



FAHRERASSISTENZ &  
INTEGRIERTE SICHERHEIT

**VOLKSWAGEN**  
AKTIENGESELLSCHAFT



---

Sicherheit durch Fahrerassistenz 2010

# Ein Structure and Motion Ansatz zur Umfeldrekonstruktion in komplexen Fahrzeugumgebungen

Wojciech Derendarz, Thorsten Graf  
Volkswagen AG

Friedrich M. Wahl  
TU Braunschweig, Institut für Robotik und Prozessinformatik

München, 16.04.2010

ELEKTRONIK & FAHRZEUG

# Inhalt

1. Motivation und Ziele
2. Structure and Motion
3. Implementierung des Ansatzes
4. Aktueller Stand und Ergebnisse
5. Zusammenfassung
6. Ausblick

## Motivation

Fahrzeuge werden zunehmend mit Kamerasystemen ausgestattet

- Rückfahrkamera
- Fahrstreifenerkennung / Verkehrszeichenerkennung / Intelligentes Licht
- 360°-View Systeme

Statische Elemente des Fahrzeugumfeldes sind für viele Funktionen essentiell

- Randbebauung, Leitplanken  $\Rightarrow$  Baustellenassistenz
- Parkende Fahrzeuge, Bordsteinkante  $\Rightarrow$  Einparkfunktionen

Bedarf an kostengünstigen Lösungen

- Mehrfachnutzung der vorhandenen Sensorik erwünscht

## Zielsetzung

Umfeldrekonstruktion mit einer vorausschauenden Monokamera

- Klassifikation: befahrbar / nicht befahrbar

Einpark- und Rangierszenarien im Hauptfokus

- Geschwindigkeit < 30 km/h
- Sichtbreite vor Sichtweite  
⇒ Weitwinkelige Kameras

