

# Projektbericht

## Hybride Sensorik im Einsatz unter Tage

### Ausgangssituation

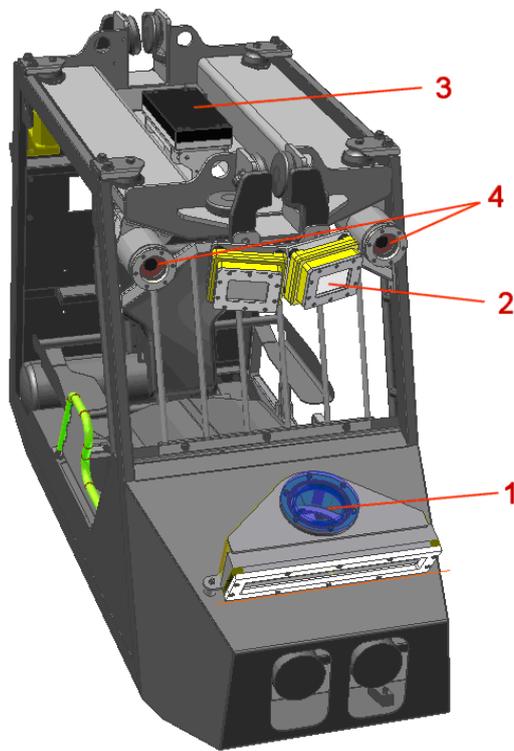
Im Rahmen eines Forschungs- und Entwicklungsprojekts der RAG Deutsche Steinkohle AG entwickelte das Fraunhofer IML zusammen mit Partnern aus der Industrie für den untertägigen Materialtransport in Bergwerken das Transportsystem »Automatisierte Dieselkatze«. Hierzu wurden ein vorhandenes Einschienen-Hängebahn Fahrzeug (Dieselkatze) als Prototyp sowie eine Strecke auf der 7. Sohle des Bergwerks Ost in Hamm mit folgenden Komponenten ausgerüstet:

- Funk-Netzwerk (WLAN) zur Kommunikation von Fahraufträgen, Statusmeldungen, Maschinen- und Videodaten zwischen Leitstand (über Tage) und Fahrzeug
- Positions-Erfassungssystem zur Ortung der Fahrzeuge im Streckennetz
- Sensorik zur Überwachung des Fahrwegs

Die erforderlichen Komponenten (Rechner, Sensoren, Kameras etc.) wurden im Rahmen des Projekts an die Anforderungen für den Einsatz im Bergbau angepasst und gemäß der ATEX Richtlinien für den Schlagwetterschutz zugelassen.



**Abb. 1: Automatisierte Dieselkatze im Einsatz auf Bergwerk Ost**



**Abb. 2: Ausrüstung der Automatisierten Dieselkatze**  
**1: Laser-Scanner – 2: Radar-Sensoren – 3: RFID-Lesegerät – 4: Video-System**

### Sensorik zur Fahrweg erfassung

Grundlegende Zielsetzung der Fahrweg erfassung ist das zuverlässige Anhalten des Fahrzeugs beim Erkennen eines Hindernisses innerhalb definierter Schutzbereiche. Aufgrund der unter Tage herrschenden Bedingungen wird die Hinderniserkennung redundant konzipiert. Die Sensor-Systeme **Radar** und **Laser** arbeiten dazu unabhängig voneinander, sodass bei Ausfall eines Systems im Notbetrieb mit dem jeweils anderen System weitergefahren werden kann. Zudem sollen sich die Systeme in ihren individuellen Stärken und Schwächen ergänzen.

Die Stärke des Radar-Sensors ist in diesem Zusammenhang der robuste mechanische Aufbau (keine beweglichen Teile), die geringe Baugröße und die geringe Anfälligkeit gegen Verschmutzung. Die Messgenauigkeit ist dagegen geringer als die des Laser-Scanners. Hier liegt die Stärke des Laser-Scanners, der die Umgebung sehr genau erfasst. Aufgrund des rotierenden Laserkopfes ist beim Laser-Sensor die mechanische Robustheit als geringer einzustufen. Außerdem ist prinzipiell mit einer im Vergleich zum Radar-Sensor höheren Empfindlichkeit gegen Verschmutzung zu rechnen. Während der Erprobungsphase wurden allerdings keine Ausfälle oder nennenswerte Störungen durch Verschmutzung beobachtet.

