



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Abschlussbericht des BMBF-Projektes : “3D-SIAM“

**3D-Sensorik für vorausschauende Sicherheitssysteme im Automobil**

**Koordination von Teilprojekt 2: Entwicklung von Sender und Optiken**

**Koordination von Teilprojekt 5: Fahrzeugintegration der 3D-Sensorik**

**Mitarbeit in Teilprojekt 1: Systemtechnik**

**Mitarbeit in Teilprojekt 3: PMD-Chip**

Förderkennzeichen 16SV1335

Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2001 – 31.07.2005

Zuwendungsempfänger: **A.D.C.**

**Automotive Distance Control Systems GmbH**  
Kemptener Str. 99  
88131 Lindau / B

**Autor:** *Dr. Joachim Massen*  
Kemptener Str. 99  
D-88131 Lindau / B

*Tel.: 08382-9699-85*  
*FAX: 08382-9699-50*  
*e-Mail: [joachim.massen@adc-gmbh.de](mailto:joachim.massen@adc-gmbh.de)*



**Fachhochschule  
Trier**

## Inhalt

<b>1 Einleitung und Problemstellung des Teilvorhabens .....</b>	<b>3</b>
1.1 Aufgabenstellung .....	3
1.1.1 Teilprojekt 2: Sender und Optiken (Teilprojektleitung A.D.C.) .....	3
1.1.2 Teilprojekt 5: Fahrzeugintegration der 3D-Sensorik (Teilprojektleitung A.D.C.) .....	5
1.1.3 Teilprojekt 1: Systemtechnik für fahrzeugtaugliche 3D-Kameras (Mitarbeit) .....	7
1.1.4 Teilprojekt 3: Ansteuerung des PMD-Chips (Mitarbeit) .....	7
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde .....	8
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens .....	10
1.3.1 Planung des Vorhabens .....	10
1.3.2 Ablauf des Vorhabens .....	14
1.3.2.1 Umstrukturierung .....	14
1.3.2.2 Verlängerung.....	16
1.3.2.3 Wechsel der Projektleitung .....	19
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde:.....	20
1.5 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,.....	21
1.6 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.....	22
1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	24
<b>2 Detaillierte Projektdarstellung .....</b>	<b>25</b>
2.1 Erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens .....	25
2.1.1 Teilprojekt 2: Entwicklung der Sender und Optiken .....	25
2.1.1.1 AP 2.1 Sender-Spezifikation .....	25
2.1.1.2 AP 2.2 Sender-Optik .....	28
2.1.1.3 AP 2.3 Sender-Elektronik.....	34
2.1.1.4 AP 2.4 Sender-Elemente .....	37
2.1.1.5 AP 2.5 Modulationsprinzipien.....	42
2.1.1.6 AP 2.6 Empfangsoptik .....	45
2.1.1.7 AP 2.7 Senderintegration .....	49
2.1.2 Teilprojekt 5: Fahrzeugintegration der 3D-Sensorik.....	58
2.1.2.1 AP 5.1 Aufbau des Versuchsfahrzeugs .....	59
2.1.2.2 AP 5.2 Szenen-Quelldaten.....	65
2.1.2.3 AP 5.3 Software-Integration .....	69
2.1.2.4 AP 5.5 Erprobung Stop&Go .....	70
2.1.3 Teilprojekt 1: Systemtechnik .....	77
2.1.3.1 AP 1.2 Systemkonzept Stop&Go .....	77
2.1.3.1.1 Funktionales Konzept.....	77
2.1.3.1.2 Fahrzeug-Konzept.....	83
2.1.3.1.3 Sensor-Konzept .....	84

2.1.3.2	AP 1.3 Elektrooptische AVT .....	85
2.1.3.3	AP 1.4 Integration S/E-Modul .....	88
2.1.3.4	AP 1.6 Systemintegration Stop&Go .....	100
2.1.4	Teilprojekt 3: PMD-Chip .....	106
2.1.4.1	AP 3.4 3D-Sensorspezifikation.....	106
2.1.4.2	AP 3.8 PMD-Chipsteuerung .....	107
2.1.5	Zusammenfassung und Ausblick .....	108
2.2	Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....	110
2.3	Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen.....	113
2.4	Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	114
2.5	Abbildungsverzeichnis: .....	115
2.6	Tabellenverzeichnis .....	119
2.7	Verzeichnis der Abkürzungen .....	121

# 1 Einleitung und Problemstellung des Teilvorhabens

Moderne Fahrerassistenzsysteme erleben zurzeit ihren Durchbruch in den Markt in Form von „intelligenten Tempomaten“, sogenannten ACC-(Adaptive Cruise Control)-Systemen. Dies sind Fahrzeuglängsregelungssysteme, die auf Autobahnen und Landstraßen, also bei höheren Geschwindigkeiten, automatisch den Sicherheitsabstand halten. Die nahe liegende Erweiterung für den niedrigen Geschwindigkeitsbereich z.B. in Form der sogenannten Stop&Go-Funktion, einer Unterstützung in Stausituationen ist derzeit im Focus des Interesses der Kunden[INV05] und damit auch der A.D.C. GmbH. Der Einsatz von Sensoren in immer komplexeren Verkehrssituationen stellt dabei Anforderungen, die die heutigen Mehrstrahlensysteme, die beispielsweise über eine Anzahl von 3 bis ca. 10 Einzelstrahlen verfügen, nicht mehr erfüllen können. Eine wesentliche Verbesserung wird erst von 3D-Entfernungsbildkameras erzielt, bei denen über die Anzahl der Pixel eine hohe laterale Auflösung erreicht werden kann. Die Beteiligung an der Entwicklung solcher Systeme wie z.B. dem PMD-Sensorsystem, ist somit von höchster Bedeutung für zukünftige Produkte.

Im Rahmen dieses Vorhabens soll ein vorausschauendes, miniaturisiertes, elektrooptisches Sicherheitssystem im Kraftfahrzeug auf Basis eines neuen dreidimensionalen Silizium-Bildaufnehmerkonzeptes mittels gepulster augensicherer Infrarotbeleuchtung entwickelt und in einem Fahrzeug als Versuchsträger auf Brauchbarkeit und Leistungsfähigkeit untersucht werden. Das System soll unter Verwendung von Photonic Mixer Devices (PMD) innerhalb eines Entfernungsbereiches von ca. 40m die zuverlässige Detektion und Klassifizierung von Personen und Hindernissen ermöglichen und somit einen wesentlichen Beitrag zur Steigerung der Sicherheit im Straßenverkehr leisten.

## 1.1 Aufgabenstellung

### 1.1.1 Teilprojekt 2: Sender und Optiken (Teilprojektleitung A.D.C.)

Die Zielsetzung des von der A.D.C. verantworteten Teilprojektes 2 war der Aufbau einer lichtstarken, modulierbaren IR-Beleuchtungsquelle für den Fahrzeugaußenraum. Die Quelle sollte die zum Betrieb eines PMD notwendige Szenenbeleuchtung liefern, innerhalb der von den Funktionen S&G und Precrash beschriebenen Reichweitenanforderung. Die Realisierbarkeit dieser Komponente ist Grundvoraussetzung für den Einsatz des PMD-Sensors. Die genannte Aufgabenstellung wurde auf folgende Arbeitspakete aufgeteilt:

#### AP2.1 Sender Spezifikation

Ziel des Arbeitspaketes war die Ausarbeitung und Spezifikation eines Konzeptes zum Aufbau eines lichtstarken, modulierbaren, automotive-tauglichen IR-Senders unter Berücksichtigung der Augensicherheit sowie den aus der Applikation abgeleiteten Funktionsanforderungen. Die für den Betrieb des



Senders relevanten Parameter waren zu erfassen, hinsichtlich ihrer Machbarkeit zu überprüfen und für die weiteren Entwicklungsschritte mit dem Gesamtsystem abzustimmen. Dies umfasste sowohl die optischen, elektronischen, konstruktiven wie thermischen Parameter.

#### AP2.2 Sender Optik

Aufgabe war der Aufbau einer Optik, die bei Verwendung spezifizierter Sendeelemente unter Berücksichtigung der Augensicherheitskriterien den applikationsspezifischen Beobachtungsraum (Sichtfeld, Entfernung) mit einer zum Betrieb des PMDs (Empfindlichkeit) erforderlichen Leistung homogen ausleuchten sollte.

Die Herausforderung war, die Optik fertigungsgerecht und kostengünstig zu gestalten und sie an die speziellen Anforderungen der automobilen Umgebungsbedingungen wie Temperatur oder Vibration anzupassen und bezüglich der Lebensdauer zu optimieren.

#### AP2.3 Sender Elektronik

Ziel des Arbeitspaketes war die Ansteuerung der Sendeelemente, insbesondere die benötigte hohe Leistung zur Verfügung zu stellen. Besonderes Augenmerk war dabei auf die umgesetzte optische Signalform zu richten. Diese musste entsprechend der in AP 2.1 festgehaltenen Spezifikation die Anforderungen des PMDs erfüllen. Die gesamte Schaltung war hinsichtlich ihrer Emissionen zu optimieren.

Die Produktion einer hohen optischen Ausgangsleistung erfordert eine Leistungselektronik zur Ansteuerung der Sendeelemente. Das optische intensitätsmodulierte Signal musste einen hohen Modulationsgrad aufweisen, verzerrungs- und rauscharm sein und ein geringes Phasenrauschen zeigen. Entfernungsmessungen nach dem Laufzeitprinzip erfordern in der Regel eine hohe Übersprechdämpfung zwischen Sende- und Empfangskanal. Bei den notwendigen hohen Ansteuerströmen im HF-Bereich stellt die Realisierung eines Systems mit niedrigen Emissionswerten eine besondere Herausforderung dar.

#### AP2.4 Senderelemente

Aufgabe des Arbeitspaketes war es, verfügbare Sendeelemente hinsichtlich ihrer Abstrahlungsleistung, ihrer möglichen Modulierbarkeit und ihres Kostenfaktors zu untersuchen, sie nach ihrer Verfügbarkeit zu beurteilen und sie nach ihrer Brauchbarkeit für das PMD auszuwählen. Hierzu waren sie bzgl. ihrer physikalischen Parameter wie z.B. ihrer Temperaturstabilität zu charakterisieren. Die technische Zielsetzung war die Überprüfung des Kostenfaktors, der Automotive-Tauglichkeit, der Lebensdauer und der Gewährleistung der Verfügbarkeit.

#### AP2.5 Modulationsprinzipien

Ziel des Arbeitspaketes war es, ein Modulationsverfahren zu definieren, das eine optimale Datenauswertung durch das PMD garantiert, unter Berücksichtigung der Anforderungen der Applikation wie z.B. der Messauflösung, der Eindeutigkeit der Ergebnisse, der Störsicherheit, der Augensicherheit sowie der Beurteilung der Umsetzbarkeit durch entsprechende Senderelemente. Das definierte Modulationsverfahren ist anschließend mittels eines programmierbaren Bausteins zu realisieren. (siehe AP 3.8)

#### AP2.6 Empfangsoptik

Die Aufgabe war eine auf den PMD-Chip abgestimmte Empfangsoptik zu entwickeln, die gleichzeitig die applikationstypischen Funktionsanforderungen, wie z.B. das Sichtfeld, erfüllt, die in AP 1.1 bzw. AP 1.2 zu definieren waren. Da die Strukturgrößen eines PMD-Chips nicht mit denen herkömmlicher Bildsensoren übereinstimmen und die Priorität anders zu lagern ist, musste davon ausgegangen werden, dass eine optimale Funktion nur durch ein kundenspezifisches Design zu erreichen war. Der Schwerpunkt bei der Entwicklung einer PMD-Optik ist auf die Lichtstärke zu legen, gleichzeitig sollte eine gute Reflexionsfreiheit und eine möglichst geringe Streuung gewährleistet sein, um ein optisches Signalübersprechen zu minimieren und so eine hohe Entkopplung der unterschiedlichen Winkel, d.h. Bildpunkte zu erhalten. Die technische Herausforderung war, die Optik fertigungsgerecht und kostengünstig zu gestalten und sie an die speziellen Anforderungen der automobilen Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Verschmutzung oder Vibration anzupassen.

#### AP2.7 Senderintegration

Ziel des Arbeitspaketes war die Integration der entwickelten Einzelkomponenten in einen funktionsfähigen Sender. Die Ansteuerelektronik war mit den Senderelementen und der Optik in einem Gehäusekonzept so zu verknüpfen, dass neben den technischen Anforderungen auch die Augensicherheitsrichtlinien und die Wärmeableitfähigkeit erfüllt werden konnten. Der Nachweis war durch eine entsprechende Charakterisierung zu erbringen.

### 1.1.2 Teilprojekt 5: Fahrzeugintegration der 3D-Sensorik (Teilprojektleitung A.D.C.)

Das Ziel des Teilvorhabens war es, eine Versuchsplattform zur Verifizierung der Systemfunktionen zur Verfügung zu stellen. Im Zuge der Erprobung sollten Erfahrungen im Zusammenwirken der Einzelkomponenten und der Regelcharakteristik gewonnen werden. Insbesondere bei der Gestaltung des HMIs stellte der Demonstrator eine ideale Versuchsplattform zur Erprobung der Fahrerakzeptanz dar. Zur Dokumentation der Umgebungs- bzw. Verkehrssituationen und der entsprechenden Systemreaktionen sollte das Fahrzeug ausgerüstet werden mit einer Sensor- und Messtechnik zur Aufzeichnung aller Daten. Schwerpunkt des Teilprojektes war es, das Fahrzeug mit einer Bus- und Reglerarchitektur auszurüsten, die eine elektronische Längsregelung bis zum Stopp ermöglicht.

In diese Umgebung war eine PMD-Kamera inklusive 3D-Bildverarbeitungssoftware sowie einer Regelungssoftware zu integrieren. Die neu entwickelten Systemkomponenten waren aneinander anzupassen und in Realsituationen auf ihre Leistungsfähigkeit zu prüfen. Schließlich war das komplette System hinsichtlich seiner Verkehrstauglichkeit in Realsituationen zu erproben und der Nachweis seiner Machbarkeit zu führen. Die Aufgabenstellung war hierzu in folgende Arbeitspakete unterteilt:

AP 5.1 Aufbau des Versuchsfahrzeugs: Die Aufgabe bestand in der Ausstattung des Fahrzeugs mit allen Systemkomponenten, die eine sensorgesteuerte Längsregelung erfordert: Die Sensorik, die Aktuatorik, die Rechner und Steuergeräte sowie die interne Busstruktur zur Datenkommunikation. In diese Systemumgebung war die PMD-Sensorik einzubetten. Zur Dokumentation der Systemfunktion in applikationstypischen Verkehrssituationen war im Fahrzeug ein Meßsystem einzurichten, das sämtli-

che Sensor- und Fahrzeugdaten aufzeichnen konnte, inklusive der Referenz-Sensorik zur Verifikation der PMD-Daten.

AP 5.2 Szenenquelldaten: Zur Verifikation der Systemfunktion war eine Datensammlung applikationsrelevanter Verkehrsszenen anzufertigen. Zu diesem Zweck waren relevante Szenarien zu definieren, und bei Gelegenheit mit dem Fahrzeug abzufahren. Gleichzeitig waren sämtliche Sensor- und Fahrzeugdaten mit Hilfe des Meßsystems aufzuzeichnen. Diese Daten sollten später als Input zur Verifizierung der Regelungssoftware dienen. Sie sollten eine reproduzierbare Validierung der 3D-Bildverarbeitung und eine Adaption der Regleralgorithmen an reale Fahrsituationen und Fahrzeugumgebungen ermöglichen.

AP 5.3 Softwareintegration: Das Fahrzeug bzw. die integrierten Rechnerplattformen waren mit einer Rahmensoftware zur fahrzeuginternen Kommunikation der Daten auszustatten. Hierzu mussten zuerst die Hardware- und Softwareschnittstellen spezifiziert werden. Die Rahmensoftware sollte später zur Integration sämtlicher Softwaremodule dienen, die für eine Fahrzeuglängsregelung notwendig waren. Die Module wie z.B. die 3D-Bildverarbeitung oder die Fahrzeugregelung, wurden z.T. von Projektpartnern geliefert. Einzelne Module, wie z. B. die Szeneninterpretation, waren von der A.D.C. zu entwickeln. Die fahrzeugtypischen Einflüsse auf die Bildverarbeitung und die Regelung waren zu untersuchen und Softwaremodule entsprechend zu parametrieren.

#### AP 5.5 Erprobung Stop-and-Go

Der Versuchsträger sollte dazu dienen, die Systemfunktion zu erproben, Optimierungen am System vorzunehmen und abschließend die Eigenschaften und Möglichkeiten des Systems zu demonstrieren. Die Einsatzfähigkeit des PMD-Sensors sollte in typischen Fahrszenarien nachgewiesen werden. Die Machbarkeit der S&G-Funktion sowie ihre Akzeptanz beim Fahrer sollte gezeigt werden. Die Erprobung konnte weiter dazu dienen, Störeinflüsse und Fehlreaktionsrisiken abzuschätzen und entsprechende Fehlerparameter zu erkennen.

Nahezu alle am System beteiligten Komponenten waren innovative Neuentwicklungen deren Funktionsnachweis unter Realbedingungen erst zu erbringen war. Die Erfassung von 3D-Tiefenbildern mit einer neuartigen Sensorhardware in unbekannter Signalqualität in einer dynamischen Umgebung stellte einen großen Entwicklungsschritt dar. Die daran anzupassenden Regelungsverfahren zur Umsetzung einer noch zu definierenden innovativen Systemfunktion waren eine weitere Herausforderung. Das anzustrebende Ziel war es, alle diese Komponenten in einen Gesamtregelkreis, die Fahrzeugumgebung, zu integrieren, mögliche in ihrem Zusammenwirken auftretende Probleme herauszuarbeiten, um so zu einer Charakterisierung und Spezifizierung des Gesamtsystems zu kommen.

### **1.1.3 Teilprojekt 1: Systemtechnik für fahrzeugtaugliche 3D-Kameras (Mitarbeit)**

Das Teilprojekt 1 „Systemtechnik“ wurde gemäß Planung von der Temic verantwortet. Die A.D.C. besaß allerdings einen erheblichen Anteil an Arbeitspaketen, die sie zum Teil allein, zum Teil in Zusammenarbeit mit der Temic ausführen sollte. Dabei handelt es sich speziell um folgende Themen:

AP 1.2 Systemkonzept Stop&Go: Ziel war es, ein Systemkonzept für ein Fahrzeug auszuarbeiten, das den Fahrer mit einer S&G-Funktion unterstützen konnte. Dazu mussten zuerst die funktionalen Anforderungen definiert werden, die das Verhalten des Fahrzeugs in festgelegten Verkehrssituationen beschreiben. Anschließend war die Sensortechnik so zu spezifizieren, dass sie in der Lage war, die definierten Verkehrssituationen zu erfassen. Diese Spezifikation musste über das PMD-Kamera-System bis auf Chip-Ebene heruntergebrochen und abgeleitet werden, um daraus die Anforderungen an die Einzelkomponenten zu erhalten. Das Konzept war möglichst modular zu gestalten, um flexibel anwendbar zu sein.

AP 1.4 Integration S/E-Modul: Die Sende- und Empfangsmodule waren in einer kompletten Kameraeinheit zu verbinden. Die Module waren aneinander zu adaptieren. Der Aufbau war unter Berücksichtigung der EMV und des Signalübersprechens zu miniaturisieren. Die Funktion des Komplettsystems inklusive der Schnittstellen war zu erproben.

AP 1.6 Systemintegration S&G: Nach Fertigstellung der Kamerasystemhardware waren die Softwaremodule zu integrieren, insbesondere die Module, die die S&G-Funktion beinhalten. Durch Input spezifischer Quelldaten, z.B. aus AP 5.2 sollte die Funktion simuliert und verifiziert werden. Dadurch sollten Hardware und Software adaptiert und die Funktion des Gesamtsystems im Labor charakterisiert werden.