Seriennahe Kameras

- Auflösung: 640x480
- Optik: Presslinse mit 185° FOV



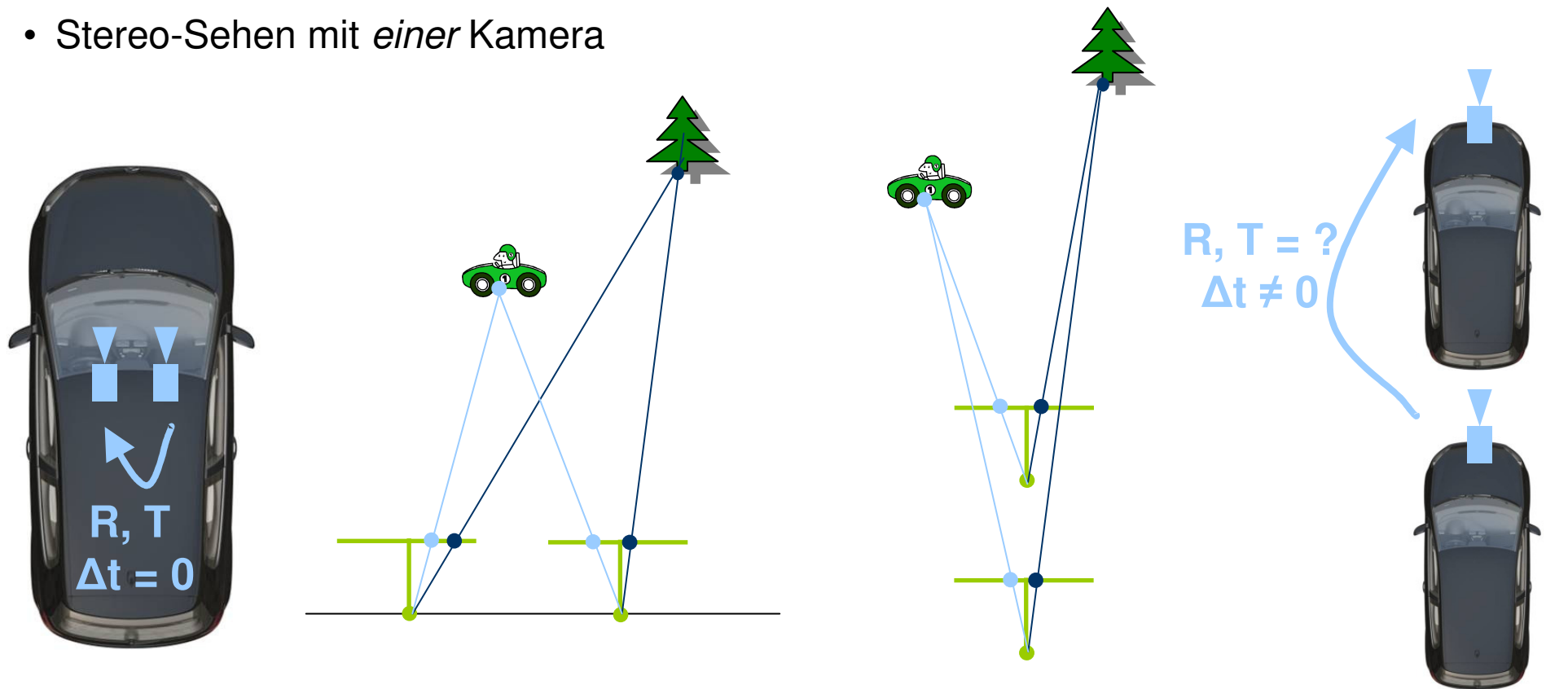
Integration der Kamera im Fahrzeug



# Structure and Motion

Structure from Motion (SfM), Structure and Motion (SaM), Bewegungs-Stereo

- Stereo-Sehen mit *einer* Kamera

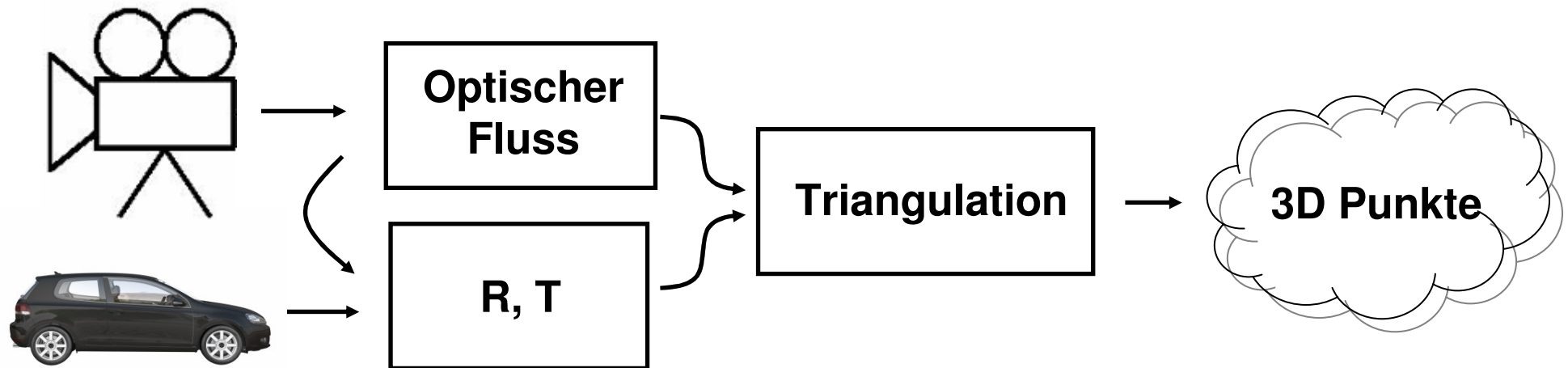


Schematische Darstellung der 3D Rekonstruktion mit einer Stereo-Kamera

Schematische Darstellung der 3D Rekonstruktion mit Structure and Motion

## Structure and Motion

- Punkt-Tracking / Optischer Fluss als Basis der Messung
- Bewegung der Kamera aus der Fahrzeugodometrie oder aus dem optischen Fluss - visuelle Odometrie
- 3D Rekonstruktion durch Triangulation der Sichtstrahlen