Die an den Fahrer kabinen angebrachten Sensoren zur Fahrweg erfassung verhindern im automatischen Fahrbetrieb die Kollision der Dieselkatze mit anderen Transportmitteln sowie mit Gegenständen und Personen, die sich im Fördertrum befinden. Ziel ist es, das vom Zugverband befahrene Lichtraumprofil (LRP) einschließlich der in der EHB-Richtlinie festgelegten Sicherheitsabstände seitlich und unterhalb des Zuges ständig zu überwachen. Hindernisse innerhalb des LRP - Gegenstände oder Personen - müssen so rechtzeitig erkannt werden, dass der Dieselkatzenzug aus der im betreffenden Streckenabschnitt jeweils größten zulässigen Geschwindigkeit und mit der größten zulässigen Beladung sicher abgebremst werden kann, ohne dass es zu einer Kollision mit dem Hindernis kommt.

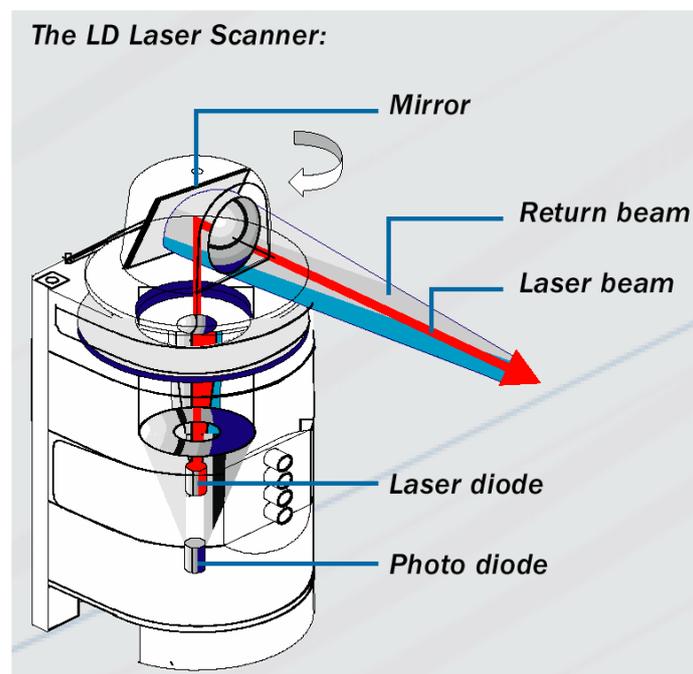
Die Sensorik arbeitet analog zur Arbeitsweise des Fahrers, der die Profilverfreiheit im Bereich der Fahrer kabine visuell erfasst und bei Annäherung an ein Hindernis die Geschwindigkeit reduziert bzw. das Fahrzeug anhält. Dazu wird der von der Sensorik überwachte Raum in einen *Schutzraum* und einen *Warnraum* unterteilt.

Die Ausrüstung der Automatisierten Dieselkatze umfasst zwei unterschiedliche Sensor-Systeme zur Überwachung des Fahrwegs. An den beiden Fahrer kabinen sind je ein Laser-Scanner und zwei Radar-Sensoren montiert, deren Messwerte jeweils von einem Industrie PC, der sog. *Sensor Fusion Unit* (SFU)

verarbeitet werden. Der *Laser-Scanner* sendet nach dem Einschalten 15 mal pro Sekunde einen Messwert-Satz über eine CAN Bus Schnittstelle an die SFU; dieser Satz enthält für jeden Winkelschritt innerhalb des Sensor-Sichtfeldes die Entfernung des nächsten Objektes, das den Laserstrahl reflektiert hat (*Scan-Profil*). Aus Winkel und Entfernung errechnet die SFU die Position in Bezug auf das Fahrzeug und prüft, ob sich ein Objekt innerhalb eines definierten Überwachungsfeldes befindet. Die beiden *Radar-Sensoren* senden nach dem Einschalten der Versorgungsspannung jeweils alle 40 ms bis zu zehn Messwert-Sätze über eine zweite CAN Bus Schnittstelle an die SFU. Jeder Messwert-Satz enthält Entfernung, Sichtwinkel, Geschwindigkeit und Signal-Amplitude eines Objektes, das der Sensor in seinem Sichtfeld erkannt hat. Daraus wird in der SFU die Position dieser Objekte in Bezug auf das Fahrzeug berechnet und auch hier geprüft, ob sich ein Objekt innerhalb des Überwachungsfeldes befindet.