### **1.1.4 Teilprojekt 3: Ansteuerung des PMD-Chips (Mitarbeit)**

AP 3.8 Chipansteuerung: Aufgabe war, die Erfahrungen aus der Chipcharakterisierung und der Systemkonzeption und Spezifikation mit den Anforderungen der Chipansteuerung zusammenzuführen und sie in die Chipspezifikation einfließen zu lassen. Hier wurden von der A.D.C. im Rahmen der Umstrukturierung auch Teile der Aufgaben von AP 3.4 übernommen. Das Ziel des Arbeitspaketes war der Aufbau einer PMD-Peripheriehardware, die das PMD ansteuert, die Daten ausliest und sie einer Vorverarbeitung unterzieht. Diese dient einer echtzeitfähigen PMD-spezifischen Datenkorrektur sowie einer ersten Datenfilterung, z.B. einer Merkmalsextraktion. Ziel war der Aufbau eines schnellen echtzeitfähigen 3D-Bildverarbeitungssystems, das einfach ansteuerbar und für verschiedene Applikationen universell einsetzbar ist.

Die Algorithmen waren in einer Entwicklungsumgebung zu programmieren und durch Simulationen zu testen. Anschließend waren sie in einen programmierbaren Baustein, z.B. ein FPGA, zu integrieren.

## 1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Fördervorhaben 3D-SIAM zur Entwicklung eines völlig neuartigen 3D-Bildsensors überschreitet die Grenzen des Standes der Wissenschaft und Technik. Obwohl durch die Zusammensetzung des Konsortiums alles getan wurde, um das Entwicklungsrisiko so gering wie möglich zu halten, wäre das Projekt ohne die Risikoaufteilung zwischen den Partnern und die Risikominimierung im Rahmen der Förderung nicht möglich gewesen. Die Komplexität der Aufgabenstellung erforderte das Zusammenwirken von Partnern mit unterschiedlicher, sich ergänzender Fachkompetenz.

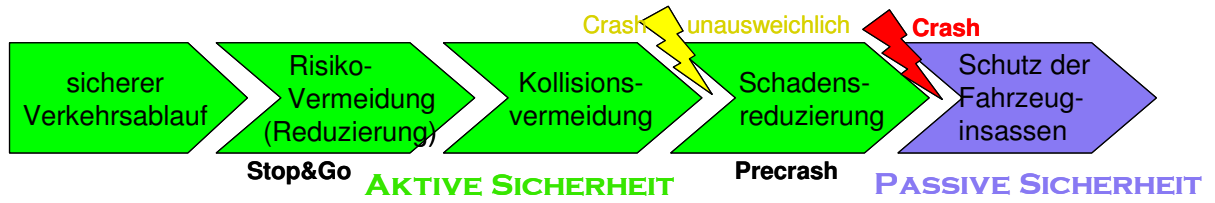
Die Firma A.D.C. wurde 1996 gegründet. Sie ist bekannt für die Markteinführung des radargestützten ACC-Systems „DISTRONIC“ für Mercedes-Benz. Im Laufe einer langjährigen Entwicklung innerhalb der Arbeitsgruppen, auch bereits vor der Firmengründung, wurde für viele namhafte Automobilhersteller eine Vielzahl von Demonstrationsfahrzeugen für ACC-Systeme aufgebaut. Die A.D.C. versteht sich als Anbieter von Komplettsystemen zur Fahrerassistenz, bestehend aus Sensoren und Regelungssystemen. Für die Sensorik stand 2001 neben der Radar- auch die Lidartechnologie zur Verfügung. Im Rahmen dieser Infrarottechnologie bestand eine langjährige Erfahrung in der Ansteuerung von IR-Strahlquellen und ihrer augensicheren Spezifikation.

Bis dato standen für den Automobilbereich keine entsprechenden Sender zur Verfügung. Sie müssen die Umgebung des Fahrzeugs mit genügend Leistung augensicher ausleuchten, mit den gewünschten Frequenzen modulierbar sein und die generierte Verlustleistung in Form von Wärme abführen können. Schließlich und endlich sollten sie auch noch mit den rauen Umgebungsbedingungen im Kfz-Umfeld zurechtkommen.

Während vor Beginn des Projektes 3D-SIAM die ACC-Funktion gerade Einzug in den Markt hielt, war auf Entwicklungsseite klar, dass an den Einschränkungen der ersten Version weiter gearbeitet werden musste. Eine auf der Hand liegende Funktionserweiterung war die Unterstützung im Stau, die sogenannte Stop-and-Go-Funktion (S&G). Die Erfahrungen in der Entwicklung von ACC-Systemen versprachen die besten Voraussetzungen für die A.D.C. die Erweiterung der Systeme für den Staubetrieb konsequent und erfolgreich weiterzuführen. Die Zusammenarbeit unter den Automobilherstellern hatte gerade begonnen, mit dem Ziel eine standardisierte Spezifikation der S&G-Funktion auszuarbeiten.

Zur Demonstration der PMD-Funktion existierten Ein-Pixel-Kameras. Die Systemumgebung für Pixel-Arrays zur Gewinnung von 3D-Bildern, musste abhängig von den Ergebnissen der Chipcharakterisierung, erst entwickelt werden.

Die Motivation für das Fördervorhaben war in erster Linie, die Sicherheit und den Komfort im Straßenverkehr zu erhöhen. Während das Potential der Maßnahmen der passiven Sicherheit in vielen Jahren nahezu ausgeschöpft wurde, bietet die aktive Sicherheit als junges innovatives Feld noch weit reichende Möglichkeiten. Aktive Sicherheit bedeutet bereits präventiv Maßnahmen zu ergreifen, z.B. unmittelbar vor dem Crash durch eine sogenannte „Precrash“-Konditionierung, oder weiter im Vorfeld den Fahrer zu entlasten, z.B. durch ein „Stop&Go“-System. Nachdem Statistiken zufolge der Fahrer in ca. 95% der Fälle für den Unfall verantwortlich ist, offenbart sich für solche Assistenz- und Sicherheits-Systeme ein riesiges Potential.



**Abbildung 1: Beitrag von Fahrerassistenzsystemen zur Sicherheit**

Die Abbildung zeigt den typischen Unfallablauf und die möglichen Stadien, in denen korrigierend eingegriffen und der Crash evtl. vermieden oder zumindest gemildert werden kann. Die beiden Applikationen, S&G und Precrash, die im Projekt verfolgt werden sollten, spielen hier eine zentrale Rolle.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

### 1.3.1 Planung des Vorhabens

In einer Projektlaufzeit von 3 Jahren sollte ein Fahrzeug mit einem PMD-Kamerasystem und allen weiteren Komponenten, wie der Aktuatorik und einem entsprechenden HMI ausgerüstet werden, die zu einer Demonstration der Funktionen Precrash und Stop-and-Go notwendig waren. Die Umsetzung sollte ein Konsortium mit breit gestreuten Kompetenzen und entsprechender Aufgabenverteilung ermöglichen. Nach der Systemkonzeptionierung lag auch die Entwicklung des Systems und der Sender in den Händen von Temic und A.D.C.. S-TEC und die Universität Siegen übernahmen die Verantwortung, die Entwicklung der PMD-Chips voranzutreiben, ZMD ihre Produktion. Nach Aufbau des Kamerasystems und der Entwicklung der 3D-Bildverarbeitungssoftware durch DaimlerChrysler sollten alle Komponenten in ein bis dahin von der A.D.C. vorbereitetes Demonstrationsfahrzeug integriert werden. Die Fahrzeugregelung war als Koproduktion zwischen der A.D.C, DaimlerChrysler und der FH Trier geplant. Nach Integration aller Komponenten stand laut Plan noch etwa ein halbes Jahr für die Evaluierung und Optimierung der Gesamtsystemfunktionen Stop-and-Go und Precrash zur Verfügung. Im Einzelnen übernahm die A.D.C. folgende Arbeitspakete:

AP 2.1 Sender-Spezifikation: Ausgehend von einer Machbarkeitsanalyse waren sämtliche Komponenten des Senders sowie der Empfangsoptik zu spezifizieren und in ein Gesamtkonzept einzubetten. Innerhalb des Gesamtkonzepts waren die Schnittstellen zu spezifizieren und in einer Systemspezifikation zu verbinden. Das Systemkonzept musste die technischen Anforderungen mit den funktionellen Anforderungen, wie z.B. dem Beobachtungsraum und den marktspezifischen Kriterien wie Bauraum und Automotive-Tauglichkeit, verbinden. Gesichtspunkte der Produktion sollten in eine entsprechende Aufbau- und Verbindungstechnik einfließen.

AP 2.2 Sender-Optik: Für die selektierten Sendeelemente waren entsprechend angepasste, augensichere und automotive-taugliche Konzepte zu entwickeln. Die Konzepte waren theoretisch zu verifizieren und anschließend in Musterstückzahlen zu fertigen. Die Musteroptiken waren zu vermessen und zu charakterisieren. Auf Basis der theoretischen und messtechnischen Erfahrungen galt es, die optischen Komponenten zu spezifizieren. Abschließend waren sie zu einem Komplettsystem zu integrieren, das zum Nachweis der Funktion und der Augensicherheit charakterisiert werden musste.

AP 2.3 Sender-Elektronik: Für die unter AP2.4 ausgewählten Sendeelemente war eine hochfrequente Ansteuerschaltung mit geeigneter Stromversorgung zu entwickeln. Das Layout sollte automotive-tauglich gestaltet und unter EMV-Gesichtspunkten optimiert werden.

AP 2.4 Sender-Elemente: Ausgehend von einer Marktanalyse waren die geeignetsten Komponenten auszuwählen. Auf der Basis einer ersten Charakterisierung war zu entscheiden, ob sie direkt verwendet oder kundenspezifisch weiterentwickelt werden mussten. Die zu verwendenden Elemente waren festzulegen und zu charakterisieren.

AP 2.5 Modulationsprinzipien: Aus einer Reihe möglicher Modulationsverfahren waren unter Berücksichtigung der Applikationsanforderungen, wie z.B. der Messauflösung, der Eindeutigkeit der Ergebnisse, der Störsicherheit, die günstigsten Verfahren vorzuselektieren. Die Qualität der Verfahren war

zuerst auf der Basis von Simulationsrechnungen, später durch Labormessungen am PMD zu verifizieren. Gleichzeitig war eine Beurteilung der Umsetzbarkeit durch entsprechende Senderelemente durchzuführen. Da die Art der Modulation auch Einfluss auf die Augensicherheit nimmt, waren auch diese Kriterien bei der Optimierung des Verfahrens zu beachten. Durch die komplexen Zusammenhänge waren die genannten Kriterien für die unterschiedlichen Verfahren und Optimierungsschritte in einem iterativen Prozess immer wieder neu zu untersuchen. Das ausgewählte Modulationsverfahren war zu spezifizieren und anschließend mittels eines programmierbaren Bausteins (FPGA) zu realisieren.

AP 2.6 Empfangsoptik: Es war ein automotive-taugliches Konzept der gesamten Empfangsoptik zu erstellen. Dabei war ein kostenverträgliches, fertigbares Filterkonzept zur Fremdlichtunterdrückung auszuarbeiten und zu berücksichtigen. Jedes Konzept war insbesondere im Hinblick auf extreme Reflexionsfreiheit und geringste Streuung durch umfangreiche Simulationsrechnungen zu untersuchen und zu optimieren, um Fehlreaktionen des Sensors weitestgehend zu vermeiden. Die optischen Komponenten waren auf der Basis von Simulationsrechnungen zu spezifizieren. Die Komponenten waren in Musterstückzahlen zu fertigen und zu einem kompletten System zu verbinden. Die Musteroptiken waren zu charakterisieren.

AP 2.7 Sender-Integration: Aus den Sendeelementen, der Elektronik, den optischen Komponenten und einer zu konzeptionierenden Mechanik war ein Komplettsystem aufzubauen und in Betrieb zu nehmen. Schwerpunkt war die Lösung der Wärmeproblematik. Die Komponenten waren in ihrem Zusammenwirken zu optimieren. Bei der Gestaltung sollten auch Automotiv-Gesichtspunkte berücksichtigt werden. Der komplette Sender war abschließend zu charakterisieren.

AP 5.1 Aufbau des Versuchsfahrzeugs: Es war ein Konzept zu erstellen für ein Demonstrationsfahrzeug, in das ein PMD-Kamerasystem, ein Längsregelungssystem, ein Precrash-Demonstrationssystem und eine Messtechnik zur Erfassung und Aufzeichnung der Verkehrssituation integriert werden sollte. Die Komponenten der Systeme und ihre Funktionalitäten waren festzulegen. Anschließend mussten die Schnittstellen definiert und eine Busarchitektur zur Kommunikation entworfen werden. Nach Festlegung des Gesamtkonzepts war das Fahrzeug entsprechend zu verkabeln. Die Regelungskomponenten zur Motorsteuerung und Bremsbetätigung waren einzubauen und in ihrer Wirkung zu charakterisieren. Zur Aufzeichnung und Dokumentation der Verkehrsszenarien war eine Messtechnik ins Fahrzeug zu integrieren. Zur Ergänzung sollte diese Messtechnik diverse Sensoren enthalten, z.B. Videokameras oder Referenzdistanzsensoren, ein Aufzeichnungssystem, das an die Sensoren, im Speziellen an den neuen PMD-Sensor, adaptiert werden musste und eine Einrichtung zur Aufzeichnung der Fahrzeugparameter. Der PMD-Sensor war in das Fahrzeugregelungssystem einzubetten. Das Gesamtsystem war mit besonderem Augenmerk auf das Zusammenwirken der Komponenten in Betrieb zu nehmen.

AP 5.2 Szenen Quelldaten: Ausgehend von der Systemkonzeption und der Funktionsspezifikation waren die typischen S&G-Szenarien zu definieren. Das Fahrzeug war in möglichst allen für eine S&G-



Funktion relevanten Verkehrssituationen zu bewegen. Die Sensordaten und Fahrzeugreaktionen waren aufzuzeichnen und so nachzubearbeiten und zu archivieren, dass sie für eine nachträgliche Bewertung zur Verfügung standen. Eine Wiedereinspeisung in das S&G-System sollte abschließend für die Verifikation der spezifizierten S6G-Funktion dienen.

AP 5.3 Software-Integration: Die hardwarenahe Software, die die Umsetzung der Stellgrößen, d.h. der Regelanforderungen in die entsprechenden Bewegungsgrößen des Fahrzeugs, bewirken sollte, war an das reale Fahrzeugverhalten anzupassen. Die Bildverarbeitungsalgorithmik war an die reale Einbausituation im Fahrzeug und das entsprechende Beobachtungsfeld zu adaptieren. Ausgehend von den 3D-Bildverarbeitungsdaten musste eine Situationsanalyse entwickelt und in die Fahrzeugumgebung integriert werden. Die Kommunikation aller Softwaremodule im Fahrzeug war zu verifizieren.

AP 5.4 Erprobung Precrash: Dieses Arbeitspaket wird von der Temic ausgeführt. Von der A.D.C. war die Integration des Softwaremoduls und seine Erprobung durch das Demonstrationsfahrzeug zu unterstützen.

AP 5.5 Erprobung Stop-and-Go: Nach Integration des Kamerasystems und der Softwaremodule ins Fahrzeug war die Funktion des Komplettsystems, d.h. des Demonstrators in allen denkbaren relevanten Verkehrssituationen zu testen und zu optimieren. Dies umfasste sämtliche Komponenten des Regelungssystems, die Kamera inklusive der Rohdatenverarbeitung, die 3D-Bildverarbeitungssoftware, die Situationsanalyse und zuletzt die Regelung, die alle parametrisiert werden mussten. Die Testsituationen waren für spätere Bewertungen aufzuzeichnen und bezüglich der Fahrerakzeptanz zu diskutieren.

AP 1.2 Systemkonzept Stop-and-Go: Die gewünschte Fahrzeugfunktion war zu definieren. Es war ein Gesamtkonzept für das Demonstrationsfahrzeug auszuarbeiten und sämtliche Module, Hardwareplattformen und Softwaremodule festzulegen. Die Schnittstellen mussten definiert werden. Mögliche Verkehrsszenarien und ihre Relevanz für die Stop&Go-Funktion waren zu bewerten. Davon ausgehend musste die PMD-Kamera ausgelegt werden und die relevanten Parameter waren zu definieren. Die Auslegung der Parameter sollte auf der Basis der Funktionsdefinition, der Bewertung der Parameter und der technischen Machbarkeit erfolgen. Elementar für die Zusammenarbeit im Konsortium war die Ausarbeitung eines modularen Konzepts zur Realisierung der Funktion im Fahrzeug, mit Definition der Schnittstellen und Parameter für die Datenübergabe.

AP 1.4 Integration S/E-Modul: Es war ein Konzept für das Kamerasystem zu entwickeln und die Schnittstellen der wichtigsten Komponenten waren zu definieren. Wesentlich waren vor allem die Schnittstellen zum PMD-Chip und seine Ansteuerung. Das System war unter Berücksichtigung der AVT-spezifischen Erfordernisse aufzubauen und im Labor zu erproben. Hierbei sollte das System auch unter EMV-Gesichtspunkten optimiert werden. Die Kamera war in einer Musterstückzahl aufzubauen. Ein ausgewählte Kamera und ein charakterisierter Sender waren schließlich im Fahrzeug zu integrieren.

AP 1.6 Systemintegration Stop-and-Go: Um möglichst frühzeitig einen ersten Systemtest durchführen zu können, sollte die S&G-Funktion in einem ersten Schritt in einem Laborsystem aufgebaut und geprüft werden. Daten, die in realen Verkehrssituationen aufgezeichnet wurden (siehe auch AP 5.2.),

sollten als Input für eine simulative Erprobung des Systems dienen. Die Funktion, d.h. sämtliche Komponenten des Regelungssystems, die Kamera inklusive der Rohdatenverarbeitung, die 3D-Bildverarbeitungssoftware, die Situationsanalyse und zuletzt die S&G-Regelung, sollten in Betrieb genommen werden.

AP 3.8 Chipansteuerung: Die Funktionen, die zeitkritisch sind und deshalb hardwarenah in der Peripherie des PMD-Chips umgesetzt werden mussten, waren zu definieren. Die Algorithmen waren zu programmieren und nach einer Simulation in ein FPGA zu integrieren. Das Ergebnis war in einer Kamera ausgiebig zu testen und zu optimieren.