Schematische Darstellung des Structure and Motion Verfahrens

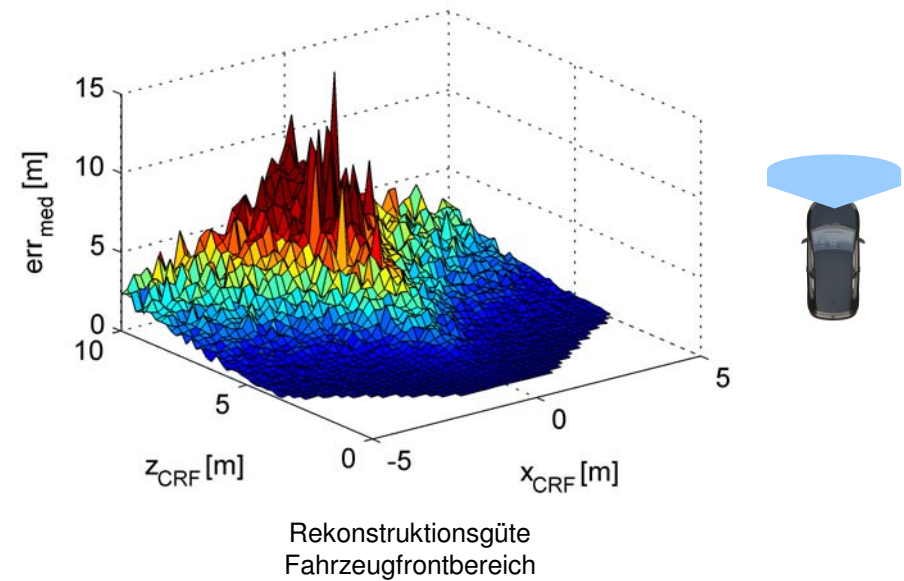
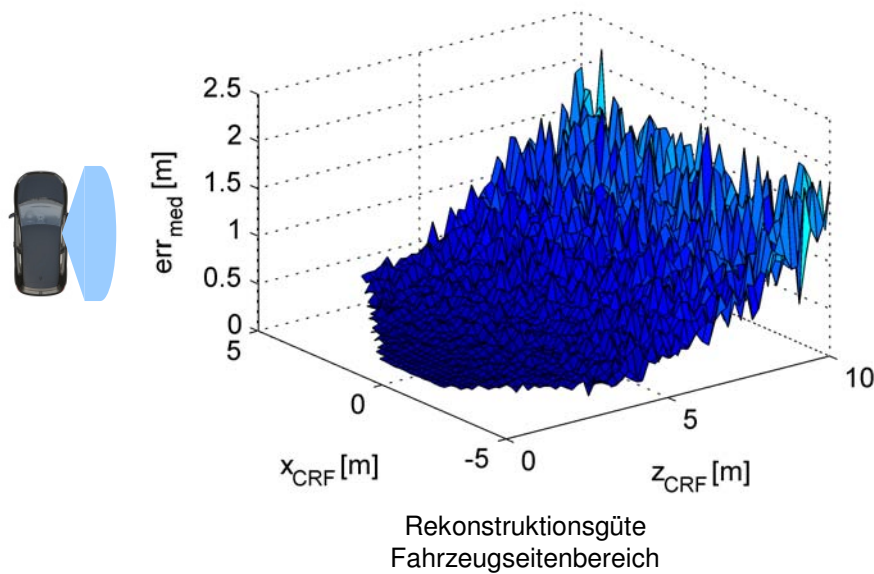
## Structure and Motion

Mono  $\neq$  Stereo

- Bewegte Objekte können zu Mehrdeutigkeiten führen

Genauigkeit des Verfahrens hängt von der Ausrichtung der Kamera ab

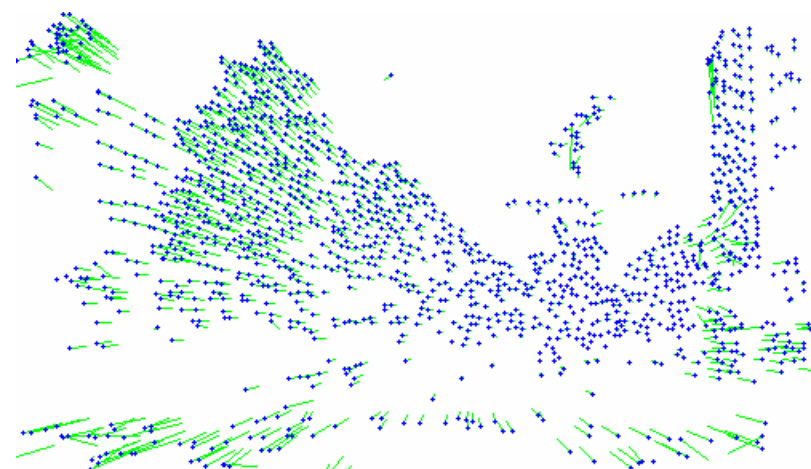
- „Toter Winkel“ bei der Rekonstruktion mit Blick in Fahrtrichtung



## Implementierung des Ansatzes

### Punktverfolgung

- Optischer Fluss nach Lucas-Kanade als Basis
- Verkettung der Flussvektoren
- Bis zu 2000 Features im Tracker
- Normalisierung der Bildintensität



Kamerabild aus einer Stadtsequenz und das dazugehörige Flussfeld. Endpunkte der Flussvektoren sind in blau markiert