### Laser-Scanner

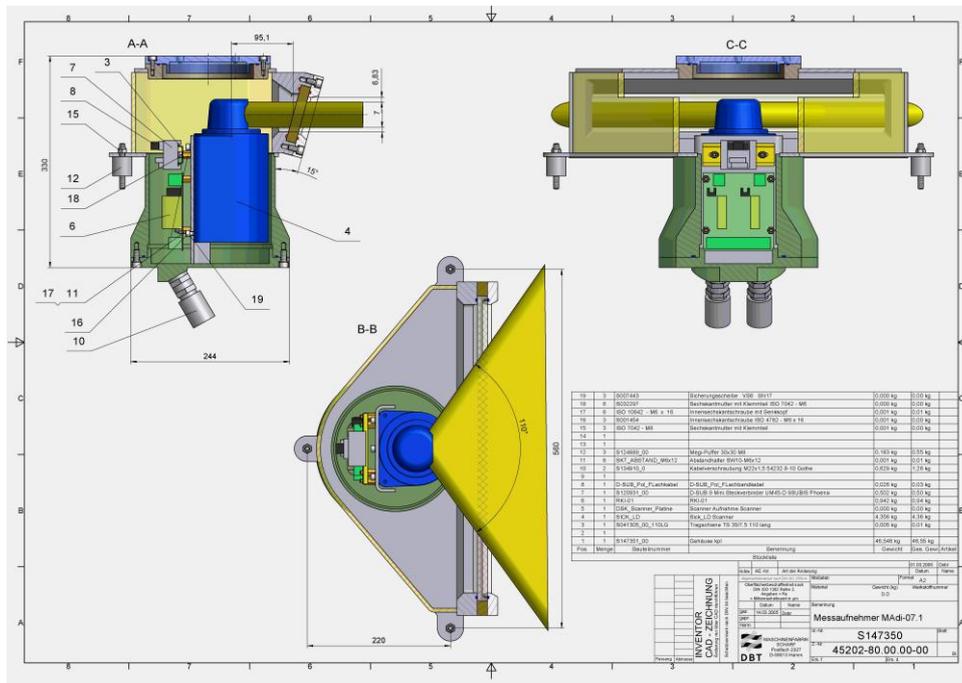
Für die Fahrwegerkennung der Automatisierten Diesellokomotive werden Laser-Scanner des Herstellers SICK AG, Typ LD OEM verwendet. Ein Laser-Scanner ist ein elektro-optischer Sensor, der mit Hilfe von Laserstrahlen berührungslos den Umriss seiner Umgebung in einer Ebene abtastet. Trifft ein Messstrahl auf ein Objekt, wird die Position in Form von Strecke und Richtung ermittelt.



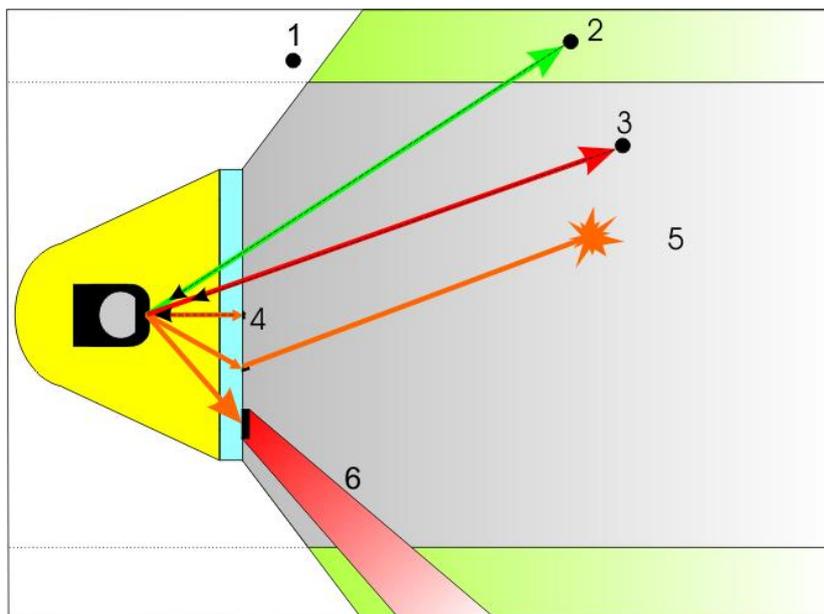
**Abb. 3: Schematischer Aufbau des SICK LD Laser-Scanners**

