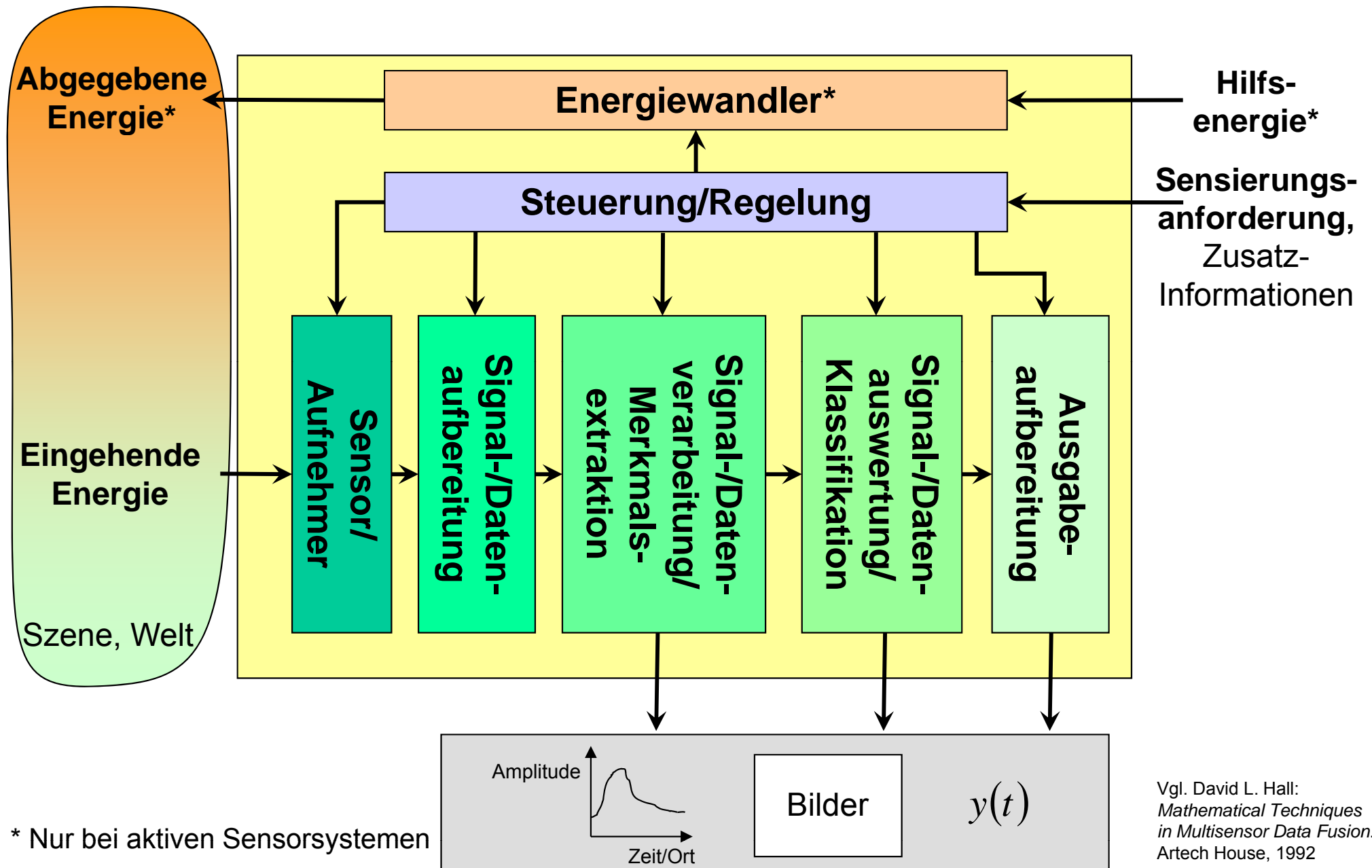
- Wirkmechanismus/Struktur
- Homogene/heterogene Sensoren
- Beschreibung der Unsicherheit
- Zuverlässigkeit
- Kommensurabilität
- Kollokiertheit

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

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



## 1.7.1 Struktur von Sensorsystemen



## 1.7.1 Struktur von Sensorsystemen

---

### **Sensor** (Aufnehmer)

- Bindeglied zwischen Umwelt und Sensorsystem
- Transformation der physikalischen Größe in (elektrisches) Signal
- Physikalischer Effekt mit bekanntem Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangssignal:
  - Mathematisch einfach modellierbar (z.B. linear)
  - Evtl. Abhängigkeiten von Störgrößen