Die beschriebenen Arbeitspakete sollten in Zeitabschnitten bearbeitet werden, die im folgenden Zeitplan skizziert sind:

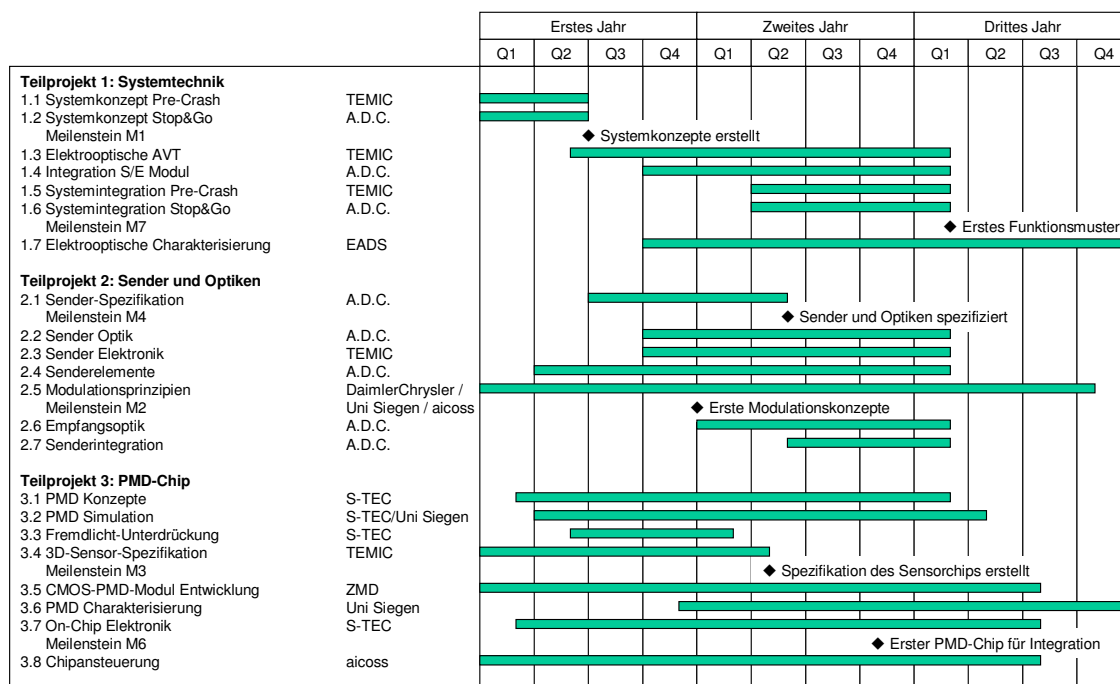


Abbildung 2: Arbeits- und Zeitplan zu Beginn des Projektes

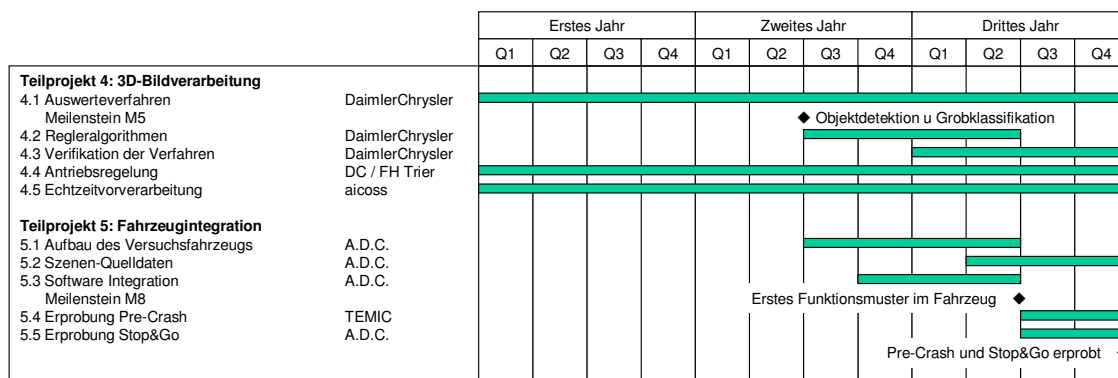


Abbildung 3: Arbeits- und Zeitplan zu Beginn des Projektes

Zur Kontrolle des zeitlichen Ablaufes des Projektes dienen die sogenannten Mastermeilensteine:

	Projektstart	$T_0$
Meilenstein M1	Systemkonzepte Precrash und Stop&Go erstellt	$T_0 + 6$
Meilenstein M2	Erste Modulationskonzepte für Außenraum	$T_0 + 12$
Meilenstein M3	Spezifikation des Sensorchips erstellt	$T_0 + 16$
Meilenstein M4	Sender und Optiken spezifiziert	$T_0 + 22$
Meilenstein M5	Objektdetektion u. Grobklassifikation verfügbar	$T_0 + 18$
Meilenstein M6	Erster PMD-Chip für Systemintegration verfügbar	$T_0 + 22$
Meilenstein M7	Erstes Funktionsmuster verfügbar	$T_0 + 26$
Meilenstein M8	Erstes Funktionsmuster im Fahrzeug integriert	$T_0 + 30$
Meilenstein M9	Precrash und Stop&Go erprobt	$T_0 + 36$
	Projektende	$T_0 + 36$

**Tabelle 1: Mastermeilensteine**

### 1.3.2 Ablauf des Vorhabens

Die Meilensteine M1 bis M4 konnten erwartungsgemäß erreicht werden. Probleme stellten sich ein bei allen PMD-Chip-bezogenen Meilensteinen M5 bis M9.

#### 1.3.2.1 Umstrukturierung

Die in der Anfangsphase der PMD-Entwicklung gewonnenen Resultate an PMD-Einzelpixeln entsprachen den Erwartungen. Somit durften wir annehmen, dass die Lösung applikationsspezifischer Anforderungen, wie z.B. der hohe Hintergrundlichtpegel oder der große Dynamikumfang, in einem kalkulierbaren Zeitrahmen erreichbar sein würde.

Im Verlaufe der letzten Waferruns 2002 erhielten wir jedoch Ergebnisse, die ganz offenbar der Wechselwirkung der Pixel bei ihrer Vervielfältigung auf einem Chip, d.h. der Anordnung in einer Matrix, zuzuschreiben waren. Probleme wie die Signalabhängigkeit der Entfernungsmessung, die Reduzierung des Kontrastes oder die Hintergrundlichtunterdrückung, die beim Einzelpixel bereits gelöst schienen, zeigten bei Matrixbildung einen erheblichen Einfluss. Die hohen Dynamikanforderungen machten zudem eine pixelindividuelle adaptive Integrationszeitregelung in der Matrix notwendig, die mit einem zusätzlichen Fehleranteil verbunden war. Da der Füllfaktor der Pixel in einer Matrix wesentlichen Einfluss auf die Empfindlichkeit besaß, sollte der Elektronikanteil der Pixelfläche durch Umstellung auf einen neuen Prozess ( $0,6 \mu\text{m}$ ) maßgeblich reduziert werden. Leider ergaben sich durch die Umstellung auf die neue Technologie zusätzliche Einflüsse auf die oben beschriebenen Lösungsansätze.

Die Partner waren sich einig, dass die angesprochenen Einflussgrößen nur durch einen verstärkten Aufwand zu isolieren waren. Dies bedeutete in erster Linie intensive Anstrengungen in der Messtechnik bei der Charakterisierung der Chips. Darüber hinaus schien die Erarbeitung neuer PMD-Konzepte erforderlich, sowie eine Optimierung des Elektronikdesigns auf dem Pixel.

Um das Projekt dennoch zum Erfolg führen zu können, schlugen wir dementsprechend vor, Arbeitspakete, die für die grundsätzliche Zielerreichung nicht zwingend notwendig waren, zugunsten der neuen erforderlichen Arbeitsergebnisse umzuwidmen!

Dies führte zu folgender Änderung der Projektstruktur in Teilprojekt 3, der Entwicklung des PMD-Chips:

### Restrukturierung von Teilprojekt 3

Teilprojekt 3		Dauer	36	Startmonat	01	Mannmonate Gesamt	<b>138,75 + 18</b>
Titel	<b>PMD-Chip</b>						
Beteiligte Partner	S-TEC	TEMIC	ZMD	Uni Siegen	A.D.C.		
Aufwand in Mannmonaten	<b>24,5</b>	<b>11 + 18</b>	<b>44,25</b>	<b>54</b>	<b>5</b>		
3.1 PMD-Konzepte	5,25	+ 4	5,25				
3.2 PMD-Simulation			4	18			
3.3 Fremdlicht-Unterdrückung	9		+ 3	+ 5			
3.4 3D-Sensor Spezifikation	5	6					
3.5 CMOS-PMD-Modul Entwicklung			23 - 3				
3.6 PMD Charakterisierung		+ 10		36 - 10			
3.7 On-Chip Elektronik	5,25	+ 4	12	+ 5			
3.8 Chipansteuerung		5				5	

**Tabelle 2: Umwidmung von Arbeitspaketen**

Die 18 Mannmonate der Temic wurden gemäß Umwidmungsantrag gewonnen aus der Streichung der noch verbliebenen Precrash-Aktivitäten der Temic, dem AP1.5 (12MM), dem AP5.2 (2MM) und dem AP5.4 (4MM). Durch die Bedeutung, die der Precrash-Funktion für die zukünftige Vermarktung der Systeme beigemessen wurde, führten wir eine weitere konzerninterne Umwidmung von Arbeitspaketen durch. Um der Temic zu ermöglichen, die Precrash-Aktivitäten weiter verfolgen zu können, übernahm die A.D.C. im Wesentlichen die Arbeiten zur Systemtechnik und entlastete hier die Temic. In größerem Umfang übernahm die A.D.C. beispielsweise Arbeiten im AP 1.3, zur Entwicklung der AVT, dem Aufbau der Kamera. Weiterhin beteiligte sich die A.D.C. an dem Arbeitspaket AP 3.4 „3D-Sensor-Spezifikation“. Dies hatte zur Folge, dass die A.D.C. Arbeiten, die nicht unmittelbar zur Erfüllung des Projektzieles notwendig waren, z.B. Arbeiten, die lediglich zur Verifizierung der Systemfunktion im Labor dienen, stark einschränken musste. Die damit verbundene Erhöhung des Entwicklungsrisikos schien uns in Anbetracht der Gesamtprojektprobleme vertretbar.

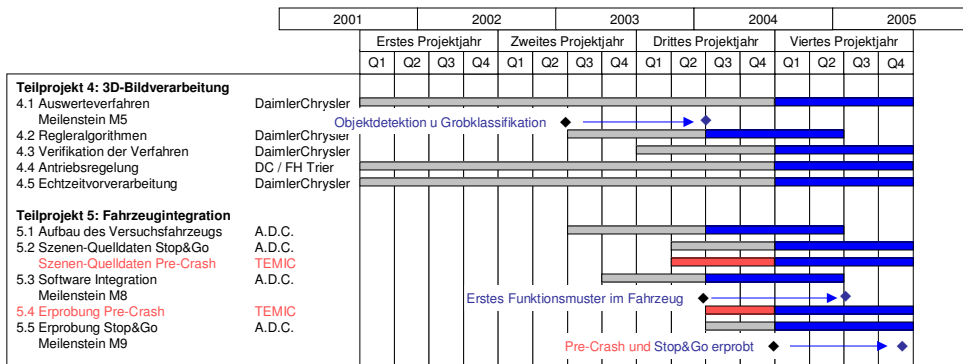
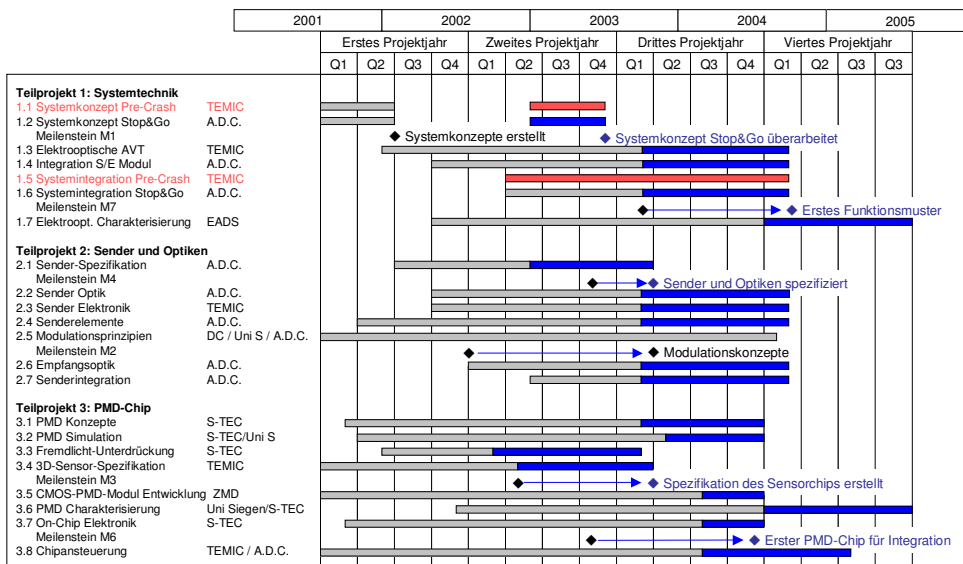
### **1.3.2.2 Verlängerung**

Der Gefährdung von Meilensteinen, die sich als Folge der Arbeitsergebnisse abzeichnete, wurde in Form der Projektstrukturierung Rechnung getragen. So wurden Maßnahmen ergriffen, um den erhöhten Aufwand an Messtechnik und Layoutaktivitäten, der bei der Chipentwicklung anfiel, durch gemeinsam fokussierte Anstrengungen zu bewältigen. Der Umwidmungsantrag vom 25.06.2003 beschrieb diese Planung im Detail. Durch firmeninterne Umwidmungen von Arbeitspaketen versuchten die in TP3 (Chipentwicklung) beteiligten Partnerunternehmen Ressourcen in der Chipentwicklung zu bündeln und an die neue Problemstellung anzupassen. Diese ergab sich erst im Zuge der Entwicklung der PMD-Matrix und war nicht vorherzusehen.

Um die Probleme abzuarbeiten und die spezifizierten Funktionen auf dem Chip zu integrieren waren drei Waferruns zwingend notwendig. Sie umfassten die weitere Evaluierung der Funktionen auf Testpixeln, die Untersuchung der Matrixeinflüsse, die Integration der Funktionen auf jedem Pixel in der Matrix und schließlich die Herstellung des für 3D-SIAM spezifizierten PMD-Chips. Für die Auswertung der Messergebnisse der jeweils letzten Chipgeneration und das Design der jeweils neuen Chips wurden mindestens 4 Monate veranschlagt. Die Durchlaufzeit der Wafer zur Herstellung der Chips betrug typischerweise ca. 2 Monate. Nach Beendigung der Chipentwicklungsphase waren die Chips in ein komplettes Sensorsystem einzubetten. Im Anschluss wurden die Sensorsysteme in das Gesamtsystem „Fahrzeug“ integriert. Nach Abschluss der Systemintegration (Sensorhardware und Software auf das Fahrzeug abgestimmt) mussten die Funktionen zur Darstellung im Fahrzeug optimiert und erprobt werden. Daraus wird deutlich sichtbar, dass die genannten Arbeiten nur sequentiell erfolgen konnten.

Die Projektpartner sahen nach der Analyse des Projektstandes und den abgeleiteten Maßnahmen in der beantragten Projektverlängerung die einzige Chance, wesentliche Projektzielstellungen noch zu erfüllen. Da für die skizzierte sukzessive Abarbeitung der Arbeitspakete zwar mehr Zeit, nicht aber unbedingt mehr Ressourcen benötigt wurden, konnten die Änderungen kostenneutral durchgeführt werden. Der Plan zeigt, dass eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes 3D-SIAM um ein Jahr notwendig wurde. Um den zeitlichen Anforderungen der genannten Projektphasen gerecht zu werden, schlugen wir eine detaillierte Projektstruktur mit den entsprechenden Meilensteinen vor, wie sie in den folgenden Bildern gezeigt wird. Die Änderungen gegenüber der ursprünglichen Planung sind farblich unterlegt.

Abbildung 4: Arbeits- und Zeitplan nach Restrukturierung und Verlängerung



Die rot dargestellten Arbeitspakete konnten von der Temic erst weiter bearbeitet werden, nach Entlastung in der Systementwicklung durch die A.D.C..

Abbildung 5: Mastermeilensteine nach Restrukturierung und Verlängerung

Neue Festlegung der Meilensteine

Mastermeilensteine:	Bisher	Neu	Verantwortlicher
Mastermeilenstein M1 (Systemkonzept Stop&Go)	$T_0 + 6$	$T_0 + 23$	ADC
Mastermeilenstein M2 (Modulationskonzepte)	$T_0 + 12$	$T_0 + 27$	DC/UniS/ADC
Mastermeilenstein M3 (Spezifikation Sensorchip)	$T_0 + 16$	$T_0 + 27$	Temic
Mastermeilenstein M4 (Sender & Optiken spezifiziert)	$T_0 + 22$	$T_0 + 27$	ADC
Mastermeilenstein M5 (Objektdetektion & Grobklassifikation)	$T_0 + 18$	$T_0 + 30$	DC
Mastermeilenstein M6 (PMD-Chip für Integration)	$T_0 + 22$	$T_0 + 35$	S-TEC
Mastermeilenstein M7 (Erstes Funktionsmuster)	$T_0 + 26$	$T_0 + 38$	ADC
Mastermeilenstein M8 (Erstes Funktionsmuster im Fahrzeug)	$T_0 + 30$	$T_0 + 42$	ADC
Mastermeilenstein M9 (PreCrash und Stop&Go erprobt)	$T_0 + 36$	$T_0 + 47$	ADC

Der kritische Pfad der neuen Zeitplanung wird in folgender Skizze wiedergegeben:

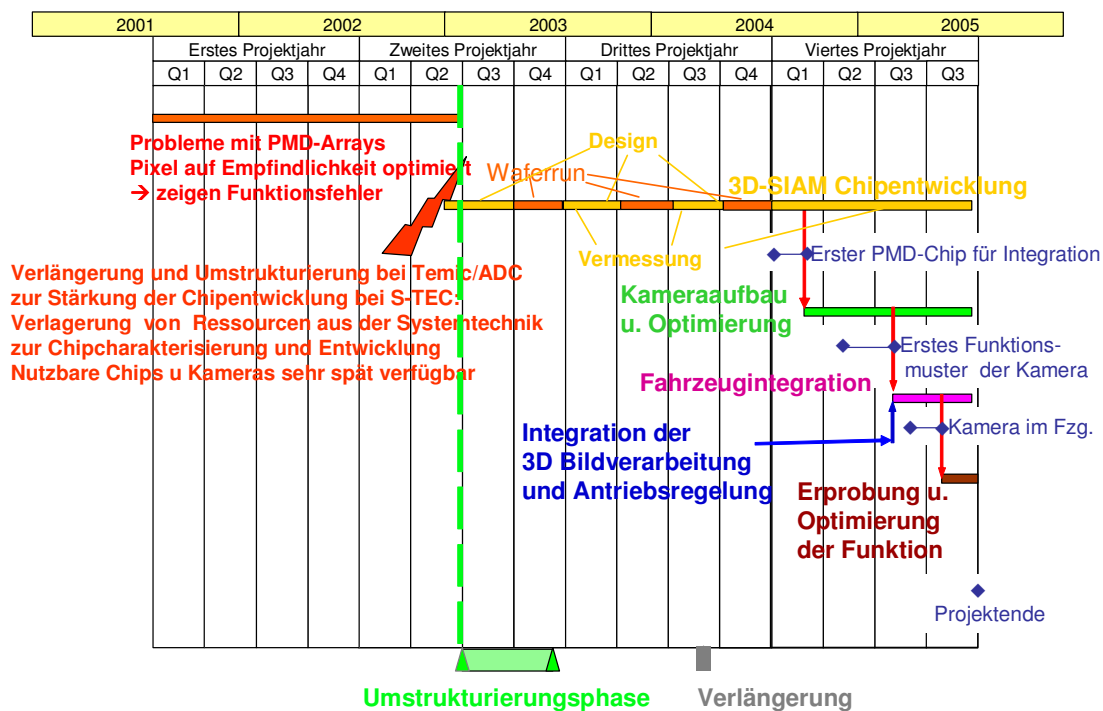


Abbildung 6: Projektverlauf, kritischer Pfad

Durch die erst relativ spät verfügbaren PMD-Chips, waren die nachfolgenden Arbeitspakete unter erheblichem Zeitdruck. Dies führte dazu, dass DaimlerChrysler die 3D-Bildverarbeitung und A.D.C. die Systementwicklung und Integration nur noch eingeschränkt auf die notwendigsten Arbeiten durchführen konnten.

Die dargestellte neue Planung nach der Restrukturierung konnte trotz des Zeitdrucks und des hohen Risikos erfolgreich bis zum neu geplanten Projektende eingehalten werden.

### **1.3.2.3 Wechsel der Projektleitung**

Nachdem Dr. Riedel, der Initiator und ehemalige Gesamtprojektleiter von 3D-SIAM die Temic verließ übernahm Dr. Joachim Massen Anfang 2003 die Gesamtprojektleitung.