Aufgrund der drehenden Rotorwelle des Scanners erfolgt der Schlagwetterschutz des Laser-Scanners in der Zündschutzart »d« (druckfeste Kapselung). Das für diese Schutzart konzipierte Gehäuse ist im Bereich des Strahlaustrittes mit einer Schutzscheibe versehen. Dabei ist zu beachten, dass bei einer senkrechten Anordnung der Schutzscheibe eine Blendwirkung durch die Reflexion des Strahles auf der Innenseite der Scheibe eintritt. Aufgrund von Herstellerempfehlungen und Versuchen wurde daher eine Neigung der Scheibe um  $15^\circ$  zur optischen Achse gewählt.

Der eingehauste Laser-Scanner wurde unter der Bezeichnung *Messaufnehmer MADI-07*.\* vom Hersteller *DBT Maschinenfabrik Scharf GmbH* zugelassen. Der Einbau des Laser-Scanners in ein Schlagwetter geschütztes Gehäuse bedingt eine Einschränkung des Scan-Bereichs auf einen Sektor von ca.  $120^\circ$ .



**Abb. 4: Laser-Scanner mit Gehäuse in Schutzart *Druckfeste Kapselung***



**Abb. 5: Erfassungsbereich des Laser-Scanners im Schlagwetter geschützten Gehäuse**

Abb. 5 zeigt, wie der Sensor auf Objekte an verschiedenen Positionen innerhalb der Scan-Ebene reagiert:

1. Objekte außerhalb des Scan-Bereichs werden nicht erkannt, hier liegen keine Messwerte vor.
2. Objekte außerhalb der Überwachungsfelder werden erkannt und können in der Visualisierung angezeigt werden.
3. Objekte innerhalb der Überwachungsfelder werden erkannt; bei einer Verletzung des Warnfelds wird ein Signal »Schleichfahrt«, bei Verletzung des Schutzfelds ein Signal »Stopp« an die Maschinensteuerung gemeldet.
4. Einzelne Schmutzpartikel direkt auf der Scheibe (Innen- oder Außenseite) führen zu einer Reflexion, die vom Scanner selbst erkannt wird. Dieser liefert einen ungültigen Messwert (Entfernung »0«).
5. Schmutzpartikel, die vom Scanner selbst nicht erkannt werden, können fehlerhafte Messwerte bewirken (z.B. durch Streuung).
6. Ein zusammenhängender verschmutzter Bereich auf der Scheibe (z.B. Ölfleck) bewirkt einen »blinden Sektor«, innerhalb dessen keine Objekte erkannt werden können.

Aufgabe der nachgeschalteten Software ist es, die Messfehler durch Partikel der Kategorie 5 auszufiltern sowie bei einer zu starken Verschmutzung (6) eine Fehlermeldung zu generieren. Bei extremer Verschmutzung kann prinzipiell die Datenfusion in der SFU so umgeschaltet werden, dass unter bestimmten Randbedingungen allein mit den Messwerten der Radar-Sensoren weitergefahren werden kann.

### Radar-Sensor

Für die Fahrwegerfassung wurde im Rahmen von Voruntersuchungen ein »Short Distance Radar Sensor« Typ SLR C3 des Herstellers *Tyco Electronics MIA-COM* ausgewählt und bei Versuchen über und unter Tage erprobt. Der Sensor wurde ursprünglich für den Automotive Bereich entwickelt und wird z.B. als Einparkhilfe und Rückfahrt-Sensor eingesetzt. Das Gerät ist in der Lage, mehrere Objekte innerhalb eines Abtastbereiches zu erkennen. Dafür ist kein mechanisches Schwenken der Antenne, wie z.B. im Bereich der Flugsicherung, erforderlich.