### **Signal-/Datenaufbereitung** (Konvertierung)

- Vereinfachung des weiteren Verarbeitungsprozesses, z.B.
  - Frequenzverschiebung
  - Zerlegung des Signals in der Zeit
  - Analog-zu-Digital- (A/D-) Wandlung

## 1.7.1 Struktur von Sensorsystemen

---

### **Signal-/Datenverarbeitung** (Vorverarbeitung und Merkmalsextraktion)

- Selektion und Isolation der charakteristischen Signalbestandteile, z.B.
  - Transformationen vom Zeit-/Ortsbereich in einen korrespondierenden Frequenzbereich (z.B. Fourier-Transformation)
  - Filterung im Zeit-/Orts- oder Frequenzbereich (z.B. Kantenfilter in Bildern)

### **Signal-/Datenauswertung** (Klassifikation/Entscheidung)

- Abstraktion der zuvor gewonnenen Daten/Merkmale
- Klassifikationsverfahren: siehe Vorlesung Mustererkennung, z.B.
  - Detektion (Vorhandensein eines Objekts/Ereignisses)
  - Identifikation (Zuordnung eines Objekts/Ereignisses zu einer bestimmten Klasse)
  - Parameterschätzung: Zustandsvektoren (z.B. Ort, Geschwindigkeit)
  - Objektverfolgung

## 1.7.1 Struktur von Sensorsystemen

---

### Ausgabeaufbereitung

- Aufbereitung und Anpassung der Daten/Merkmale/Entscheidungen für weitere Verarbeitung/Auswertung, z.B.
  - Puffern (getriggerte Ausgabe)
  - Konvertierung (z.B. Multiplexen)
  - Koordinatentransformation

### Ausgabe des Sensorsystems

- Abhängig von Sensierungsaufgabe und erreichtem Abstraktionsgrad, z.B.
  - Ein- oder höherdimensionale Funktion (meist zeitdiskret)
  - Zustandsvektoren (z.B. Positions- und Geschwindigkeitenparameter)
- Spezifikation der Unsicherheit

### Sensierungsanforderung, Zusatzinformationen

- Befehle und Parameter zur Steuerung des Sensors (z.B. Trigger, Beobachtungsparameter) und der Signalverarbeitung/-auswertung im Sensorsystem (z.B. Filterparameter)

### 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**

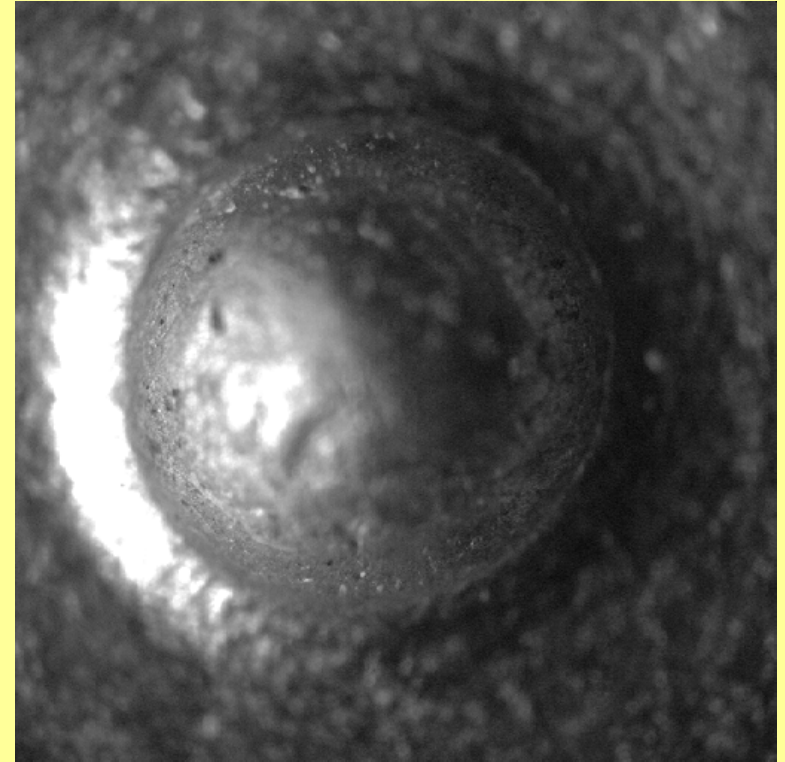
- Falls gewünschte Information über Szene nicht in Einzelaufnahme erlangbar ist, z.B. aufgrund
  - Objekteigenschaften (Zugänglichkeit, Reflexionsverhalten)
  - Kameraeigenschaften (Schärfentiefe, Dynamik, Auflösungsvermögen)
- **Variation** der relativen Kameraposition, der Beleuchtung usw., so dass 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