## **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde:**

Moderne Fahrerassistenzsysteme erlebten gerade ihre Markteinführung in Form der sogenannten ACC(Adaptive-Cruise-Control)Systeme. Dies sind Fahrzeuglängsregelungssysteme für Autobahnen und Landstrassen. Diese Systeme benötigen eine Sensorik zur Erfassung der Fahrzeugumgebung. Der Wunsch, die Assistenzsysteme für immer komplexere Verkehrssituationen weiterzuentwickeln, stellt immer höhere Anforderungen an die Sensoren; Anforderungen, die bald nur noch von 3D-Entfernungsbildkameras erfüllt werden können.

Der Weg, Nahbereichssensoren für Kraftfahrzeuge in den Markt einzuführen, ging über die Applikation mehrstrahliger Distanzsensoren. Ihre Begrenzung fanden derartige Systeme vor allem in ihrem Wunsch nach lateraler Auflösung durch die Anzahl der verwendeten Strahlen. Aus Kostengründen können die pro Strahl notwendigen Einzelkomponenten nicht beliebig oft verbaut werden.

Mit scannenden Systemen ließen sich in der Regel nicht gleichzeitig die geforderte Messwiederholrate und die notwendige Empfindlichkeit erreichen. Zudem war die Baugröße noch nicht automobiltauglich.

Demgegenüber bot das PMD die einzigartige Möglichkeit, über die Anzahl der Pixel eine vergleichsweise riesige Zahl von Strahlen realisieren zu können, die sich auch in der geforderten Zeit auswerten ließen, da die Entfernungsmessung in jedem Pixel parallel erfolgt. Das eröffnete die Möglichkeit, durch die hohe Lateralauflösung auch noch Transversalbewegungen diagnostizieren zu können oder über die Bildverarbeitung mit demselben Sensor eine Fahrspurprädiktion oder eine Objektidentifizierung durchzuführen.

Das PMD war und ist eine der vielversprechendsten Methoden zur Realisierung einer 3D-Tiefenkamera. Nach unseren Informationen waren zu Projektbeginn noch keine Fahrzeuge mit derartigen Kameras für den Außenraum ausgerüstet. Es existierten bei diversen Automobilherstellern Versuche, Stop-and-Go-Funktionalitäten auf der Basis von Radar- oder Lidar-Sensoren aufzubauen und zu untersuchen. Die Ausrüstung eines Fahrzeugs mit einem Stop-and-Go bzw. einem Precrash System auf Basis einer 3D-Entfernungsbildkamera, stellte ein absolutes Novum dar. Im Vergleich mit Forschungsfahrzeugen, die mit mehrstrahligen Radar- bzw. Lidar-Systemen ausgerüstet waren, sollte es deutliche Wettbewerbsvorteile aufweisen.

Neben den Stereokameras mit den bekannten Problemen waren nur wenige 3D-Kameraprinzipien bekannt, die für einen Einsatz im Kfz in Frage kamen. Shutterkameras, die nach dem Pulslaufzeitverfahren arbeiten (Astrium, Siemens), befanden sich ebenso wie phasenmessende Kameras (CSEM, Canesta) im Entwicklungsstadium. Die PMD-Kamera, die ebenfalls nach dem Phasenmessprinzip arbeitet, schien technologisch das größte Potential zu besitzen. Das Funktionsprinzip war anhand von Einzelpixeln und sehr kleinen Pixelarrays bereits nachgewiesen. Der Aufbau größerer Matrixstrukturen sowie der Einsatz im Automobil für größere Entfernungsbereiche erforderten eine Anpassung und Weiterentwicklung der Einzelpixel und der Matrixstrukturen ebenso wie der halbleitertechnologischen Prozesse.

### **1.5 Angabe bekannter Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden,**

Der Aufbau einer PMD-Kamera ist geschützt durch eine Reihe von PMD-Schutzrechten, die im Wesentlichen bei Prof. Schwarte liegen. Bis Ende 2004 besaß die Temic und dadurch auch die A.D.C. eine exklusive Lizenz für den Automobilbereich. Diese exklusive Lizenz wurde inzwischen umgewandelt in eine normale Lizenz.

Die Ausrüstung eines Fahrzeugs mit einer Längsregelung erfordert eine Drive-by-Wire-Architektur oder zumindest eine Aktuatorik, die rein elektrisch angesteuert werden kann, z.B. eine Motorsteuerung ohne mechanischen Gaszug, oder Bremsaktuatoren, die die Bremskraft rein elektrisch aufbauen und halten können. Diese Architektur, bzw. die angesprochenen Komponenten sind in der Regel alle patentrechtlich geschützt.

## 1.6 Angabe der verwendeten Fachliteratur sowie der benutzten Informations- und Dokumentationsdienste.

- [Fritz04] Martin Fritzsche, 3D-SIAM Zwischenbericht Nr. 5 , Feb. 2004
- [Schmie05] Ines Schmiegel, „*Vermessung der Hardwareeigenschaften einer PMD-Kamera und Entwicklung eines Algorithmus zur optimierten Rohbilderfassung*“, Diplomarbeit an der Hochschule Anhalt(FH), 2005
- [Scher05] Benedikt Scherger, „*Entwicklung einer Situationsanalyse für ein PMD-Kamera-geregeltes Fahrzeug und Integration in die Systemumgebung*“, Diplomarbeit an der Fachhochschule Trier, 2005
- [Han03] Khalil Hanhan, „*PMD-Optical Modulation Unit Thermal Analysis and Design Guidelines*“, Praktikumsarbeit an der TU Hamburg-Harburg
- [Mur04] Rajesh Murugesan, „*Implementation of VHDL algorithm for Data Acquisition and Transmission in a 3D-PMD range camera system*“, Diplomarbeit an der FH Darmstadt, 2004
- [Sid02] Mumtaz Siddiqui, „*Construction of a High Performance Modulating Infrared Transmitter for PMD-Distance Picture Camera*“, Diplomarbeit an der TU Hamburg-Harburg, 2002
- [Jahn03] Mike Jahn, „*Entwicklung der Optik und des Aufbaus eines leistungsstarken, modulierbaren IR-Senders für eine PMD-Entfernungsbildkamera zur Kfz-Regelung*“, Diplomarbeit an der FH Coburg, 2003
- [Schnei03] Bernd Schneider, „*Der Photomischdetektor zur schnellen 3D-Vermessung für Sicherheitssysteme und zur Informationsübertragung im Automobil*“, Dissertation an der Universität Siegen, 2003
- [Bru01] Marcus Brunn „*Aufbau einer PMD-Entfernungsbildkamera für Anwendungen im Kfz-Bereich*“, Diplomarbeit an der TU Hamburg-Harburg, 2001
- [Lang05] Christian Lang, „*Potentialanalyse bildgebender Sensorik für Automotive-Applikationen, insbesondere für Innenraum- und Nahbereichsanwendungen unter Berücksichtigung der spezifischen Vermarktungsfähigkeit*“, Masterarbeit an der FH Landshut, 2005
- [Schä04] Lars Schäfer, Praktikumsbericht an der FH Heilbronn, 2004
- [Mül04] Rolf Müller, Praktikumsbericht an der FH Weingarten, 2004
- [Bis04] Valentin Bisch, Praktikumsbericht an der FH Weingarten, 2004
- [Joe99] Rainer Joeckel, Manfred Stober, „*Elektronische Entfernung- und Richtungsmessung*“, Wittwer-Verlag, 1999

- [Frey04] Raymond Freymann, „*Möglichkeiten und Grenzen von Fahrerassistenzsystemen und aktiven Sicherheitssystemen*“, Forschung und Technik, BMW Group, 2004
- [INV05] INVENT (Hrsg.) *Stauassistent STA*, Handout, Intelligenter Verkehr und nutzungsgerechte Technik, 2005
- [Naab04] Karl Naab, *Sensorik- und Signalverarbeitungsarchitekturen für Fahrerassistenz und aktive Sicherheit*, 2004
- [Rep04] Hightech Report, *Vision Unfallfreies Fahren* 1(1), Januar 2004, S. 22 - 31
- [Win04] Hermann Winner, *Fahrerassistenzsysteme in der Automobiltechnik*, 2004
- [Hol04] Volker von Holt, „*Integrale Multisensorielle Fahrumgebungserfassung nach dem 4D-Ansatz*“, Internet, Uni der Bundeswehr München, Nov 2004
- [Wie01] Frank Wieland, „*Prognosesysteme für die Verkehrssicherheit mit Methoden des Soft-Computings am Beispiel einer Glätteprognose und einer Fahrzustandsbestimmung*“, Internet ([www.uni-siegen.de](http://www.uni-siegen.de)) Uni Siegen, Dez. 2001
- [Albr01] Martin Albrecht. „*PMD-Modulationsverfahren für eine 3D-Vermessung im Kfz-Außenraum*“, Diplomarbeit, Universität Siegen, August 2001
- [Huss00] Stephan Hussmann, *Schnelle 3D-Objektvermessung mittels PMD/CMOS-Kombizeilen-Sensor und Signalkompressions-Hardware*, Universität Siegen, Oktober 2000
- [Schwa01] Rudolf Schwarte, „*Dynamic 3D-Vision*“, Invited Paper on EDMO 2001, Wien
- [Depa98] Deutsche Patentanmeldung DE 197 57 595
- [Gro02] Grothof, Schwarte, Buxbaum, Ringbeck Frey, „*Product Monitoring with MSM-PMD-Array*“, Opto 2002, Tagungsband
- [JFrey04] Jochen Frey, „*Beschreibung der PMD-Matrix*“, schriftliche Mitteilung der PMD-Tec, 2004
- [MiBa04] Mierau, Bauer, 3D-SIAM Zwischenbericht Nr. 6, Aug. 2004
- [Xu04] Zhanping Xu, 3D-SIAM Zwischenbericht Nr 6, Aug. 2004
- [ZyLa04] Zywitza, Lang, 3D-SIAM Zwischenbericht Nr. 6 Aug. 2004
- [Rie01] Helmut Riedel, Beschreibung des Gesamtvorhabens 3D-SIAM, VDI, 2001
- EN 60825 Europäische Norm zur Sicherheit von Lasereinrichtungen, entspricht IEC 60825
- Depatisnet, Informationsdienst des Deutschen Patentamtes

## 1.7 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.

Die Zusammenarbeit innerhalb des Projektkonsortiums ist in nachfolgender Kooperationsmatrix [Rie01] veranschaulicht. Bei allen Partnern sind die Beziehungen untereinander jeweils wechselseitig, d.h. die einzelnen Partner transferieren Ergebnisse zu ihren Kooperationsstellen und benötigen andererseits auch Ergebnisse von dort.

Eine intensive Zusammenarbeit der A.D.C. bestand insbesondere mit der Temic in den Arbeitspaketen zur Systementwicklung, der Senderentwicklung und der Integration der Precrash-Funktion in das Fahrzeug. Mit der S-TEC wurde an der Chip-Spezifikation gearbeitet, mit der Uni-Siegen an der Chip-Charakterisierung, mit DaimlerChrysler an der Definition der 3D-Bildverarbeitung und ihrer Integration ins Fahrzeug sowie an der Fahrzeugregelung, an der auch die FH Trier beteiligt war. Mit der EADS wurde an der Charakterisierung der PMD-Kameras gearbeitet.

**Abbildung 7: Kooperationsmatrix:**

	TEMIC	A.D.C.	S-TEC	Daimler-Chrysler	EADS	ZMD	Uni Siegen	FH Trier
TEMIC		□ ◆	□ ◆	□ ◆	□ ◆	□ ◆	□ ◆	□ ◆
A.D.C.	□ ◆		□ ◆	□ ◆	□ ◆		□ ◆	□ ◆
S-TEC	□ ◆	□ ◆				□ ◆	□ ◆	
Daimler-Chrysler	□ ◆	□ ◆					□ ◆	□ ◆
EADS	□ ◆	□ ◆						
ZMD	□ ◆		□ ◆				□ ◆	
Uni Siegen	□ ◆	□ ◆	□ ◆	□ ◆		□ ◆		
FH Trier	□ ◆	□ ◆		□ ◆				

Außerhalb des Konsortiums wurden Aufträge vergeben zur Fertigung von Leiterplatten an die Firma Fela, zur Bestückung der Leiterplatten an die Firma Tecnotron und zur Herstellung der Linsen und Objektive an die Firma Skrobol. Dabei fand kein Knowhow-Transfer statt. Es wurde lediglich die zur Abarbeitung des Auftrages notwendige Information weitergegeben.

Eine verstärkte Zusammenarbeit fand mit dem Automobilhersteller Audi statt. Audi ist der für das PMD-Thema wichtigste Kunde. Audi fördert derzeit als einziges Unternehmen die PMD-Technologie und wird sie voraussichtlich als erster OEM in den Markt einführen. Die S-TEC gehört über die PMD-TEC und die AEV zum Audi-Konzern und wird daher auch von dort gefördert. Um eine intensivere Zusammenarbeit zu ermöglichen, wurde eine Geheimhaltungsvereinbarung mit Audi unterzeichnet, die inhaltlich im Wesentlichen dem Kooperationsvertrag entsprach. Dies ermöglicht es der A.D.C. und der Temic, die AEV bei der Vermarktung der PMD-Technologie zu unterstützen und im Gegenzug auch von der AEV bei der Entwicklung gefördert zu werden.

## 2 Detaillierte Projektdarstellung

### 2.1 Erzielte Ergebnisse des Teilvorhabens

#### 2.1.1 Teilprojekt 2: Entwicklung der Sender und Optiken

##### 2.1.1.1 AP 2.1 Sender-Spezifikation

Die Spezifikation des Senders leitet sich vom Systemkonzept ab, im Wesentlichen von den Kameraparametern und der Einbausituation. Sie ist in folgender Tabelle zusammengefasst:

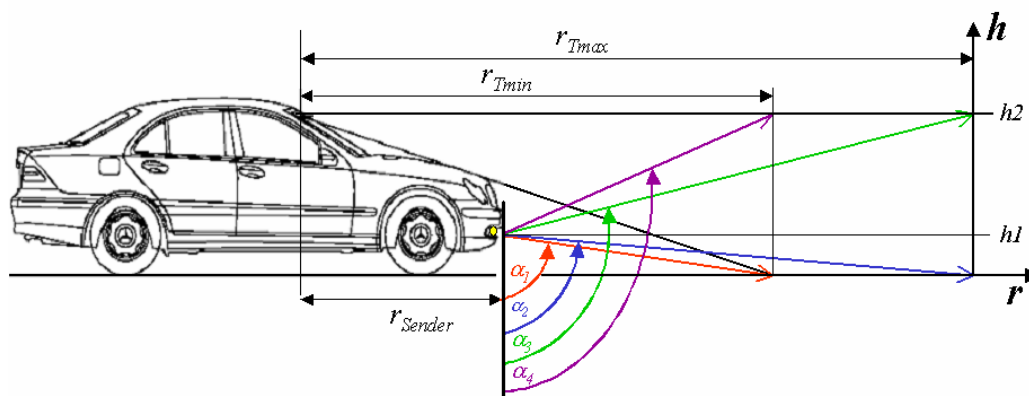
Parameter	Ziel-Wert	Bemerkung
Augensicherheit	Laser Klasse 1	nach EN 60825-1:1994 +A11:1996 + A2:2001
Reichweite	1,9m ... 18,5m	
Horizontaler Abstrahlwinkel (Vollwinkel)	45°	Strahlstärke ist auf 50% abge- sunken
Horizontale Abstrahlcharakteris- tik	homogen im Beobachtungs- raum	
Vertikaler Abstrahlwinkel (Vollwinkel)	7° - 8° (Einbauhöhe = 0,35m)	Strahlstärke ist auf 50% abge- sunken
Vertikale Abstrahlcharakteristik	Gaußförmig	Begründung siehe Text
Wellenlänge	>800nm	
Max. Modulationsfrequenz	20 MHz	
Anstiegs-/ Abfallzeit	10ns	
Max. Burstdauer	1ms	
Cut off Modulationsfrequenz	>35 MHz	Verstärkung um 3dB gegen- über DC abgefallen
Max. Duty Cycle im Burst	0,5	
Min. Burstwiederholrate	3,75ms	für 8-Phasenmessung in 30ms
Max. mittlerer Duty Cycle	0,133	
Min. optische Pulsleistung (aus dem Sender)	20W	im spezifizierten Winkelbereich
Min. mittlere optische Leistung (aus dem Sender)	2,66W	im spezifizierten Winkelbereich
Einbauraum	Unterhalb der Stosstange; Einbauhöhe = 0,35m (anstatt Nebelscheinwerfer)	Ein optisches Übersprechen zwischen Sender und Empfän- ger wird verhindert. Einbauraum hinter Wind- schutzscheibe wäre unvorteil- haft groß.
Einbauraumgröße (Breite x Höhe x Tiefe)	150mm x 100mm x 95mm	Nicht größer als Nebelschein- werfer
Betriebstemperatur	-40°C ... 70°C	
Lagertemperatur	-40°C ... 100°C	

**Tabelle 3: Sender-Spezifikation**

Wesentliche Punkte der Spezifikation sind unter anderem der Einbauort und Raum, Abstrahlcharakteristik und Leistung, der Thermalhaushalt bei den spezifizierten Betriebstemperaturen und die Augensicherheit.

Die Einstufung des Senders in die Laser Klasse 1 ist für den Einsatz im Fahrzeug unumgänglich. Berechnungen, deren Ergebnisse noch in AP2.2 angesprochen werden, haben gezeigt, dass eine Quelle mit dem tolerierbaren Sendedurchmesser (optisch) von ca. 50mm maximal 40 Watt aussenden darf. Dies entspricht einer Leistung von ca. 20W in den spezifizierten Winkelbereich bei einer gaussförmigen Winkelverteilung.

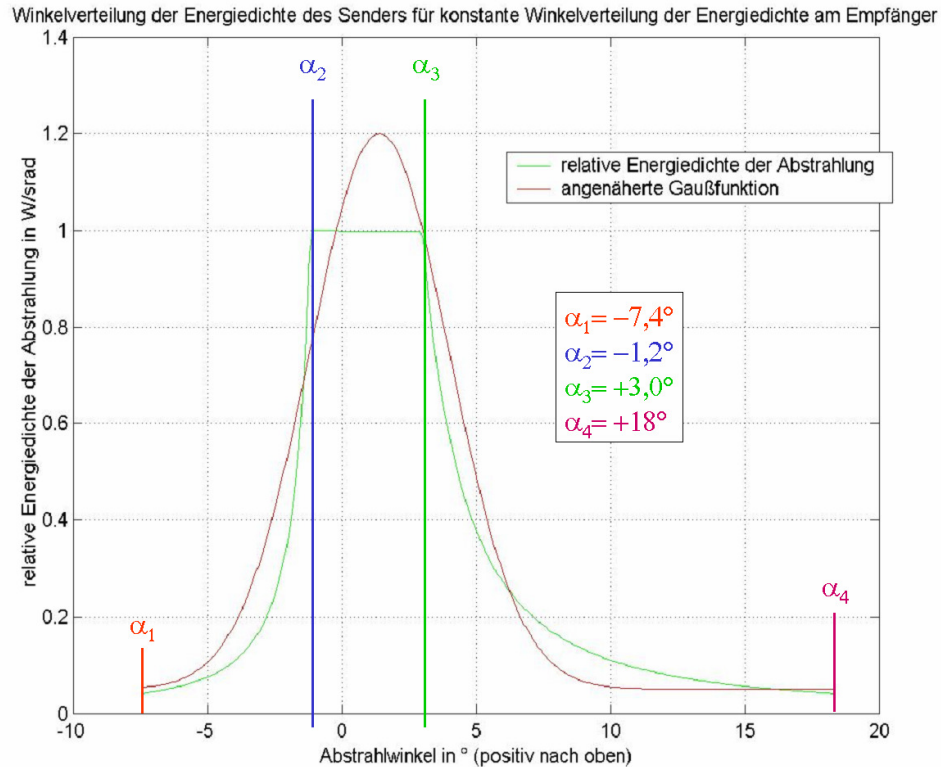
Weiterhin wird angestrebt, den IR-Sender nicht direkt neben den Empfänger hinter die Windschutzscheibe zu platzieren, da der benötigte Einbauraum zu kostbar und ein optisches und elektromagnetisches Übersprechen vom Sender zum Empfänger unbedingt zu verhindern ist. Ein nahe liegender Einbauraum wäre im Bereich der Scheinwerfer oder Nebelscheinwerfer. Die einfachere und designtechnisch schönere Integration ist im Nebelscheinwerfer-Bereich knapp unterhalb der Stoßstange (Einbauhöhe ca. 0,35m). Problematisch ist dabei allerdings die benötigte Ausleuchtung in kleinen Entfernungen vom Fahrzeug. Eine bessere Ausleuchtung kann durch mehr als einen Sender erreicht werden. Besonderes Augenmerk war dabei darauf zu richten, dass die beiden Sender so aufeinander abgestimmt wurden, dass sich keine zusätzlichen Entfernungsmessfehler einstellen, die nicht korrigierbar waren, insbesondere bei kurzen Entfernungen. Neben der gleichmäßigeren Ausleuchtung bei Verwendung eines zweiten Senders erhält man eine Verdopplung der ausgesendeten optischen Leistung, die einen deutlichen Gewinn in der Performance des Gesamtsystems verspricht.