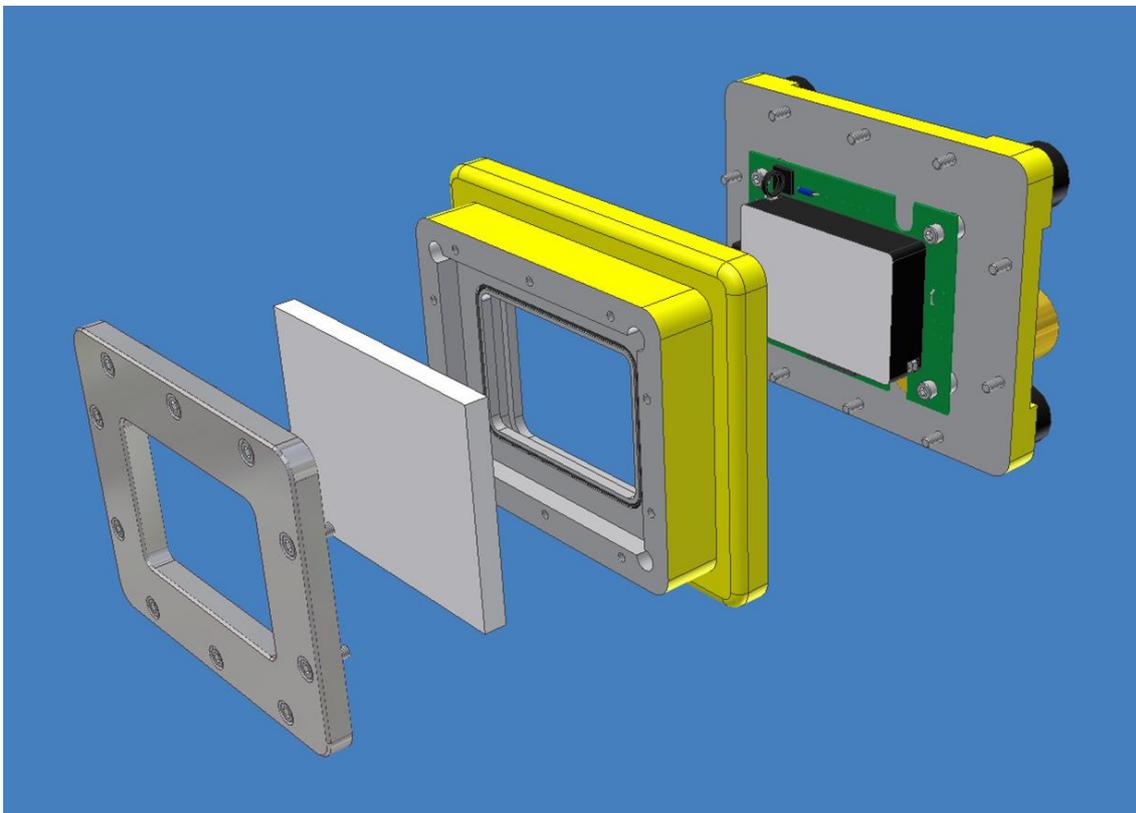
**Abb. 6: Tyco SLR C3 Radar-Sensor**

Der Radar-Sensor ermittelt Informationen über die Lage eines Objektes in seinem Erfassungsbereich, die Objektgeschwindigkeit relativ zum Sensor und die Objektgröße. Dazu sendet der Sensor Hochfrequenz-Pulse im 24 GHz Bereich mit unterschiedlicher Länge aus. Die Entfernung des Objektes wird durch eine Laufzeitmessung zwischen den ausgesendeten und den vom Objekt reflektierten Pulsen ermittelt. Die Objektgeschwindigkeit wird durch den Frequenzunterschied zum reflektierten Puls errechnet (*Doppler-Effekt*). Der verwendete Sensor besitzt eine maximale Reichweite von ca. 30 m. Die Intensität der Rückstrahlung hängt von der Objektgröße und der Entfernung vom Sensor ab. Die für eine erfolgreiche Erkennung erforderliche Ausdehnung des Objektes (*Radar Cross Section RCS* = Rückstrahlquerschnitt) beträgt bei der maximalen Reichweite ca. 10 m<sup>2</sup>. Objekte von der Größe einer Person werden bei einer Reichweite von 7 – 8 m erkannt. Die Intensität der Rückstrahlung ist auch von der Objektausrichtung abhängig. Eine maximale Rückstrahlintensität ergibt sich bei senkrechter Ausrichtung zur Abstrahlrichtung. Bedingt dadurch werden gewölbte oder geneigte Oberflächen prinzipiell schlechter erkannt als ebene Flächen (»Stealth-Effekt«). Bei durchlässigen Objekten (z.B. Kunststoff) können Reflexionen von der Rückwand auftreten. Prinzipiell gut erkannt werden Objekte aus Stahl