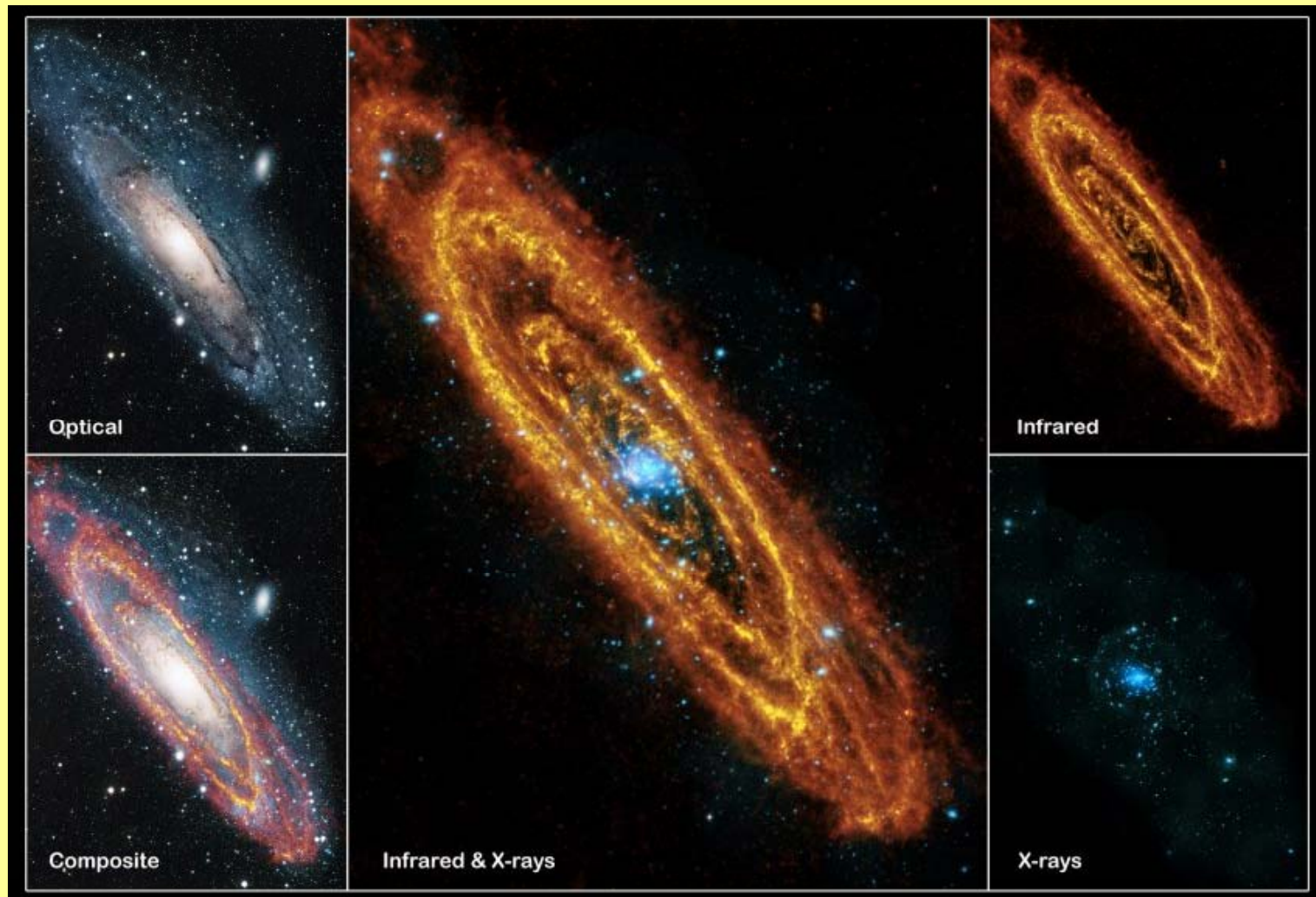
Variation des Aufnahmeabstands



## 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

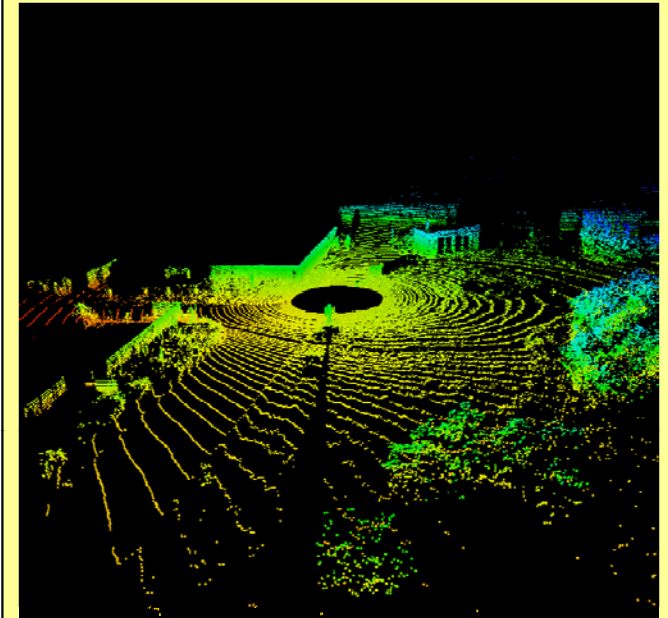
- Hilfsenergie wird vom Sensorsystem geliefert
- Manipulation der Umwelt, um ein physikalisches Phänomen herbeizuführen
- Aktives Modul: Energiewandler
- Tendenziell geringe Genauigkeit erreichbar