## Implementierung des Ansatzes

### Ego-Bewegungsschätzung

- Bewegung der Kamera lässt sich mit Hilfe der Epipolargeometrie modellieren

$$x_2^T F x_1 = 0$$

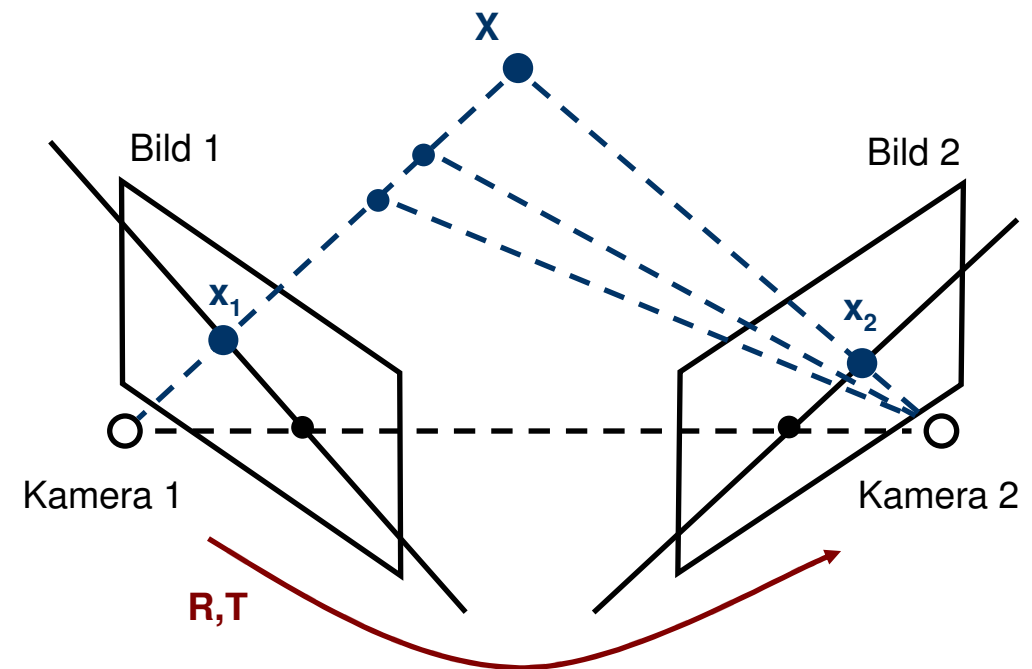
$$F = C^{-T} [T]_x R C^{-1}$$

$x_1, x_2$  : Punktkorrespondenzen

$F$  : Fundamentalmatrix

$C$  : Kalibriermatrix

$R, T$  : Bewegung der Kamera

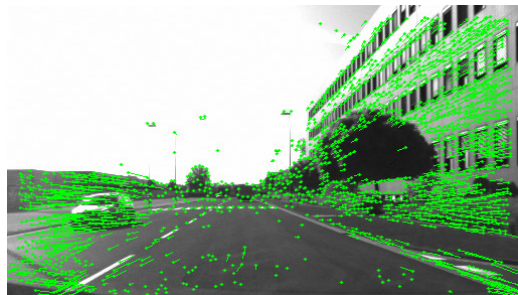


Schematische Darstellung der Epipolargeometrie

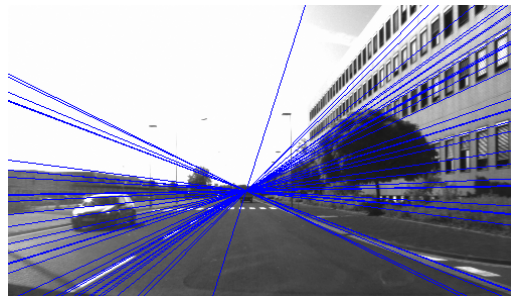
## Implementierung des Ansatzes

### Ego-Bewegungsschätzung

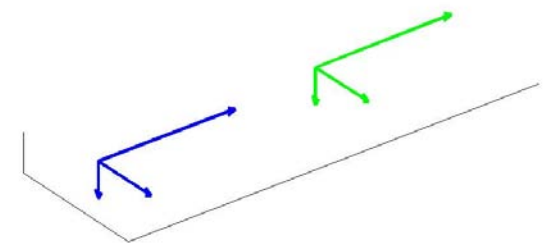
- 8-Punkt Algorithmus für die Berechnung der Fundamental-Matrix
- Extraktion der Rotation und Translation mit Hilfe der Singular-Wert-Zerlegung
- Fahrzeuggeschwindigkeit wird für den Skalierungsfaktor verwendet