**Abbildung 8: Definition der Variablen zur Beschreibung der Winkelverteilung am Fahrzeug:**

Im spezifizierten Winkelbereich für S&G wird eine homogene horizontale Abstrahlcharakteristik gefordert, da über den gesamten horizontalen Winkelbereich bis zu einer max. Entfernung von 40m gemessen werden soll. Lediglich in den äußeren Winkelbereichen, die von der Precrash-Funktion überwacht werden, ist eine geringere Ausleuchtung hinreichend. In der Vertikalen ergeben sich demgegenüber andere Anforderungen. In den extremen vertikalen Winkelbereichen zwischen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  bzw.  $\alpha_3$  und  $\alpha_4$  (siehe Abbildung), in denen teilweise über ein Zielobjekt hinweg bzw. auf den Straßenbelag gemessen wird, sind geringere max. Entfernungen und dementsprechend Abstrahlstärken gefordert. In dem Winkelbereich zwischen  $\alpha_2$  und  $\alpha_3$  ist hingegen eine möglichst homogene Abstrahlstärke gewünscht, da hier bis zu der max. Entfernung von 40m gemessen werden muss. In Abbildung 9 ist die

vertikale Abstrahlcharakteristik dargestellt, die sich theoretisch ergibt, wenn angenommen wird, dass sich die Bestrahlungsstärke von Objekten an den Grenzen des definierten Beobachtungsbereiches nicht ändert.



**Abbildung 9: Theoretische vertikale Strahlstärkenverteilung**

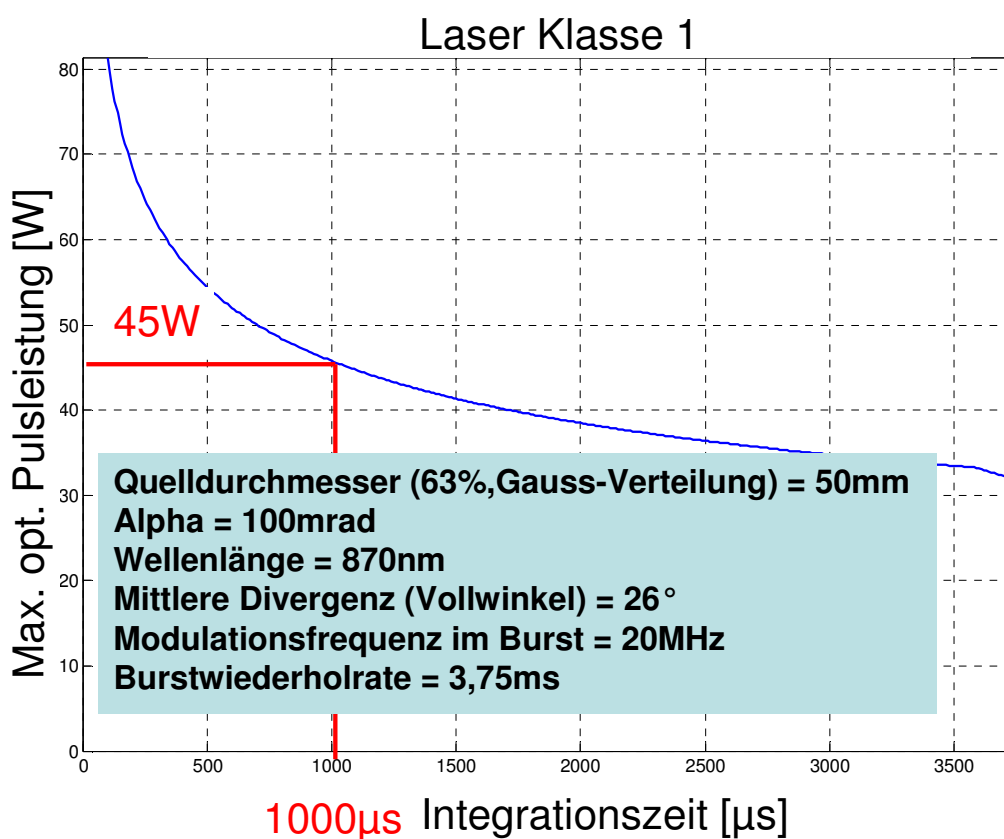
Die Abbildung 9 zeigt, dass die theoretisch notwendige vertikale Abstrahlcharakteristik sehr gut durch eine Gaußverteilung angenähert werden kann, was der optischen Strahlformung, die in AP2.2 erarbeitet wurde, entgegenkommt. Der vom Sender geforderte vertikale Abstrahlwinkel (Vollwinkel) entspricht einer Halbwertsbreite von etwa  $8^\circ$  für die angenäherte Gaußfunktion.

Die spezifizierte Betriebstemperatur von maximal  $70^\circ\text{C}$  stellt hohe Anforderungen an den Thermalhaushalt des Senders. Bei einer anzunehmenden optisch-elektrischen Effizienz von maximal 30% müssen bei dem geforderten Betriebsmodus von 40W optischer Pulsleistung und einem mittleren Tastverhältnis von 13% ca. 20W Verlustleistung in Wärme an die Umgebung abgeführt werden. Dies lässt sich bei anzunehmenden Temperaturdifferenzen von maximal 20-30 Kelvin zwischen Gehäuse und Umgebung kaum durch eine passive Kühlung erreichen. Daher wird eine aktive Kühlung vorgesehen.



### 2.1.1.2 AP 2.2 Sender-Optik

Nach AP 2.4 wurden LEDs als Senderelemente für eine PMD-Beleuchtungseinheit ausgewählt. Grundvoraussetzung für den Betrieb der Beleuchtungseinheit ist die Gewährleistung der Augensicherheit durch Einhaltung der Kriterien für die Laser Klasse 1. Dies war sowohl für eine einzelne LED nachzuprüfen als auch für ein LED-Array. Die Rechnungen für die Einzel-LED bestätigten die Laserklasse 1. Zur Kalkulation eines Arrays gingen wir von einer Fläche mit ca. 5cm Durchmesser aus. Dies entspricht dem gewünschten Bauraum. Das folgende Diagramm zeigt, welche maximale Pulsleistung die Sender bei den spezifizierten Betriebsbedingungen ausstrahlen dürfen, um noch innerhalb der Klasse 1 zu liegen.



**Abbildung 10: Berechnungen zur Augensicherheit**

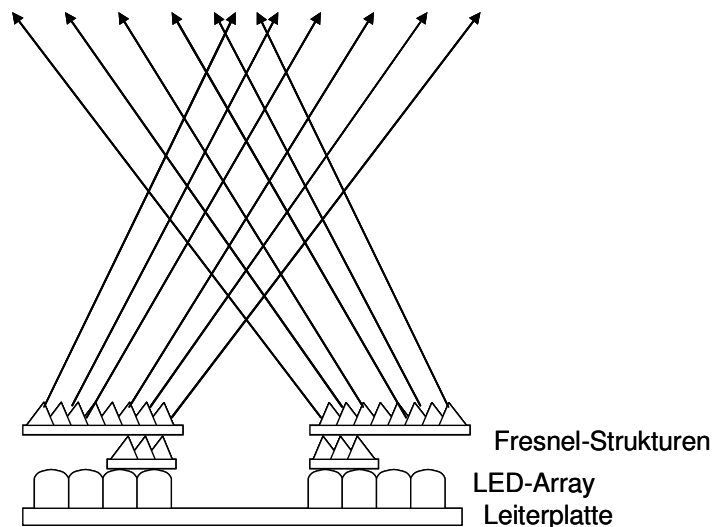
Nach den Berechnungen sind LEDs sowie LED-Arrays für augensichere Beleuchtungseinheiten in einem PMD-Betriebsmodus anwendbar. Ein Vergleich der bei den Standard-LEDs vorgegebenen Winkelverteilung der Strahlung mit der in der Spezifikation gewünschten zeigt Abweichungen, sowohl für die horizontale, als auch für die vertikale Verteilung.

**Tabelle 4: Vergleich der vorhandenen mit der gewünschten, spezifizierten Abstrahlcharakteristik**

<i>Parameter</i>	<i>LED</i>	<i>Spezifikation</i>	<i>Bemerkung</i>
<b>Horizontaler Öffnungswinkel</b>	<b>20°</b>	<b>45°</b>	<b>Vollwinkel</b>
<b>Vertikaler Öffnungswinkel</b>	<b>20°</b>	<b>8°</b>	<b>Vollwinkel</b>
<b>Horizontale Abstrahlcharakteristik</b>	<b>gaußförmig</b>	<b>homogen</b>	
<b>Vertikale Abstrahlcharakteristik</b>	<b>gaußförmig</b>	<b>gaußförmig</b>	

Der tolerierbare Einbauraum (Nebelscheinwerfer) schränkt die maximale Anzahl von LEDs auf etwa 100 Einzelelemente ein, die bei dem verfügbaren LED-Package in einem Array untergebracht werden können. Die Aufteilung in 2 getrennte Arrays wird durch das Elektronik-Konzept vorgegeben. Durch kurze Leitungen soll eine störungsfreie Ansteuerung der Elemente ermöglicht werden. Ein weiterer Grund ist die Notwendigkeit, die Verlustwärme effektiv ableiten zu können, was durch den Aufbau und die Anordnung stark begünstigt wird.

Vom Optik-Konzept wird nun gefordert, die horizontale Verteilung der LEDs näherungsweise zu verdoppeln und die vertikale Verteilung deutlich zu verringern, d.h. weiter zu fokussieren.

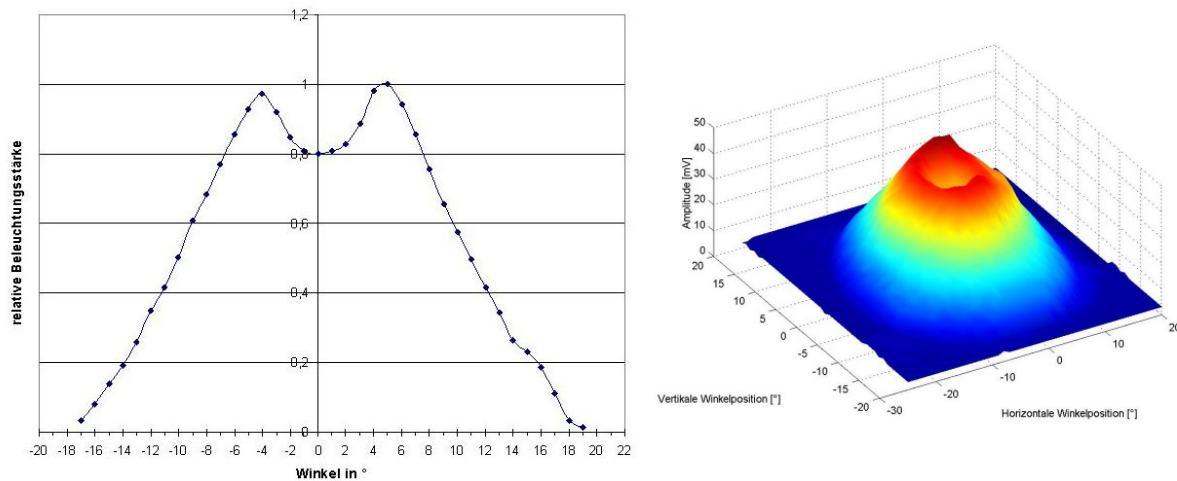


**Abbildung 11: Fresnelstrukturen zur Strahlaufweitung**

Die Aufweitung der Verteilung in horizontaler Richtung wurde durch die in Abbildung 11 skizzierte Anordnung von Fresnelstrukturen[Jahn03] erreicht. Zur Homogenisierung wurde ein zweistufiger, an die Abstrahlcharakteristik der LEDs angepasster Aufbau verwendet. Die Fresnelstrukturen wurden so berechnet, dass die gewünschte Verbreiterung näherungsweise erzielt wurde. Die Homogenisierung wurde durch die Anpassung des Flächenverhältnisses der beiden Fresnel-Stufen eingestellt. Die Ablenkung über Kreuz reduziert die Abschattung durch Strukturen am Rand, wie z.B. das Gehäuse. Das Ergebnis der Rechnungen ließ es zu, bei den Fresnelplatten auf Standardelemente zurückzugreifen.

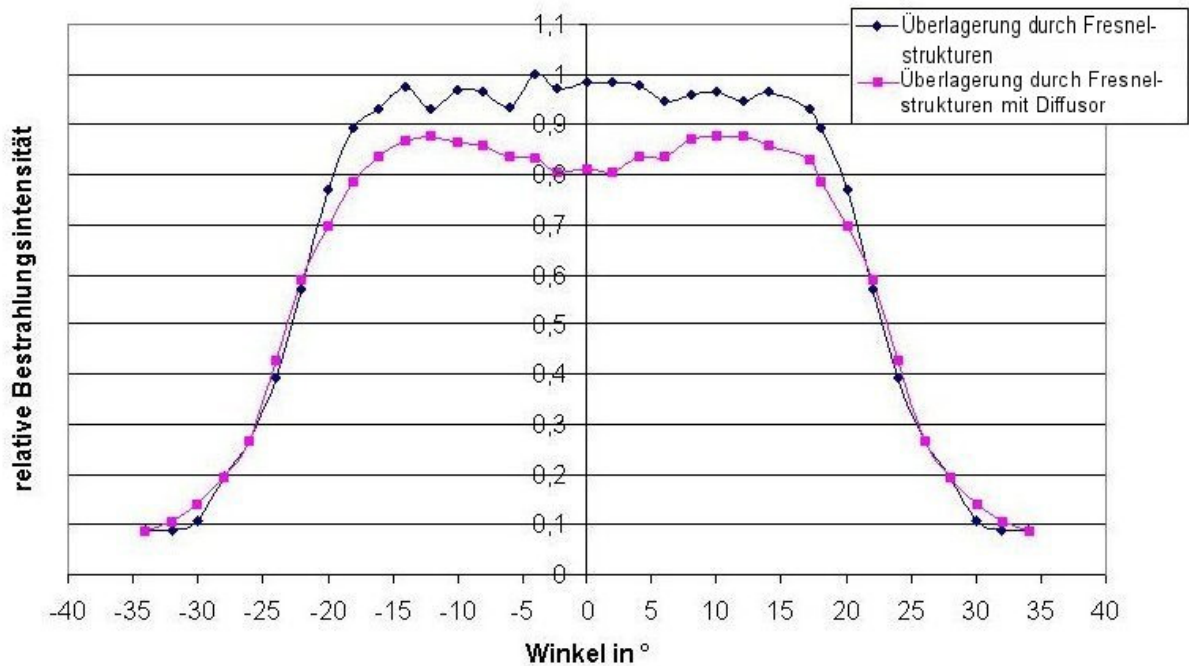
Sie wurden bearbeitet und in einen Musteraufbau integriert, mit dessen Hilfe die optische Wirkung vermessen wurde.

Zur Darstellung der Wirkung der Fresnelplatten wurden zuerst die „nackten“ LED-Arrays vermessen. Die Winkelverteilung, die an den LEDs nachgewiesen werden konnte, zeigt nachfolgende Abbildung 12. Ein Vergleich mit den Augensicherheitsberechnungen ergibt, dass bei der gemessenen Winkelverteilung unter Einhaltung der spezifizierten Betriebsbedingungen ein Diffusor nicht notwendig wurde. Das Konzept eines Diffusors wurde vorsorglich durchgerechnet, für den Fall, dass Leistungsspitzen in der Winkelverteilung auftreten. Da ein Diffusor allerdings in der vertikalen Verteilung zu einer Verschlechterung führt, da vertikal eine möglichst konzentrierte Verteilung erwünscht ist, wurde auf den Diffusor verzichtet. Die Abbildung der Messergebnisse zeigt, dass neben der horizontalen Aufweitung auch eine Homogenisierung wünschenswert war. Die Verteilung ist in den Randbereichen näherungsweise gaußförmig und weist im Zentrum eine Ringstruktur auf.



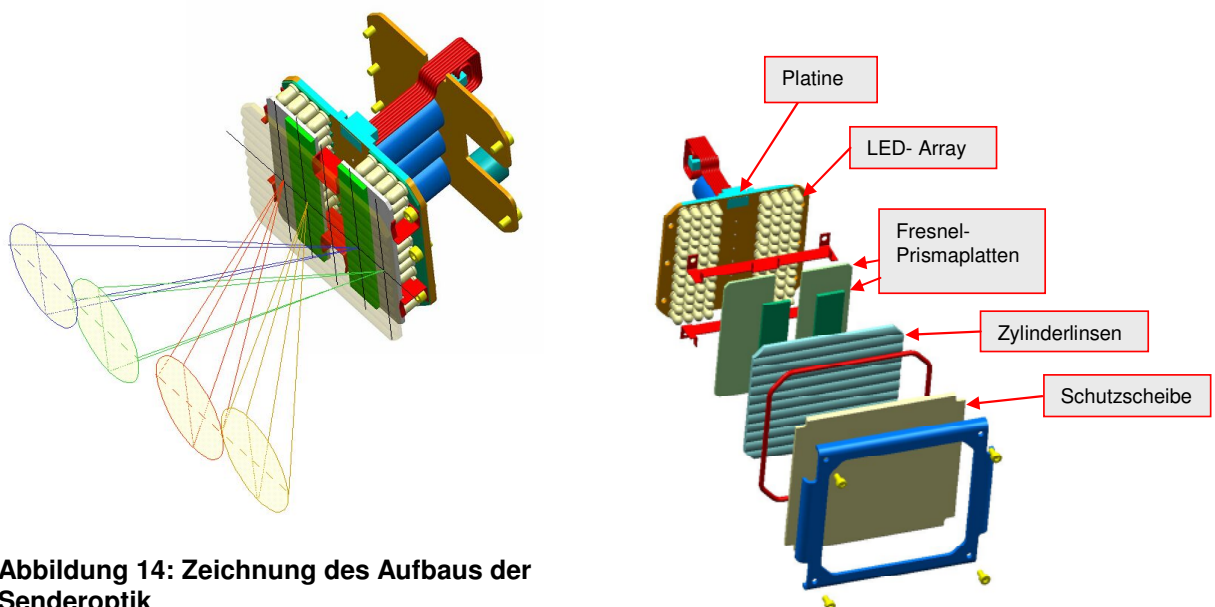
**Abbildung 12: Winkelverteilung der LED-Abstrahlung**

Die Vermessung der Winkelverteilung mit Anwendung der Fresnelplatten vor den LEDs zeigt eine deutliche Verbreiterung auf den gewünschten Winkelbereich und ein sehr homogenes Plateau (s.u.).