### 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.infracoretraining.de](http://www.infracoretraining.de)

## 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:

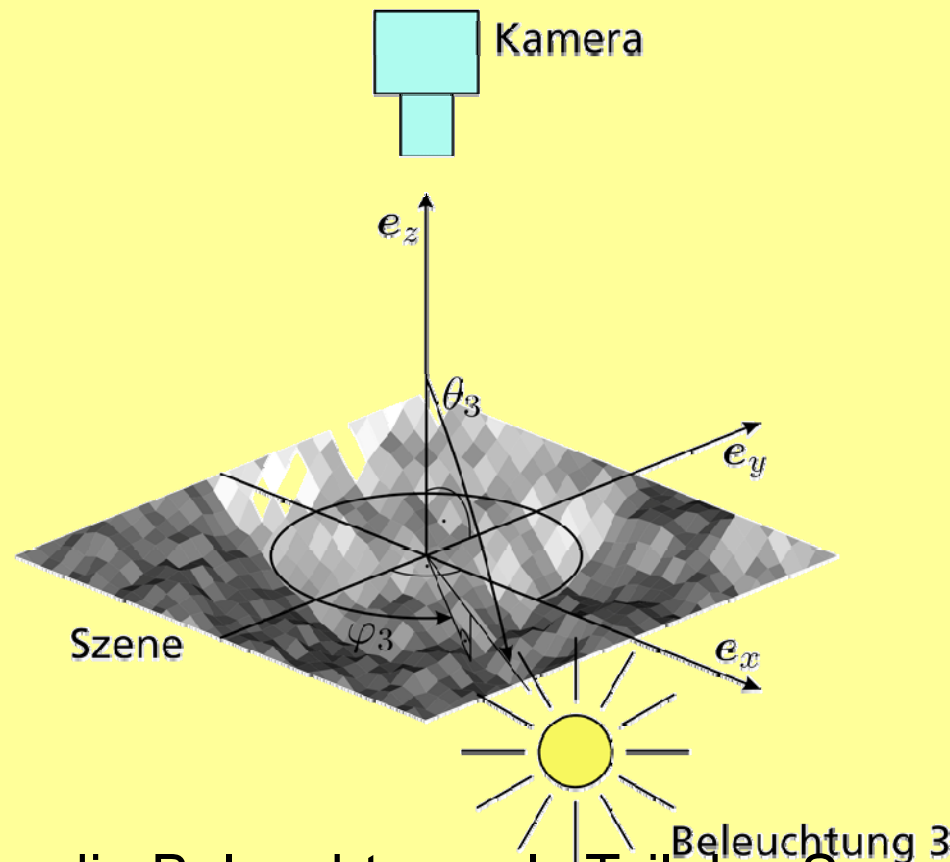
- Stationäre Kamera, die mehrere Aufnahmen macht
- RGB-Kamera: Unterschiedliche spektrale Empfindlichkeit

- 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



- 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.