Optischer Fluss als Basis der Schätzung



Rekonstruierte Epipolargeometrie; hier Epipolarlinien

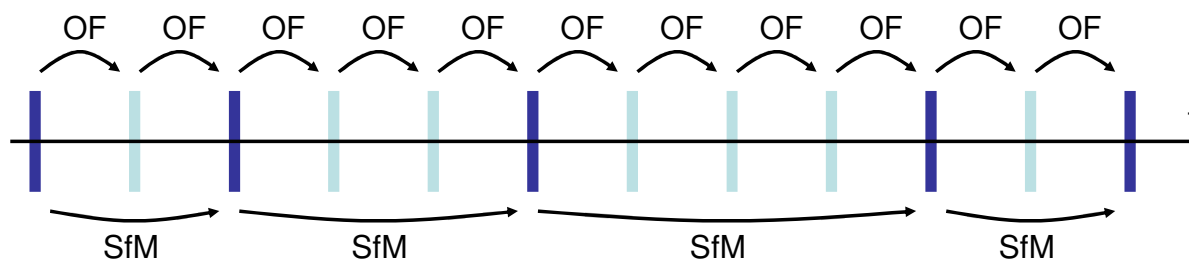


Rekonstruierte Kamerabewegung

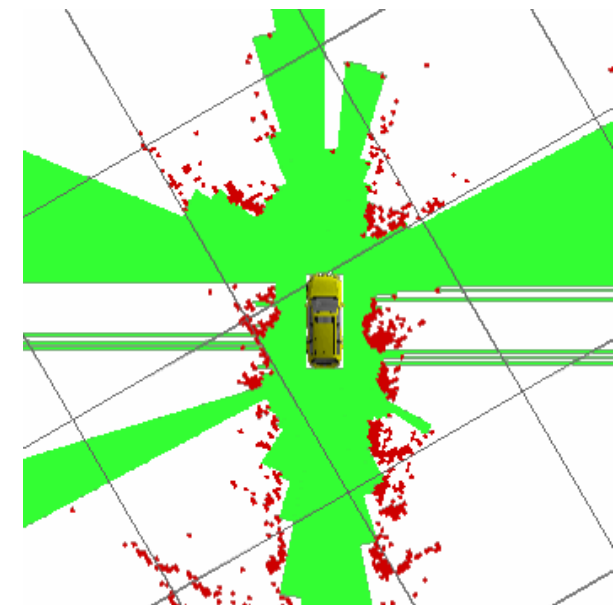
## Implementierung des Ansatzes

### 3D-Rekonstruktion

- Basisbreiten-Kriterium
- Triangulation der Sichtstrahlen mit Hilfe des *Direct Linear Transformation* Algorithmus
- 3D Punkte  $\Rightarrow$  Belegungskarte
- Klassifikation: Freifläche / Hindernis



Basisbreiten-Kriterium: Optischer Fluss (OF) wird durchgängig berechnet, für Triangulation (SfM) ist ein minimaler Abstand zwischen zwei Bildern erforderlich

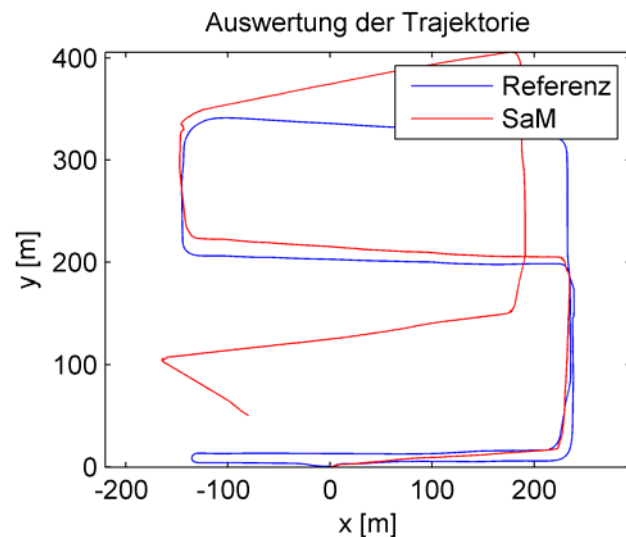


Segmentierung des Fahrzeugumfeldes in Hindernisse (dunkelrot) und Freiflächen (hellgrün)

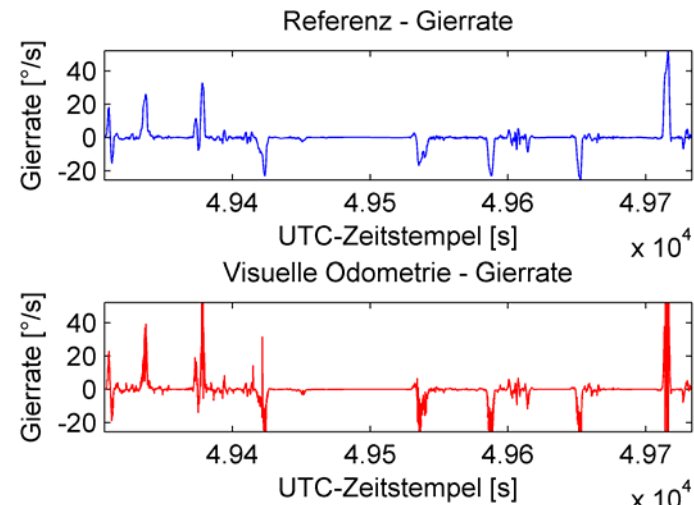
# Aktueller Stand und Ergebnisse

## Visuelle Odometrie

- Schätzung des Gier-, Nick- und Wankbewegung des Fahrzeuges
- Gute Ergebnisse auch in anspruchsvollen Szenarien
- Verbesserungspotential bei Robustheit



Vergleich Fahrtrajektorie Ground-Truth mit visueller Odometrie (SaM)