**Abbildung 13: Gemessene horizontale Winkelverteilung der Bestrahlungsstärke nach Überlagerung durch Fresnelstrukturen**

In vertikaler Richtung sollte die Strahlung bestmöglich, d.h. auf ca. 8°, fokussiert werden. Modellrechnungen für die LEDs mit entsprechender Optik, sowie Aufbauten im Labor mit unterschiedlichsten Fokussierungsoptiken ergaben übereinstimmend, dass eine Fokussierung der LEDs im gewünschten Umfang nicht effizient ist. Eine kurze Brennweite ergibt eine starke Vergrößerung der ohnehin schon großen virtuellen Quellgröße. Eine lange Brennweite erhöht dramatisch die Verluste durch Streustrahlung, was für den Wunsch nach einer Erhöhung der Strahlstärke deutlich kontraproduktiv ist.



**Abbildung 14: Zeichnung des Aufbaus der Senderoptik**

Wir konnten im Labor nachweisen, dass eine Verkleinerung der vertikalen Verteilung um einige wenige Grad möglich ist. Das Resultat wäre allerdings zu gering, um den Kostenaufwand für eine größere Stückzahl zu rechtfertigen. Dennoch wurden zwei Prototypen aufgebaut. Zwei der Sender wurden mit einem Array aus Zylinderlinsen ausgestattet, deren Brennweite sich aus den Labormessungen ergab. Vor jeder LED-Reihe wurde eine Zylinderlinse zur Fokussierung angebracht. Die anschließende Vermessung des kompletten Senders ergab die Resultate, die in untenstehenden Abbildungen präsentiert werden.



Abbildung 15: Senderoptik

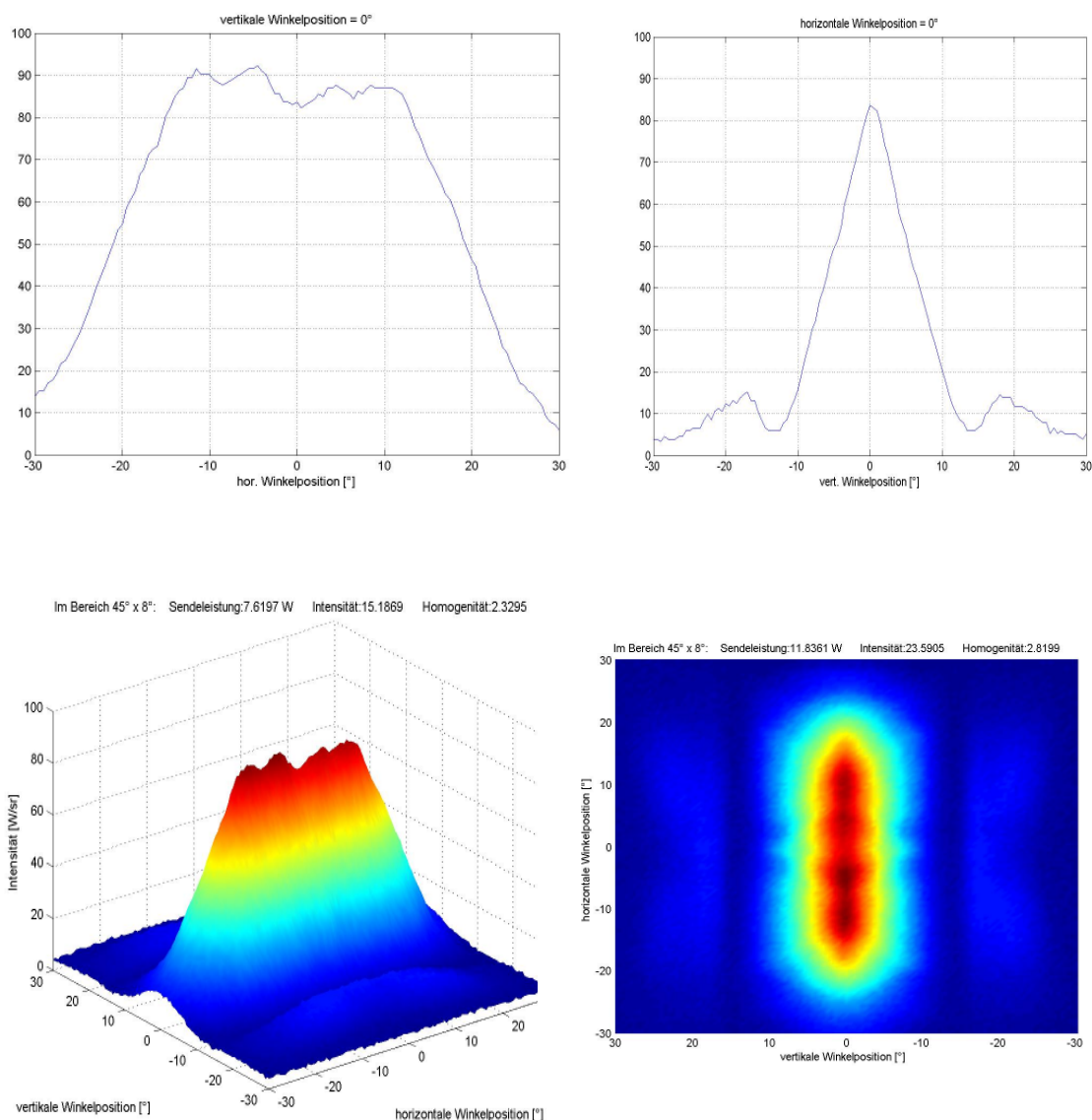


Abbildung 16: Abstrahlcharakteristik der Sender mit Fresnelplatten und Zylinderlinsen

Bei obigen Resultaten[Bis04] handelt es sich um das beste Ergebnis, das mit Standard-Bauteilen zu erreichen ist. Die einzige Methode, LED-Strahlung stärker zu fokussieren, liegt in kundenspezifischen Aufbauten der Arrays. In den letzten Monaten des Projektes wurden von Osram derartige LED-Elemente entwickelt, allerdings zu spät, um in das auslaufende Projekt noch Eingang zu finden.

Um das Projektziel zu erreichen, die Technologie zu entwickeln und ihr Potential aufzuzeigen, war eine projektspezifische Anpassung nicht zwingend notwendig. Auch die Vermarktung konnte mit einer Optik ohne Zylinderlinsen gut vorangetrieben werden.

Da eine Bauteilentwicklung mit einem erheblichen Kostenaufwand verbunden ist, insbesondere da es die Anfertigung teurer Werkzeuge notwendig macht, wurde darauf verzichtet. Der immense finanzielle Aufwand wäre durch das Projekt nicht ansatzweise gedeckt gewesen.

Für den Aufbau des Versuchsfahrzeuges wurden dementsprechend Sender verwendet, ausgestattet mit LED-Arrays und Fresnelplatten, deren horizontale Verteilung der oben gemessenen entsprach und deren vertikale Verteilung mit der der Einzel-LED übereinstimmt.

### 2.1.1.3 AP 2.3 Sender-Elektronik

Die Hauptaufgabe der Senderelektronik bestand in der Ansteuerung der LEDs, so dass die optische Ausgangsstrahlung zeitlich möglichst rechteckförmig in den Einzelpulsen und auch möglichst gleichförmig innerhalb der Bursts verlief. Oberste Priorität hatte eine reproduzierbare Pulsform. Wenn sich schon systematische Abweichungen ergeben sollten, mussten sie mindestens kalkulierbar und damit korrigierbar sein. Weitere Aufgaben waren die Sicherstellung der Stromversorgung, die Überwachung der Temperatur, die Diagnose des Senders zusammen mit einer Kommunikationseinheit zur Übermittlung der gesammelten Daten über den Fahrzeug-CAN. Die Temperaturüberwachung soll dazu dienen, während der Entwicklungsarbeiten Daten zum Zustand des Senders zu seiner Charakterisierung zu sammeln. Für das endgültige Produkt ist daran gedacht, der Kamera die Temperaturdaten des Senders zu übermitteln, um der Kamera eine situationsabhängige, angepasste Reaktion zu ermöglichen. Die Kamera könnte z.B. automatisch die Integrationszeit und damit die Belastung der Sender reduzieren. Dies erlaubt eine an die Umweltbedingungen angepasste Belastung und damit eine optimierte Nutzung des Potentials der Sender. Unabhängig von der Ansteuerung wurde auch eine thermische Begrenzung integriert, die es dem Sender gestattet, auch bei einer fehlerhaften Ansteuerung den Strom und damit die Ausgangsleistung autonom zu begrenzen, bevor eine thermische Überlastung eintritt. Auch eine autonome Lüftersteuerung ist damit möglich. Eine weitere wichtige Aufgabe der Begrenzungseinheit ist die Sicherstellung der Augensicherheit bei einer Fehlfunktion. Einen Überblick über das Elektronikkonzept zeigt folgende Abbildung:

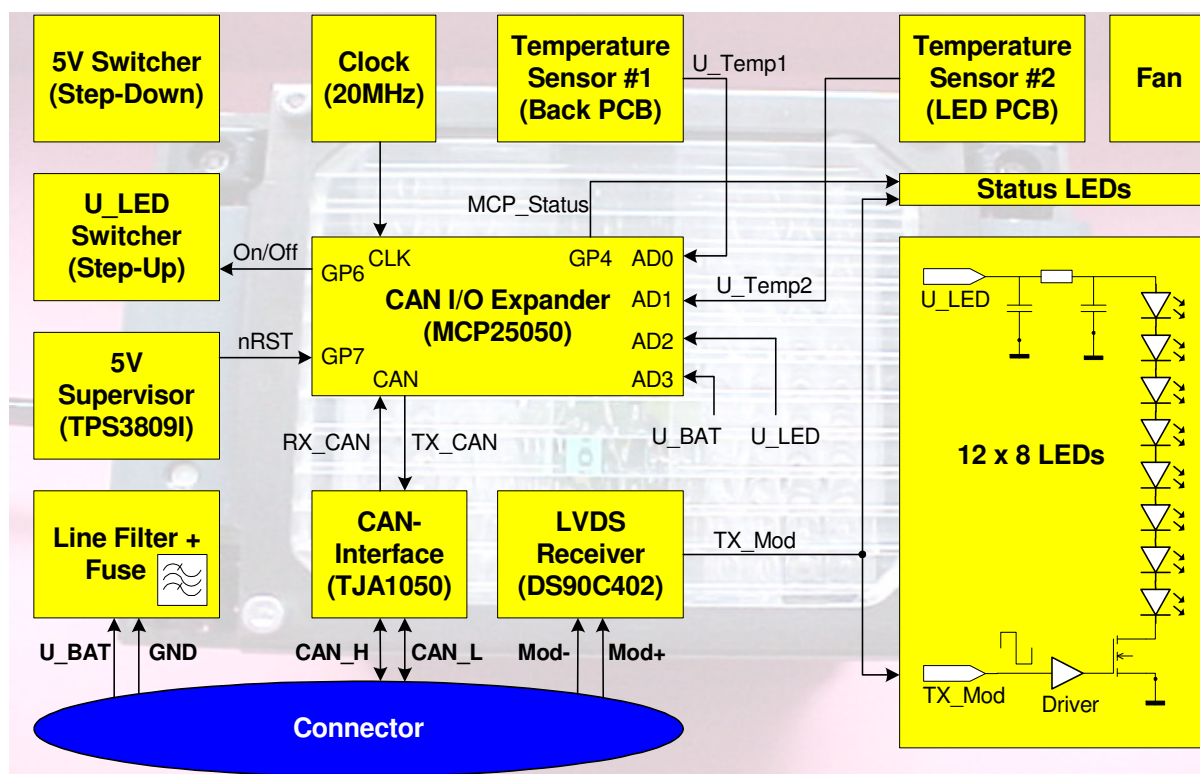
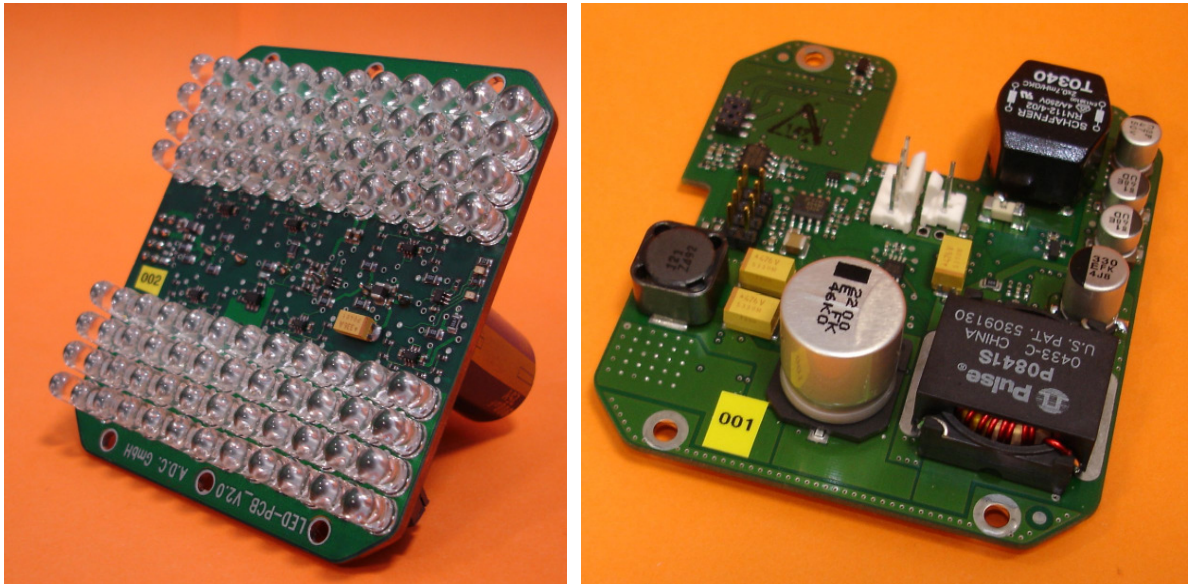


Abbildung 17: Module der Senderelektronik



Angeordnet wurden die Komponenten auf zwei Platinen. Aufgrund der Wärmeableitung von den LEDs haben auf den Front- oder LED-Platinen nur die notwendige Ansteuerung und ein Temperatursensor Platz. Sämtliche weitere Einheiten, die Stromversorgung, die Kommunikationseinheiten sowie die Temperaturüberwachung und Begrenzung sind auf der zweiten Platine aufgebracht.



**Abbildung 18: LED (Front) Platine und Steuerplatine auf der Rückseite**

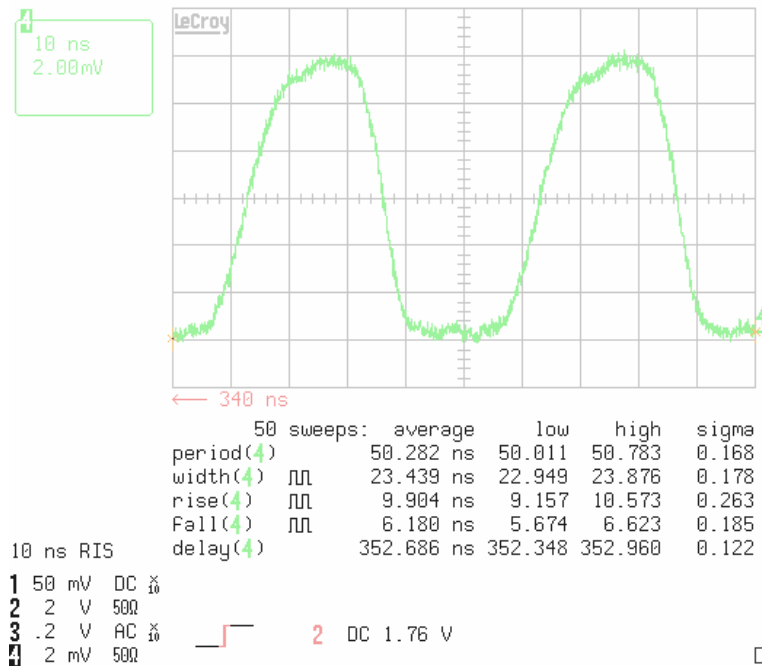
Man erkennt auf Abbildung 18 die beiden LED-Bänke. Der rückseitige Raum hinter den LEDs muss frei bleiben, für einen optimalen Anschluss der Wärmeabführung. Daher findet die Ansteuerung nur zwischen den LED-Reihen Platz. Als Platinenmaterial wurde gut wärmeleitendes Kupfer gewählt. Hinter der Ansteuerung sitzen die Kapazitäten zur Pufferung der hohen Impulsströme. Insgesamt können auf der dargestellten Platine 96 LEDs aufgebracht werden. Zur Entwicklung der Ansteuerung wurden diverse Schaltungen im Labor aufgebaut und getestet. Nach positiver Erprobung wurde eine erste Generation von Platinen und damit Sender aufgebaut. Diese dienen zusammen mit den Kameras dazu, in einem ersten Integrationsansatz die Systemfunktionen zu entwickeln und zu evaluieren. Nach einer ausgiebigen Optimierungs- und Redesignphase wurden die abgebildeten Platinen aufgebaut.

Auf der zweiten zurückgesetzten Platine sind die Stromversorgung, die Kommunikationsbausteine, wie z.B. die CAN-Schnittstelle zur Diagnose, die Temperaturüberwachung und eine Fehlerschutzschaltung untergebracht.



Nach Aufbau der Platinen wurde die Elektronik eingehend charakterisiert. Wichtigstes Merkmal war die ausgestrahlte optische Pulsform. Sie wird auf folgender Abbildung dargestellt:

31-Jul-03  
12:46:28



### Test Conditions:

U_LED	= 14.8V
T_burst	= 1ms
T_brep	= 3.75ms
T_pulse	= 25ns
T_prep	= 50ns
DC_m	= 0.133

**Abbildung 19: Gemessene optische Signalform der Sender**

Die Triggersignale zur Ansteuerung werden über LVDS übertragen, zur Reduzierung von Störungen, beispielsweise aus dem Motorraum. Damit ließ sich eine qualitativ gute Reproduzierbarkeit der Signale erreichen. Die Anstiegs- und Abfallzeiten, die sich in Kombination mit der Elektronik ergaben, waren kurz genug, um auch bei den benötigten 20MHz noch eine volle Aussteuerung der LEDs zu gewährleisten. Der Grundpegel während der Ausschaltzeiten war vernachlässigbar, so dass sich ein nahezu optimaler Modulationskontrast ergab.

Nach erfolgreicher Erprobung der elektronischen Funktionen standen die Platinen für weitere Integrationsarbeiten zur Verfügung.

### 2.1.1.4 AP 2.4 Sender-Elemente

Die grundsätzlichen Anforderungen an Senderelemente für eine PMD-Kamera sind die Modulierbarkeit, die Leistungsfähigkeit und der Kostenfaktor. Beim Kostenfaktor zählt das Verhältnis Preis pro optischer Leistung (€ pro Watt). Ausgehend von den Erfahrungswerten der Systemtechnik wurden die Eckdaten für die Marktrecherche[Sid02] festgelegt.

**Tabelle 5: Technische Rahmendaten, die als Grundlage für die Markterhebung dienen**

Wellenlänge	Nahes Infrarot
Tastverhältnis im Burst	50%
Mittleres Tastverhältnis	10%
Integrationszeit	100µs ..... 2 ms
Optische (Puls)Leistung	10 W
Mittlere optische Leistung	1 W
Modulationsfrequenz	20 MHz
Anstiegs- und Abfallzeit	≤ 10 ns

Grundsätzlich waren 3 Technologien in der Lage, die Richtwerte zu erreichen. Wir erkannten LEDs, VCSEL-Elemente und Halbleiterlaserdioden als prinzipiell geeignet. Die Marktrecherche sollte ergeben, ob geeignete Elemente in der jeweiligen Technologie verfügbar waren. Die folgenden Tabellen stellen exemplarisch die wichtigsten aufgefundenen Elemente dar:

Die VCSEL-Elemente sind die technisch neuesten Bauteile und daher standardmäßig noch kaum verfügbar. Ein aussichtsreicher Kandidat von ULM Photonics befindet sich ebenfalls noch im Entwicklungsstadium.