und Objekte mit hohem Wasseranteil (d.h. vor allem auch Personen). Im Nahbereich gehen die Reflexionen in verstärktem Maße von Objektkanten aus, so dass »kantige« Gegenstände auch bei einem geringeren Rückstrahlquerschnitt erkannt werden.

Der horizontale Abtastbereich (Azimut) beträgt  $\pm 40^\circ$ . In diesem Bereich liegen Winkel- und Vorzeicheninformationen vor. In einem Azimut-Bereich von bis zu  $\pm 65^\circ$  wird noch die Information »Objekt im Randbereich« und das Vorzeichen des Winkels ausgegeben. Der vertikale Abtastbereich (Elevation) beträgt  $\pm 8^\circ$  (jeweils  $-3$  dB-Grenzen). Der Fehler der Winkelmessung steigt prinzipiell mit der Größe des Azimut-Winkels an ( $2^\circ$  im Winkelbereich  $\pm 5^\circ$  bis  $10^\circ$  im Bereich  $\pm 40^\circ$ ). Für die Fahrwegerfassung erwies sich der paarweisen Einsatz von je zwei Sensoren an jeder Fahrerkabine als optimale Anordnung. Der azimutale Winkelversatz sollte dabei nach Empfehlung des Herstellers maximal  $30^\circ$  betragen. In dieser Anordnung ergibt sich zusammen für beide Sensoren ein Öffnungswinkel von  $110^\circ$  ( $80^\circ$  Azimut pro Sensor +  $30^\circ$  Versatz). Vorteil ist neben der Erweiterung des Öffnungswinkels die Vermeidung von Fehlauflösungen, wenn im Überlappungsbereich die Messwerte der beiden Sensoren mit einer logischen »Und-Verknüpfung« ausgewertet werden.

Eine gegenseitige Beeinflussung zweier Sensoren ist ausgeschlossen. Jeder Sensor erkennt »seine« eindeutige Pulsfolge. Das gilt sowohl für zwei am selben Fahrzeug montierte als auch für an verschiedenen Fahrzeugen montierte Sensoren (Begegnungsverkehr). Eine wechselseitige Beeinflussung zwischen Radar und WLAN bzw. RFID-System ist nach Angabe des Herstellers aufgrund der unterschiedlichen Frequenzbereiche ebenfalls ausgeschlossen und wurde auch während der gesamten Testphase nicht festgestellt.