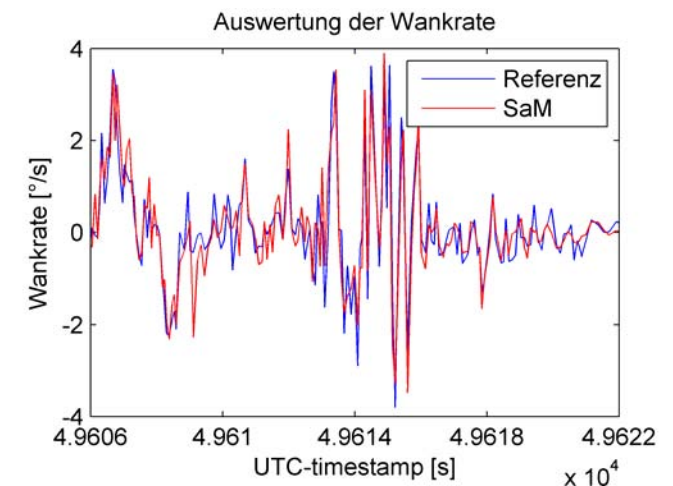
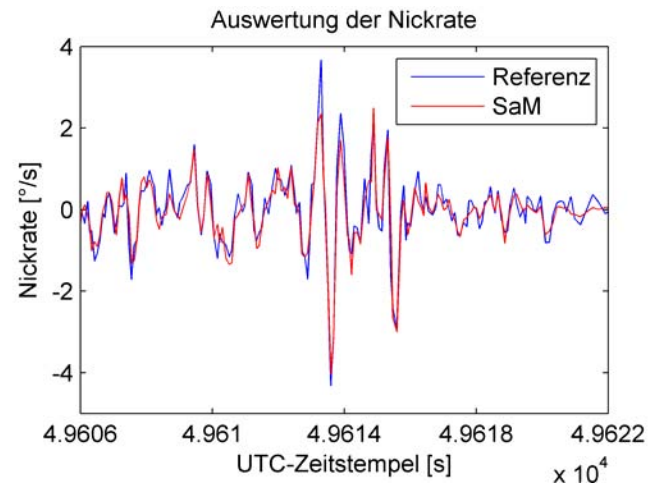
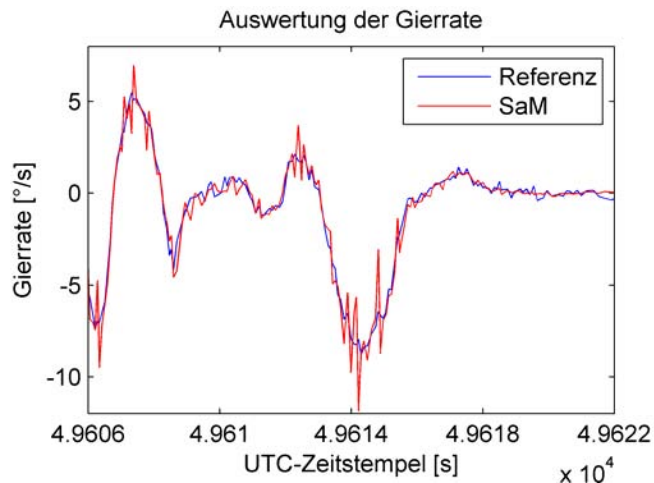


Vergleich Gierrate Ground-Truth und visuelle Odometrie (SaM)

## Aktueller Stand und Ergebnisse

### Visuelle Odometrie

- Schätzung des Gier-, Nick- und Wankbewegung des Fahrzeuges
- Gute Ergebnisse auch in anspruchsvollen Szenarien
- Verbesserungspotential bei der Robustheit