**Tabelle 6: 2002 verfügbare VCSEL-Elemente**

Distribu- tor	Part No.	Power [mW]	Wave length [nm]	Forward current If [mA]	Forward Voltage Vf [V]	Reverse Voltage Vr [V]	Ave. Po- wer	Slope ef- ficiency	No. of elements for 10W
Avalon pho- tonics	Ap850	7	850	10	1.7	5	0.035	0.4	1428.5
Roithner	TMC4f	5	840	10	2.2	5	0.025	0.22	2000
Lasermate	VCA- MxN- A1G	5	850	15	2	5	0.025	0.3	2000
ULM Photonics	Proto- typen	890	980	2000	-	-	4.45	0.4	11.23
Coherent	VCSE L	500	850	1000	-	-	-	-	20

**Tabelle 7: 2002 verfügbare Laserdioden**

Manufacturer	Part No.	$\lambda$ [nm]	Power [W]	Pulse type	Rise/fall time [ns]	D.C [%]	IF [A]	Mean power [mW]	Price [€]	Price per watt [€]
Hamamatsu	L7055-04	870	20	Pulse	0.5	0.075	30	15	184	9.2
Roithner	RLT810-100	810	100	Pulse	0.1	0.1	17	100	340.3	3.41
Infineon	SPL CG81-0	780	2	CW	<10	100	3	2000	110	55
Infineon	SPL PL 85	850	10	Pulse	0.1	0.1	14	10	19.6	1.96
Frk. Laser	IR-CW-808-6	808	6	CW	<10	100	7	6000	3470	578.3
Boston	2000-808-2	808	2	CW	<10	100	2.7	2000	600	300
OEC-GmbH	ARR18C020	808	20	CW	<10	100	30	20000	1168	58.4
Coherent	B1-20C-19-30A	810	20	CW	<10	100	30	20000	1628	81.4

Laserdioden sind technologisch ausgereift. Es existieren Laserdioden für den kontinuierlichen Betrieb (CW-Modus) und solche, die speziell für die Aussendung kurzer intensiver Pulse entwickelt wurden. Für diese sogenannten Puls Laserdioden stellen die von einer PMD-Kamera benötigten Bursts aufgrund ihrer Dauer leider eine zu hohe Belastung dar.

CW-Laserdioden sind zwar in der Lage, die benötigten Burstdauern zu verkraften, allerdings ist ihr Preis um mehrere Größenordnungen zu hoch. Einzige marktfähige Lösung ist die Anpassung der Puls Laserdioden an die geforderten Betriebsmodi. Dazu sind die verfügbaren Elemente zu testen und weiter zu entwickeln.

**Tabelle 8: 2002 verfügbare LEDs**

Manufacturer	Part No.	$\lambda$ [nm]	Power CW (Po) [mW]	IF at CW Po [mA]	Rise/fall time [ns]	Power dissipation at 8% D.C [mW]	Price [€]	Price per watt [€]	Half view angle [ $\delta\theta$ (°)]	No. of elements for 10 W Pulse
Vishay	TSFF5200	870	40	100	10	135	0.5	1.31	$\pm 10$	25
Vishay	TSFF5400	870	40	100	10	135	0.5	1.31	$\pm 20$	25
Optek	OPN2005	850	30	100	15	-	0.5	1.66	$\pm 60$	33.33
Optek	OPN1027	880	35	100	25	-	0.5	1.56	$\pm 8$	29.4
Epitex	L870-66-60	870	1600	800	15	5000	39.9	4	$\pm 60$	1.5
Osram	SFH4301	950	32	100	10	216	0.3	1.71	$\pm 10$	57
Osram	SFH4503	950	32	100	10	216	0.3	1.71	$\pm 20$	57













Eine Grobauswahl tauglicher Sendeelemente wurde auf der Basis von zugänglichen Datenblättern getroffen. Prinzipielles Problem dabei ist, dass die Datenblätter keine Daten in dem von uns benötigten Betriebsmodus enthalten, dem sogenannten Burstmodus. Gewöhnliche Datenblätter werden gängigerweise auf der Basis von regelmäßig abgestrahlten Einzelpulsen angefertigt. Messungen mit Pulspaketen sind durchweg nicht erhältlich.

Die von uns durchgeführte Marktanalyse zur Selektion geeigneter Sendeelemente konnte also mit vertretbarem Aufwand nur mit dem verfügbaren Datenmaterial erfolgen. Das Resultat der Markt- und Technologieanalyse lässt sich wie folgt zusammenfassen:

<b>Laser:</b>	hohe Bandbreite mittleres Entwicklungsrisiko	sehr hoher Preis (nur CW-Laser verwendbar)
<b>VCSEL:</b>	hohe Bandbreite mittleres Entwicklungsrisiko	hoher Preis
<b>LED-Arrays:</b>	mittlere Bandbreite niedriges Entwicklungsrisiko	mittlerer Preis
<b>(Einzel-)LEDs:</b>	mittlere Bandbreite Entwicklungsrisiko gering	relativ niedriger Preis

Tabelle 9: zusammengefasste Ergebnisse der Marktrecherche

Tabelle 10: Entscheidungsmatrix für die Auswahl der Technologie

	Bandbreite	Preis	Entwicklungsrisiko	Bemerkung
<b>Laser</b>				nur CW-Laser verwendbar
<b>VCSEL</b>				
<b>LED-Arrays kundenspez.</b>				
<b>Standard-LEDs</b>				

Auf der Basis dieses Ergebnisses und der relativ kurzen Projektlaufzeit entschieden wir uns für das geringste Risiko, die Nutzung der LED Technologie. Aus denselben Gründen wurde auf Standardelemente zurückgegriffen. Das Entwicklungsrisiko innerhalb des Fördervorhabens für kundenspezifische Packages schien uns zu hoch.

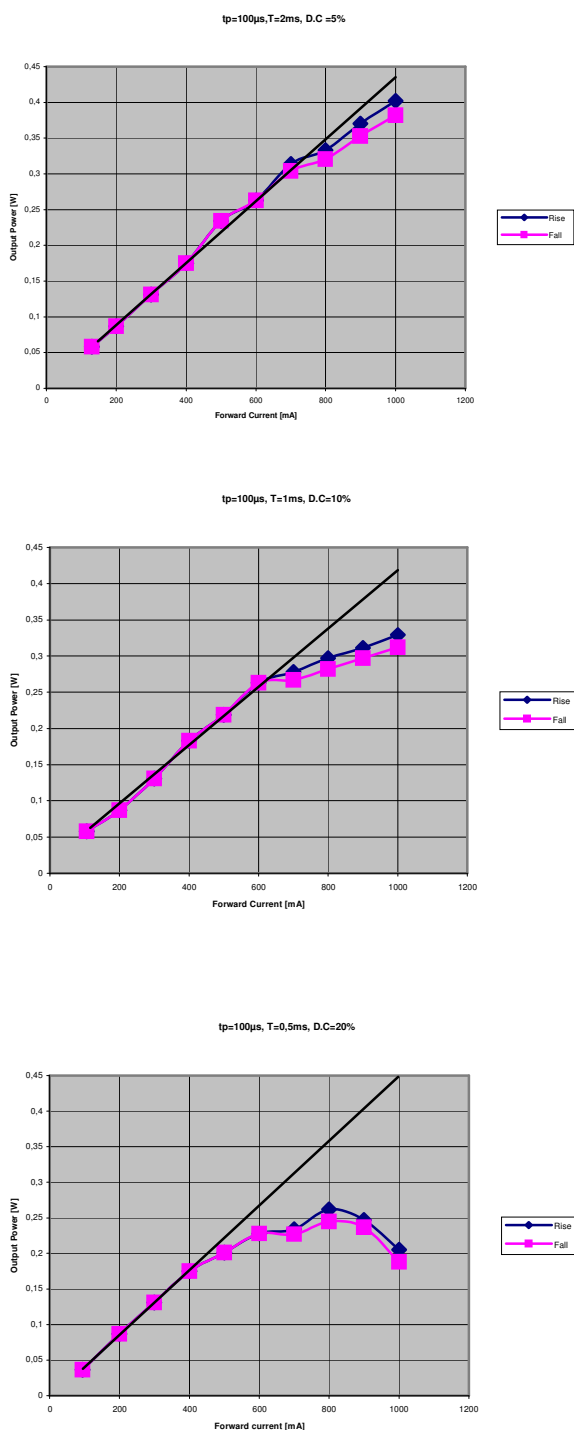
Eine Vorselektion geeigneter LEDs wurde auf der Basis des erhältlichen Datenmaterials getroffen. Die ausgewählten LEDs wurden eingehenden Tests unterzogen, mit dem Ziel, uns auf ein bis zwei Kandidaten zu fokussieren. Wir wählten die TSFF 5200 von Vishay. Mit den festgelegten Komponenten wurde ein Qualifizierungsschema erarbeitet, mit dessen Hilfe nicht nur die erhältlichen Daten verifiziert werden konnten, sondern das vor allem dazu diente, eine breite Datenbasis in dem von uns benötigten Burst-Betriebsmodus zu sammeln.

Die rechts dargestellten Bilder zeigen beispielhaft Aufnahmen einer Belastungsmessung für eine spezielle Parameterkombination.

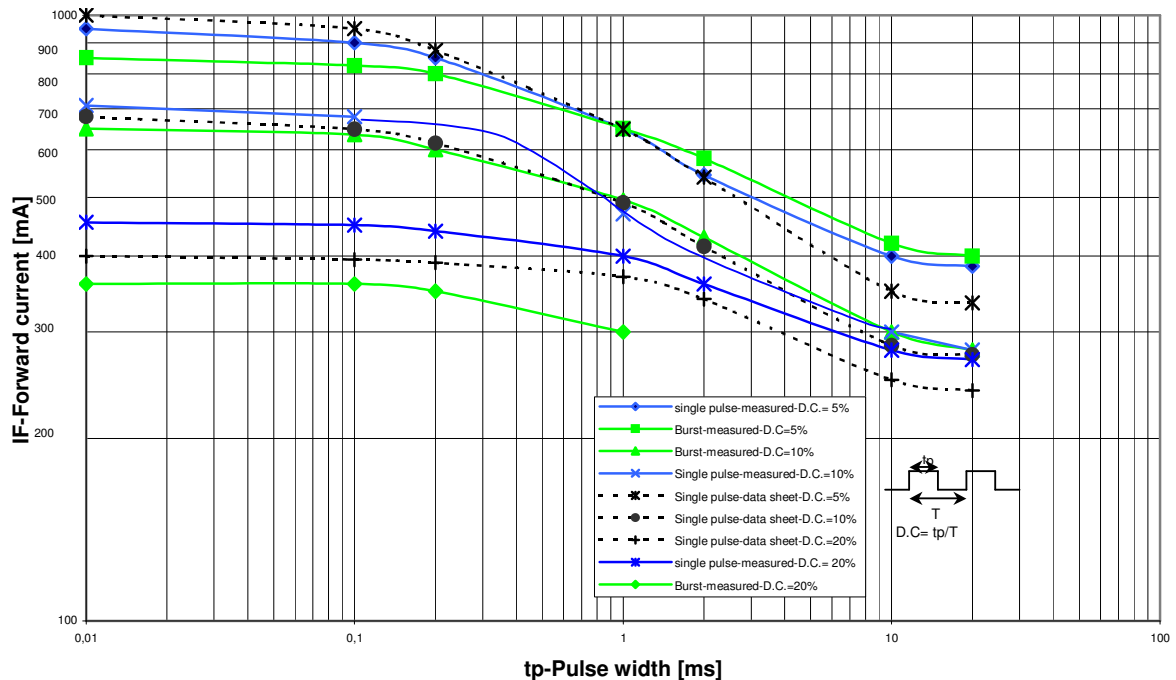
Die Diagramme zeigen die optische Leistung, die die LEDs abhängig vom Durchgangsstrom abgeben. Man erkennt ab einem bestimmten Strom die Abweichung vom linearen Verhalten. Ab diesem Punkt steigt die abzuführende Verlustleistung überproportional an. Die Elemente beginnen ineffizient zu werden. Der nichtlineare Bereich sollte beim Betriebsmodus der Sender also nach Möglichkeit vermieden werden.

Es wurde eine Vielzahl solcher Messungen zu statistischen Auswertungen und zur Verfolgung systematischer Zusammenhänge aufgenommen. Die zusammengefassten Resultate wurden in die Diagramme eingetragen, die üblicherweise in den Datenblättern zu finden sind. Dies diente der Plausibilisierung und einem Vergleich, um auch zukünft-

Abbildung 20: Optische Ausgangsleistung der LED bei hoher Belastung



tig Datenblätter sinnvoll nutzen zu können. Das Diagramm zeigt, welcher Durchgangsstrom abhängig von der Pulsdauer maximal durch die LED fließen darf. Das Tastverhältnis ist ein Parameter, der für eine Kurve jeweils konstant ist. Verglichen werden die Einzelpulscharakteristiken der Datenblätter mit der PMD-erforderlichen Burstfolge. Dabei entsprechen sich im Diagramm (x-Achse) die Einzelpulsbreite und die Burstbreite:



**Abbildung 21: Vergleich der Belastungsmessungen im Burstbetrieb mit den Angaben zum Pulsbetrieb der Datenblätter**

Der schematische Vergleich im Diagramm zeigt, dass in dem für uns interessanten Pulsdauerbereich bei gleichem Tastverhältnis der Burstbetrieb offenbar eine höhere Belastung für die LEDs darstellt. Die Berücksichtigung dieses oben dargestellten Belastungsunterschiedes setzte uns nun in die Lage, die Belastbarkeit von marktüblichen Standard-LEDs auf Basis des Datenmaterials einzuschätzen und ihre Tauglichkeit zu prüfen. Die **TSFF 5200** von Vishay wurde abschließend und endgültig als die geeignetste LED ausgewählt.

### **2.1.1.5 AP 2.5 Modulationsprinzipien**

Dieses Arbeitspaket wurde von DaimlerChrysler, der Uni Siegen sowie zu einem kleineren Anteil von der A.D.C. bearbeitet. Durch die Modellierung der PMD-Kamera und der Auswerteverfahren sollten mögliche Modulationsverfahren anhand von Simulationsrechnungen ausgiebig untersucht werden. Ziel war die Auswahl bzw. Optimierung geeigneter Verfahren. Dies war die Verantwortung von DaimlerChrysler und der Uni Siegen. Die Umsetzung der Verfahren in Hardware, das bedeutet die Integration in die Kamera sowie die nachfolgende Evaluierung und Optimierung, war der Arbeitsanteil der A.D.C..

Als Resultat der Simulationsrechnungen[Schnei03][Bru01] war kein Verfahren eindeutig zu definieren. Prinzipiell boten sich zwei unterschiedliche Wege an. Die Nutzung einer harmonischen Modulation und einer Pseudonoisemodulation[Albr01]. Zusammenfassend ergaben sich bei jedem der genannten Verfahren Vor- aber auch Nachteile. Da bei Anwendung gleicher Frequenzen der Eindeutigkeitsbereich bei Verwendung der Pseudonoisecodierung deutlich größer ist als bei einer harmonischen Modulation, wurde das PN-Verfahren anfangs favorisiert. Dabei spielte auch die Mehrzielfähigkeit eine Rolle. Diese lässt sich allerdings nur über eine Unterteilung des Messbereiches in Intervalle - auch „Entfernungstore“ genannt - erreichen. Dadurch lassen sich zwei Ziele in demselben Messfenster (Pixel) trennen, wenn sie sich in unterschiedlichen Entfernungstoren aufhalten. Diese Unterteilung ergibt auch eine entsprechend feinere Auflösung der Entfernungsmessung und damit verbunden eine höhere Genauigkeit. Leider ergaben die Simulationsrechnungen aber auch eine nicht unerhebliche Fehldetektionswahrscheinlichkeit, vor allem in Gegenwart von Fremdlicht, die eine sichere Zuordnung der Ziele zu den Entfernungstoren nicht mehr erlaubt, insbesondere bei schwachen Signalen. Das Auftreten gleicher Systeme im Feld macht es notwendig mehrere verschiedene PN-Codierungen statistisch oder nach einem gewissen systematisch korrelierten Muster verteilt anzuwenden. Dadurch kann verhindert werden, dass sich zwei entgegenkommende Verkehrsteilnehmer gegenseitig behindern. Aufgrund der Fehldetektionswahrscheinlichkeit schien es ratsam auf die Unterteilung des Messbereiches zu verzichten. Demgegenüber wurde als Optimierung ein Mehrfrequenzverfahren mit einer pixelindividuell adaptiv gestalteten Verzögerungszeit vorgeschlagen. Mehrzielfähig ist dieses Verfahren allerdings nicht mehr!

Das vorgeschlagene Verfahren stellt in der Umsetzung allerdings schon einen erheblichen Aufwand dar. Praktisch existieren bisher mit einem derartigen Verfahren keinerlei Erfahrungen. Im Vergleich dazu lässt sich auch bei Benutzung einer harmonischen Modulation ein großer Eindeutigkeitsbereich mit einer hohen Entfernungsmessgenauigkeit kombinieren. Die Lösung liegt in der Anwendung von sogenannten Mehrfrequenzverfahren, die bei Phasennmessungen bereits seit langem Stand der Technik und einfach anwendbar sind. Störungen durch andere Verkehrsteilnehmer mit gleichen Systemen lassen sich durch ein Verfahren mit statistisch verteilter zeitlicher Verzögerung der Messzeiten realisieren. Nur das System, dessen Messphasen zeitlich exakt mit den empfangenen Pulsen übereinstimmen und keine statistische Verteilung aufweisen, liefert ein Messsignal. Mit harmonischen Modulationsverfahren existiert bei der A.D.C. und der Temic eine langjährige Erfahrung. Um das Entwicklungsrisiko innerhalb des extrem kurzen Zeitrahmens des Projektes so gering wie möglich zu halten, entschieden wir uns für die Anwendung einer harmonischen Modulation.