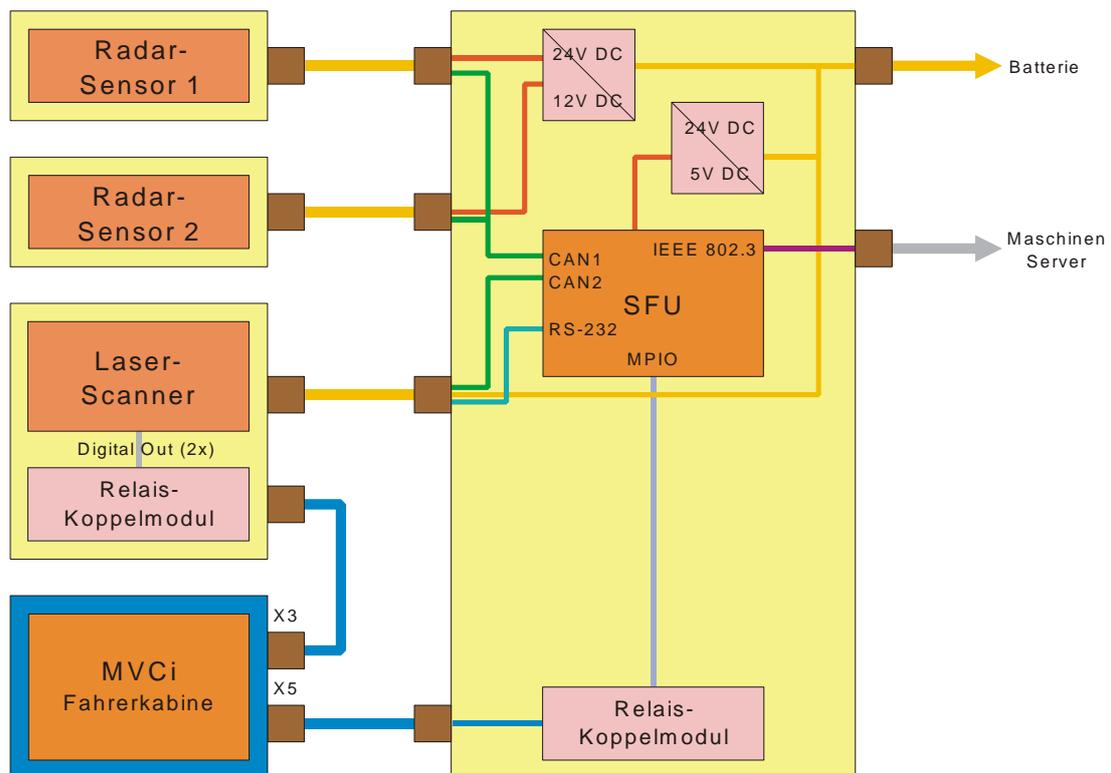
**Abb. 7: Radar-Sensors mit Gehäuse in Schutzart Druckfeste Kapselung**

Für den Radar-Sensor wurde im Rahmen des Projektes ein Gehäuse der Zündschutzart »d« (druckfeste Kapselung) entwickelt. Der eingehauste Radar-Sensor wurde unter der Bezeichnung *Radar-Sensor Typ SLR-001* vom Hersteller *Embigence GmbH* zugelassen.

## Sensorfusionseinheit

Die Messwerte der Fahrwegerfassungs-Sensoren (Laser und Radar) werden zur weiteren Verarbeitung an eine Sensorfusionseinheit (*Sensor Fusion Unit, SFU*) weitergeleitet die folgende Aufgaben übernimmt:

- Umrechnung der Messwerte auf ein gemeinsames Koordinaten-System
- Filtern der Messwerte, Ausblenden von Messfehlern z.B. durch Verschmutzung
- Fusion (logische Verknüpfung) der Messwerte
- Prüfen der Messwerte auf Schutzfeldverletzung
- Überwachung der Sensoren (Funktion, Verschmutzung)
- Kommunikation mit der Fahrzeugsteuerung (MVCi)
- Kommunikation mit dem Maschinenserver, gegenseitige Überwachung
- Speicherung von Messwerten
- Aufbereitung von Messwerten zur Visualisierung