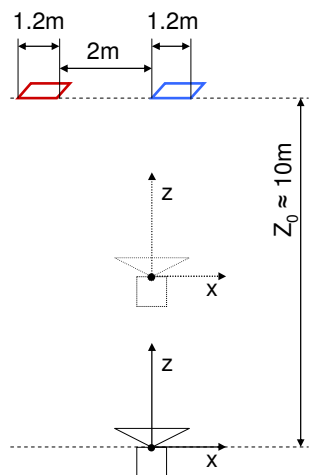


Schätzung der Gier-, Nick- und Wankbewegung des Fahrzeuges

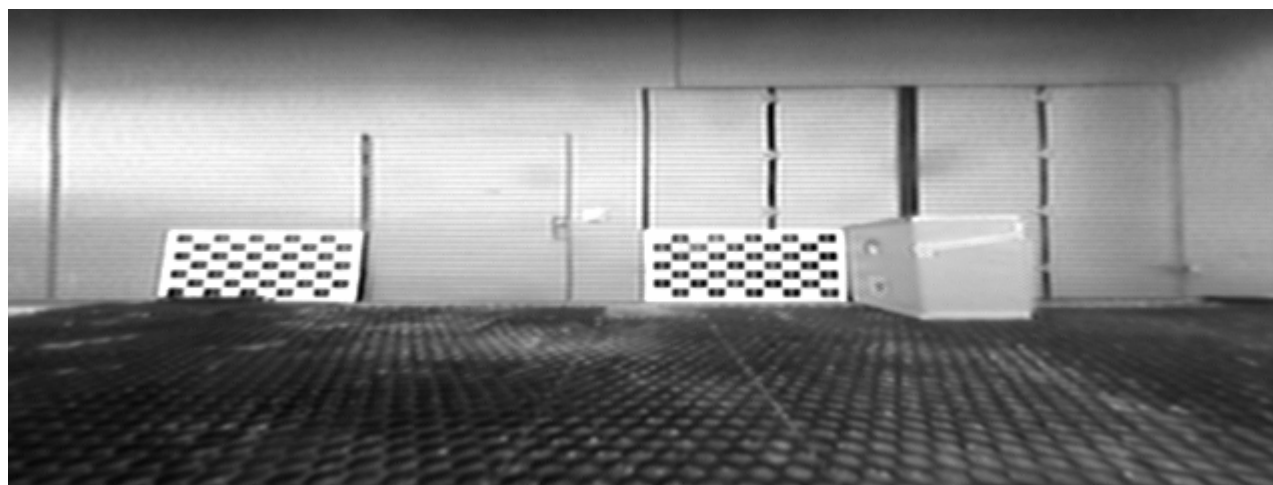
## Aktueller Stand und Ergebnisse

### Umfeldrekonstruktion - Referenzmessung

- Das Fahrzeug fährt auf zwei Zielobjekte zu
- Das rechte Objekt ist im „toten Winkel“ der Kamera positioniert
- Entfernung zu den Objekten wird geloggt („Ground truth“)
- Mittelwert der SfM Messung für beide Zielobjekte wird gebildet