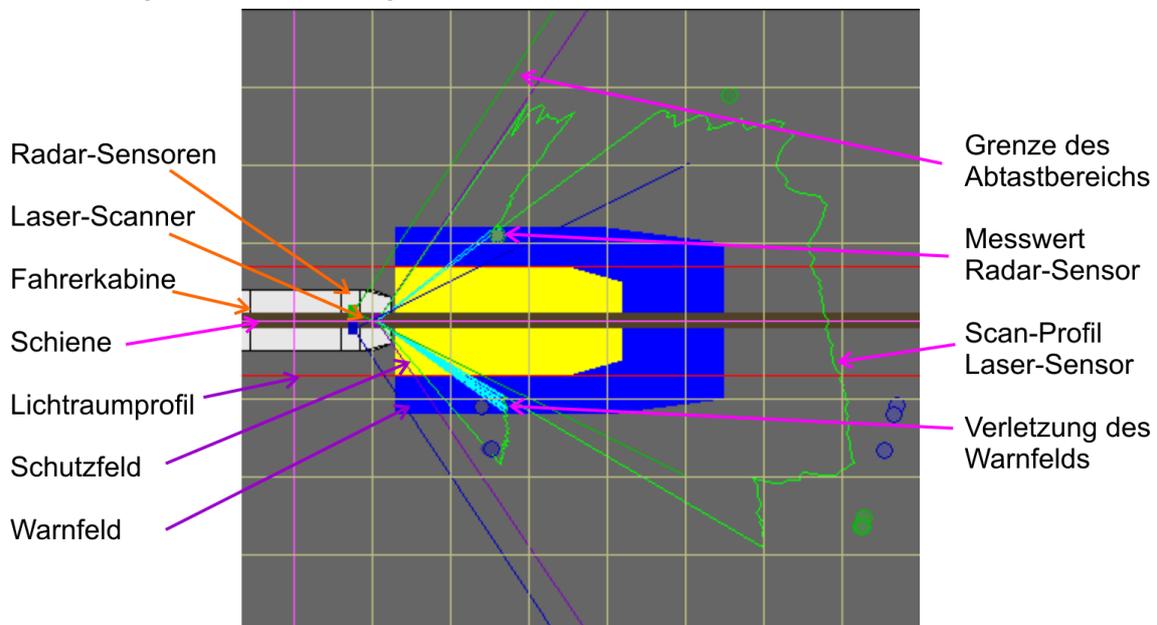


**Abb. 8: Anschlussschema der SFU**

An jedem Fahrzeugende der Automatisierten Dieselkatze befindet sich eine Sensorfusionseinheit. Dieser Rechner (IPC) ist weitestgehend baugleich zu den übrigen Bordrechnern (Maschinenserver, Kommunikations-Gateway). Wegen der für den mobilen Einsatz erforderlichen mechanisch robusten Ausführung enthalten die IPCs keine Festplatten sondern mehrfach wiederbeschreibbare *Flash-Memory* Speicherkarten.

## Fusion der Sensordaten

Der Bereich vor dem Fahrzeug, der für ein sicheres Fahren der unbemannten Maschine frei von Personen und Objekten sein muss, wird als *Überwachungsfeld* bezeichnet. Es wird unterteilt in das eigentliche Schutzfeld bzw. Nahfeld, dessen Größe sich aus dem seitlich und unterhalb der Dieselkatze freizuhaltenen Lichtraumprofil ergibt, und ein vorgelagertes Warnfeld bzw. Fernfeld. Sobald die SFU erkennt, dass einer der Sensoren ein Objekt innerhalb des Fernfelds erkannt hat, wird ein Eingang der Fahrzeugsteuerung auf die Stufe »Schleichfahrt« geschaltet und das Fahrzeug auf Schleichgeschwindigkeit (0,5 m/s) abgebremst. Bei Verletzung des Nahfelds wird der Eingang auf »Stopp« geschaltet und das Fahrzeug wird unmittelbar gestoppt.



**Abb. 9: Scan-Profil und Messwerte der Radar-Sensoren an einer Wettertür (Fahrtrichtung im Bild nach links; Gitterlinien-Abstand: 1 m)**

Abb. 9 zeigt schematisch in einer Draufsicht das Nahfeld (gelb) und Fernfeld (blau) sowie das Scan-Profil (grüne Linie) und die Messwerte der Radarsensoren (grüne bzw. blaue Punkte) bei der Annäherung der Dieselkatze an eine Wettertür von 2,4 m Breite. Die Kontur der Tür-Durchfahrt wird von den Sensoren exakt erfasst und führt bei dem dargestellten Überwachungsfeld zu einer Verletzung des Warnfelds. Die Maschinensteuerung bremst die Katze damit auf Schleich-Geschwindigkeit ab, dabei wird über den Hörzeichengeber ein akustisches Warnsignal abgegeben. Das Nahfeld ist nur so breit dass Objekte außerhalb des eigentlichen Lichtraumprofils (im Bild rote Linien parallel zur Schiene) nicht zur Abschaltung führen.

**Fraunhofer-Institut  
für Materialfluss und Logistik IML**

Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4  
44227 Dortmund

**Ansprechpartner:**

Dipl.-Ing. Heinz Huber  
Telefon +49 231 9743 - 128  
Fax +49 231 9743 - 427

[heinz.huber@iml.fraunhofer.de](mailto:heinz.huber@iml.fraunhofer.de)

© Fraunhofer IML, Stand 18.04.2011