Test-Setup schematisch dargestellt

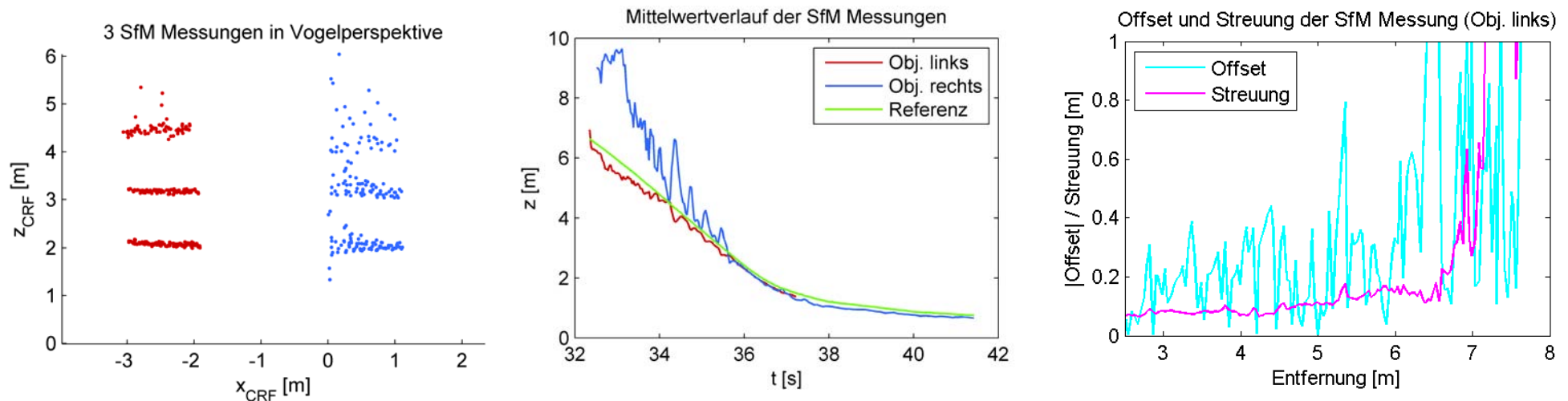


Zielobjekte aus der Kameraperspektive

# Aktueller Stand und Ergebnisse

## Umfeldrekonstruktion - Referenzmessung

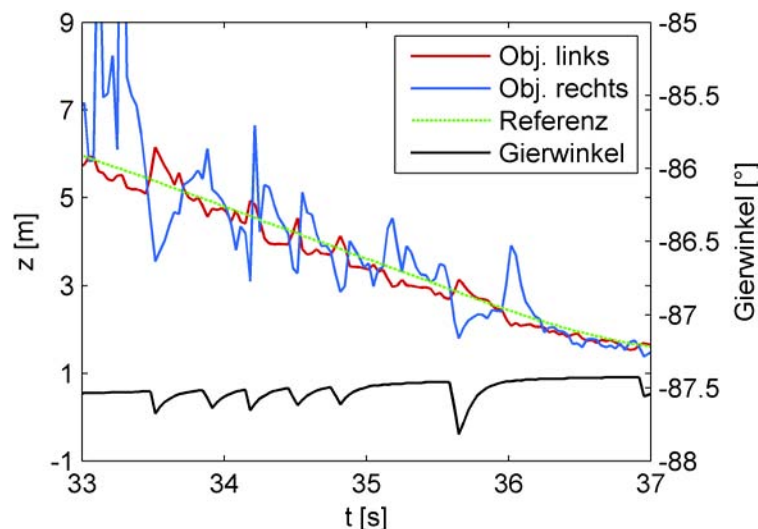
- Das linke Zielobjekt wird erwartungsgemäß deutlich besser rekonstruiert
- Geringe Ortsauflösung der Kamera schränkt die Reichweite des Systems ein (bis 7m)
- Streuung ist deutlich geringer (<10cm) als Offsetfehler  
⇒ Ungenauigkeiten bei der Odometrie



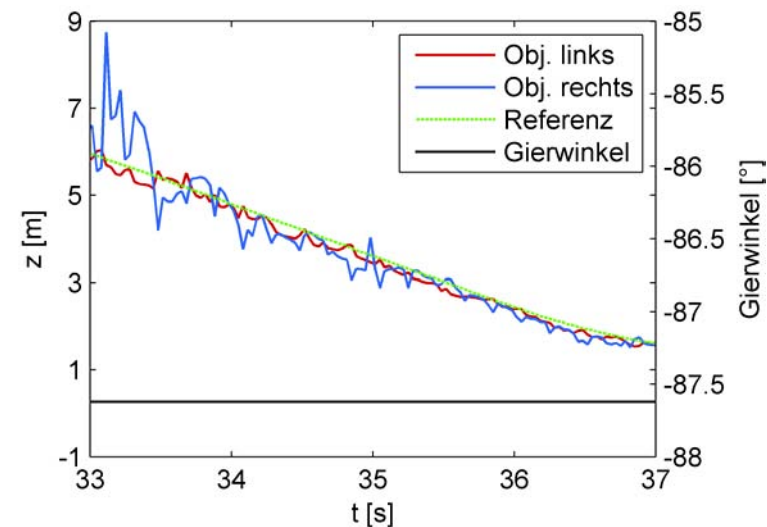
## Aktueller Stand und Ergebnisse

### Umfeldrekonstruktion - Referenzmessung

- Kleine Fehler in der Odometrie führen zu großen Sprüngen in den 3D Messungen  
 ⇒ Erhöhung der Robustheit und Genauigkeit durch eine Kombination der Fahrzeugodometrie mit der visuellen Odometrie möglich



3D Rekonstruktion auf Basis der Fahrzeugodometrie



3D Rekonstruktion auf Basis einer idealisierter Fahrzeugodometrie



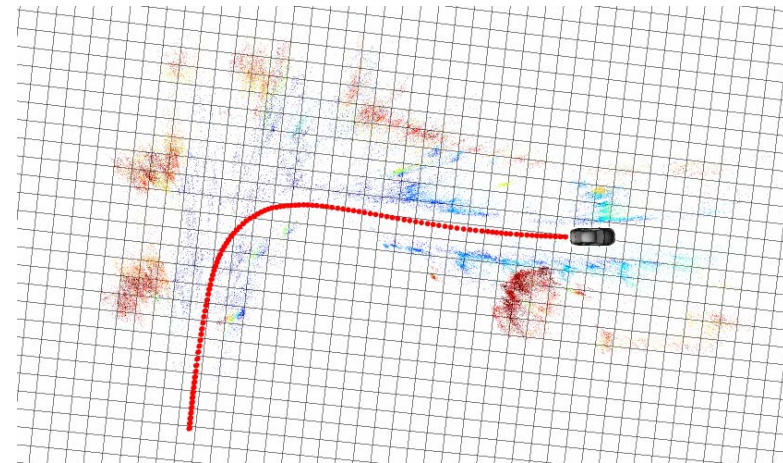
## Zusammenfassung

Monokamerabasierte Umfeldrekonstruktion zeigt hohes Potential

- Erkennung von Randbebauung
- Vermessung der Parklücken

Visuelle Odometrie

- ein wichtiges Teil des SaM Verfahrens
- ein attraktives Nebenprodukt



## Ausblick

Kombination der visuellen Eigenbewegungsschätzung mit der Fahrzeug-Odometrie

- Verbesserung der Genauigkeit und der Robustheit

Dichte 3D Rekonstruktion

- FPGA Hardwarebeschleunigung für den Optischen Fluss

Erweiterung der Algorithmen auf Mehr-Kamera-Systeme

- Frontkamera + Rückfahrkamera
- 360°-View Systeme