Im Verlauf der Erfahrungen mit der Systemcharakterisierung wurde dieses Verfahren ständig angepasst und optimiert. Der im Projekt entwickelte und angewendete Messzyklus wird in folgender Abbildung dargestellt:

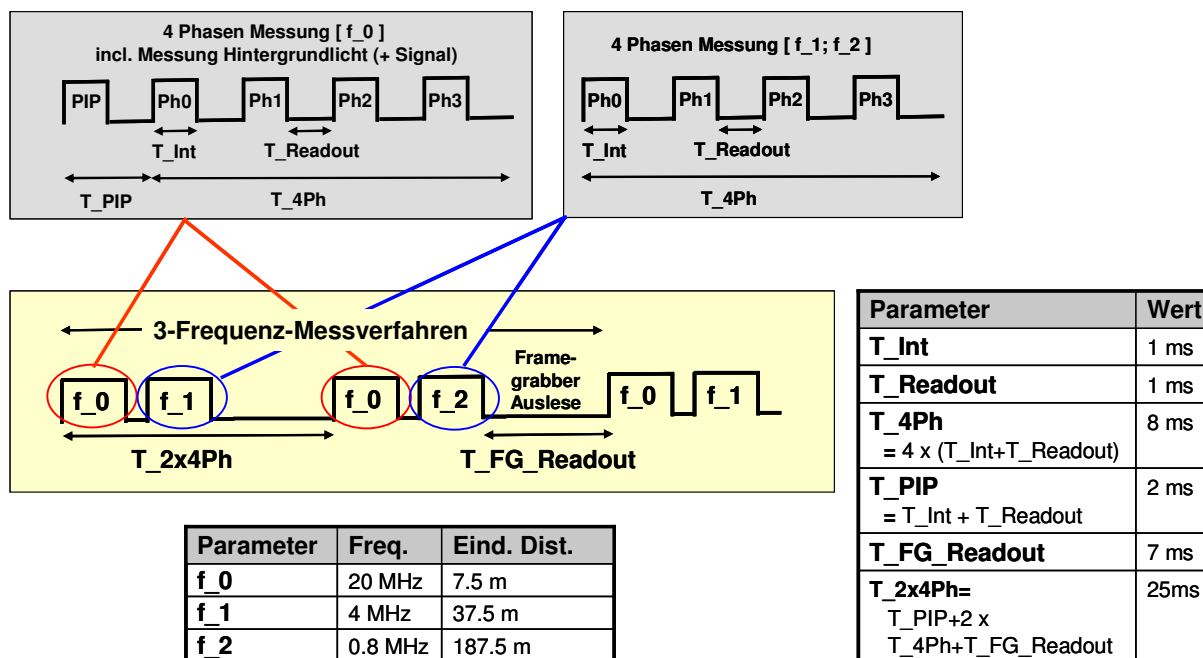


Abbildung 22: Messablauf

Die Anforderung für S&G war eine Zykluszeit von ca. 30ms zu realisieren. Um eine hinreichende Genauigkeit zu erhalten, benötigt man Messzeiten von ungefähr 1ms. Unter Berücksichtigung der Auslesezeiten und des Mehrfrequenzverfahrens lassen sich innerhalb eines Messzyklus acht Phasenmessungen unterbringen. Für eine gute Entfernungsmessung sind mehrere Einzelphasenmessungen notwendig. Da eine „Achtphasenmessung“ keine markante Verbesserung gegenüber einer Vierphasenmessung bietet, wurde beschlossen in derselben Messzeit zwei „Vierphasenmessungen durchzuführen. Diese ließen sich noch durch eine statistische Verknüpfung verbessern. Der Vorteil ist, dass sich bereits in einem Messzyklus Messungen mit zwei unterschiedlichen Frequenzen durchführen lassen. Für die Anwendung von drei unterschiedlichen Frequenzen benötigt man 2 Messzyklen. Indem die höchste Frequenz in aufeinander folgenden Messzyklen jedes Mal verwendet wurde, konnten wir die Änderung einer Zielposition in einem einzigen Messzyklus erfassen. Um das Fremdlicht zu messen, wurde vor den eigentlichen Phasenmessungen eine „Dunkelmessung“ ohne Sender durchgeführt. Dies wurde notwendig, da die Charakterisierung einen deutlichen Einfluss des Fremdlichtes bei der Generierung eines systematischen Fehlers erkennen ließ. Zur Korrektur des Fehlers wurde die Information des Fremdlichts benötigt. Weiter wurde ebenfalls vor den Phasenmessungen das, von der Umgebung reflektierte, Signal grob erfasst, indem der Sender kurzzeitig aktiviert wurde. Dies diente dazu, vor den Phasenmessungen zur Aufnahme der Entfernungsbilder gleich die richtigen Verstärkerstufen einstellen zu können. Ein weiterer Optimierungsschritt bestand in der Einführung einer „Vormessphase“



(PIP=Pre-Integration-Phase). Dies war eine kurze Messphase vor den eigentlichen „Vierphasenmessungen“. Sie diente dazu, beobachtete Einschwingvorgänge innerhalb des Systems zu reduzieren um damit verbundene Entfernungfehler zu minimieren.

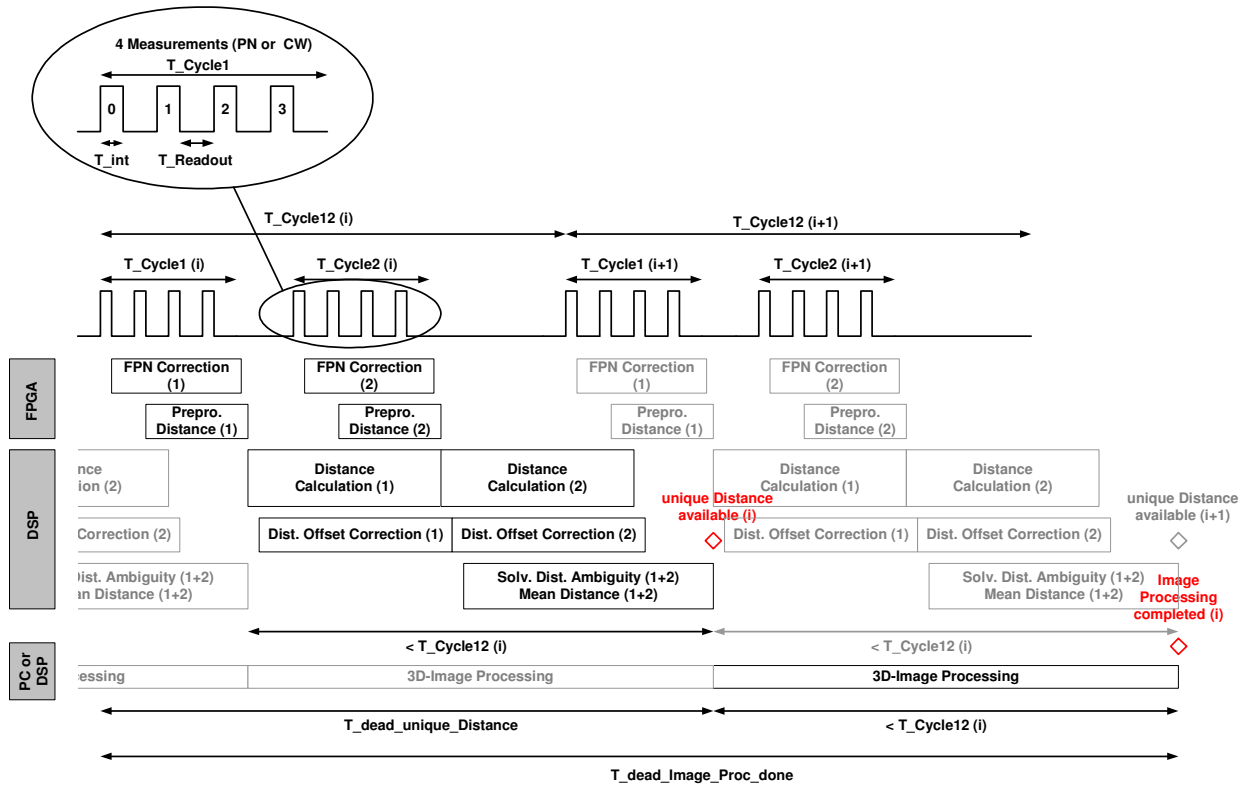


Abbildung 23: Timing der Datenerfassung und Verarbeitung

### 2.1.1.6 AP 2.6 Empfangsoptik

Zur Feststellung, ob bereits auf dem Markt verfügbare Objektive existierten, die für die PMD-Kamera verwendbar waren, wurde eine Marktrecherche durchgeführt. Das Ziel war, Objektive zu finden, die eine an die PMD-Pixel angepasste Auflösung von mindestens 200 $\mu$ m aufweisen. Sie sollten möglichst lichtstark sein, um viel Signal aufzufangen, möglichst keine Verzerrungen erzeugen, um wenigstens bei den Prototypen keine zusätzlichen Probleme mit der Charakterisierung und der Korrektur zu schaffen. Die Objektive sollten einen großen Bildwinkel aufweisen, entsprechend der Systemspezifikation. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Anforderungen:

<b>Parameter</b>	<b>Wert</b>	<b>Bemerkung</b>
Brennweite	12mm	bei 870nm
Kameraformat	2/3“	bzw. Bildfeld-Diagonale von 10,5mm
F-Zahl	<1,4	
Blickwinkel (hor. x vert.)	45° x 16°	
Pixelanzahl (hor. x vert.)	64 x 16	
Pixel-Pitch (Breite x Höhe)	155,33 $\mu$ m x 210,81 $\mu$ m	
Chip-Größe (Breite x Höhe)	9,94mm x 3,37mm	
Auflösung	5 lp/mm	>1/(2 x Pixel-Pitch[mm])
Optische Verzerrung	<10%	im Randbereich
Optische Eigenschaften	Langpass bei ca. 800nm; kein Infrarotfilter	Temperaturdrift vom IR-Sender und opt. Kantenfilter sind zu berücksichtigen
Objektiv-Größe (dia. x Länge)	30mm x 25mm	
Mount	C	
Linsenmaterial	Glas	
Betriebstemperatur	-40°C ... 85°C	
Lagertemperatur	-40°C ... 100°C	

**Tabelle 11: Anforderungen an eine PMD-Empfangsoptik für einen Prototyp-Aufbau**

Die Marktrecherche nach geeigneten Objektiven ergab folgende Auswahl. Aufgeführt sind die wichtigsten Exemplare. Darunter waren bereits sehr lichtstarke Objektive, weshalb ursprünglich auf eine eigene Objektiventwicklung verzichtet wurde. Die blau markierten Objektive wurden erworben und getestet. Die erste Generation von Kameras wurde mit dem Objektiv Computar mit einer Brennweite von 12,5mm aufgebaut.

Brennweite [mm]	F-Zahl [1]	Kameraformat ["]	Hersteller	Angle of View			Art	Typ Bezeichnung	Maße [Dia. x L]	Gewicht [g]	Preis [€]
				Hz.	Vt.	Vollw.					
12	1,3	2/3	Santec	30			Videosignalges. Blende, Weitwinkel-Ob.	13154	43,0 x 35,5	85	
12	1,4	2/3	Fujinon (sts, videotechnical)			38° 47' x 29° 35'	Kompakt-Objektiv	HF12.5HA-1	29,5 x 29,5	45	203.00
12	1,4	(2/3) 1/2	Hinkel-Elektronik				Standard-Objektiv	VLC-1214M (21049)	35 x 40	56	92.56
12	1,4	2/3	Schneider (EO)			29,9°	Kompakt VIS-NIR Objektiv	NT56-534 (EO)	31.5x40.3		656.00
12	1,4	2/3	WEISS				Lineare IR-Korrektur	CINEGON 12/1,4	34x40	88	932.64
12	1,8	2/3	Edmund Optics			30	Kompakt	M56-527	30.5x27	46	394.56
12	1,8	2/3	Tamron (Stemmer, WEISS)			40,9x30,9	Universalobjektiv	TAM 25-HA/12	29x24	40	187
12	1,2	1/2	Ultrak			22,3	Standard-Objektive	KL1212IC	37x34,5	74	
12	1,2	1/2	SillOptics			37°	Standard-Objektive	S5LPJ1212	37x34		
12	1,2	1/2	Pentax			30°	IR-Vergütung Standardo. (DC)	H1212R-IR-SN (Santec)	46x51	140	305
12	1,2	1/2	Computar(TIS)	30			Standard-Objektiv	H 1212 FI	39x32	46	70
12	1,2	1/2	In-situ				Kompakt-Objektiv	C-1212	29,5x		130
12	1,2	1/2	Cosmicar(TIS)	30			Standard-Objektiv	H1212B(TH)	30x35,5	67	130
12	1,4	1/2	Tamron			31,4°x23,3°	CS-Mount	12FM12CST	38x45	53,5	
12	1,4	1/2	Santec	29			Standard-Objektive	13097	35x26	50	
12	2,0	1/2	eaprotection			30°	Board Lens	HTL-1220			
12	2,0	1/2	Edmund Optics			30	Standard-Objektiv	M54-854	16x19,5		75,60
12,5	1,3	1	Edmund Optics			28,5°	Manu. Iris	M39-086	43x48		280.80
12,5	1,3	1	Computar(TIS)	55,5			Standard-Objektiv	V 1213	43x47,5	137	196\$
12,5	1,3	1	Stsvideo	55			Standard-Objektiv	C1213M (43020)	47 x 59	180	158
12,5	1,4	1	Cosmicar(TIS)				Standard-Objektiv	B1214D-2(KA)	42x50	135	200
12	1,8	1	In-situ				Standard-Objektiv	S-1218			155

**Tabelle 12: Ergebnis der Marktrecherche nach geeigneten Objektiven für die PMD-Kamera**

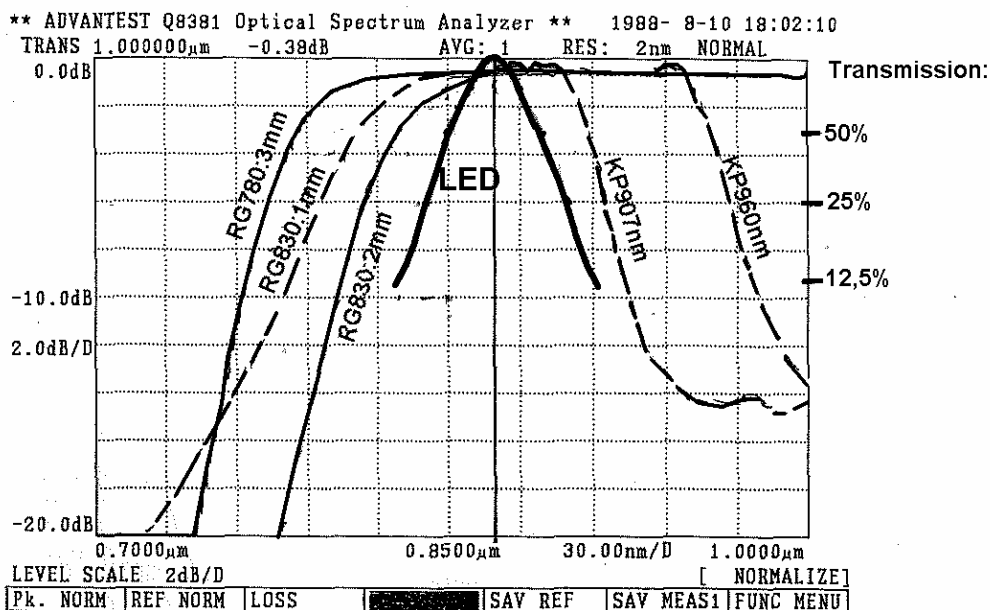
Obwohl das PMD-Pixel prinzipiell in der Lage ist, das Fremdlichtsignal zu reduzieren, ist diese Fähigkeit limitiert. Außerdem existieren Einflüsse des Fremdlichts, wie z.B. die Anhebung des Rauschpegels, der die Empfindlichkeit reduziert und systematische Fehler, die durch das Fremdlicht erzeugt werden. Das einfallende Fremdlicht war also bestmöglich zu reduzieren. Dazu sollte ein optischer Filter dienen. Ausgangspunkt für die Spezifikation war die Wellenlänge des Senders von 870nm. Zu berücksichtigen waren diverse Toleranzen, die temperaturabhängige Wellenlängenverschiebung des Senders und des Filters, die Verschiebung der Filterkante mit dem Blickwinkel und die fertigungsbedingte Toleranz aller Bauelemente. Möchte man bei Berücksichtigung aller Parameter unter Einbeziehung der spezifizierten Umgebungsbedingungen alle Einflüsse ausschließen, müsste eine Gesamtbreite des Durchlassbereiches des Filters von mehr als 100nm veranschlagt werden:

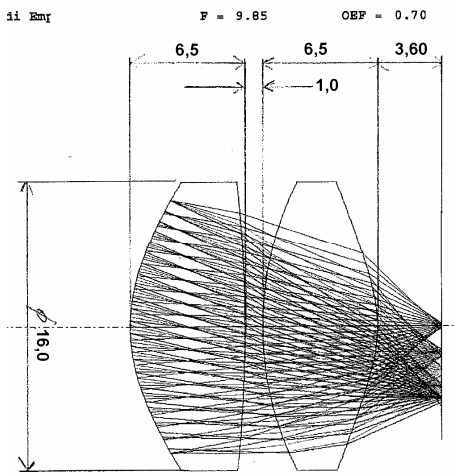
**Tabelle 13: Bestimmung der Durchlassbereiche der Filter auf Basis der Toleranzen**

Zentralwellenlänge der LED bei 25°C:	870nm
Spektrale Breite der LED:	+/-20nm
LED-Statistik in der Produktion:	+/-5 nm
Temperatur Koeffizient:	0.2nm/K
Max. Temp. :	-10 ... +100°C(entspricht:-2 ... +20nm)
Einfallswinkel:	0 ... 28° entspricht ca. 0 ... -28nm: dadurch ist eine Filter-Toleranz von 0 ... +28nm zu berücksichtigen
Filter Herstellungstoleranz:	+/-5 nm
Temperatureinfluss auf den Filter:	-0.05nm/°C für -10+50°C entsprechend: +0,5 .. -2,5nm
Kantenbreite: abhängig von der Filterqualität, d.h. den Kosten	
Dies führt auf eine <b>Filterspec.:</b>	T>80% im Bereich: <b>870nm von -35nm ... +79nm</b>

Die Verschiebung der Filterkante ist nur für Interferenzfilter zu berücksichtigen. Wählt man eine Filterkombination aus einem Absorptionsfilter für die kurzwellige Kante und einem Interferenzfilter für die langwellige Kante, muss die entsprechende Toleranz auch nur auf der langwelligen Seite berücksichtigt werden. Leider steht für die langwellige Filterkante kein Absorptionsfilter zur Verfügung. Daher erhält man mit der beschriebenen Kombination die günstigste Filterwirkung. Wir wählten als Absorptionsfilter ein 2mm dickes RG830, d.h. ein „Rotglas“ mit einer Filterkante bei 830nm und ein Interferenzfilter mit der Bezeichnung KP907, d.h. ein Kurzpassfilter mit einer Filterkante bei 907nm. Diese Werte wurden nach einer experimentellen Evaluierung festgelegt. Die folgende Skizze zeigt die spektrale Verteilung der Emission der LEDs und relativ dazu die unterschiedlichen Filterkurven. Wie die Messwerte demonstrieren, hat man bei Absorptionsfiltern die Möglichkeit, die Lage der Kante außer über das Filtermaterial noch über die Dicke des Filters fein zu justieren.

Abbildung 24: Filterkurven für ausgewählte opt. Filter





Im Rahmen einer Systementwicklung für ein sogenanntes MSM-PMD ließ Audi ein eigenes Objektiv entwickeln. Anlässlich einer Kooperation mit Audi stellte uns Audi die Benutzung dieses Objektivs für 3D-SIAM frei. Eine Überprüfung der Tauglichkeit verlief positiv. Die Auflösung des Objektivs war gerade noch akzeptabel und die Verzerrungen hielten sich ebenfalls in Grenzen. Da es im Vergleich mit den handelsüblichen Objektivs mit einer F-Zahl von 0,7 deutlich lichtstärker ist, wurde es schließlich ausgewählt. Für eine industrielle Fertigung ist allerdings darauf zu achten, die Optik zu vergüten. Im Verlaufe der Evaluierung registrierten wir eine starke Empfindlichkeit des Kamerasystems auf Reflexionen.

Abbildung 25: Prinzipieller Aufbau der Empfangsoptik

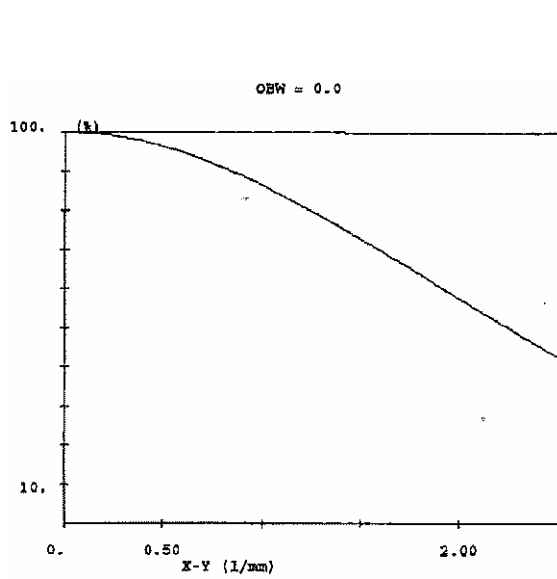


Abbildung 26: Auflösung des Objektivs (MTF)

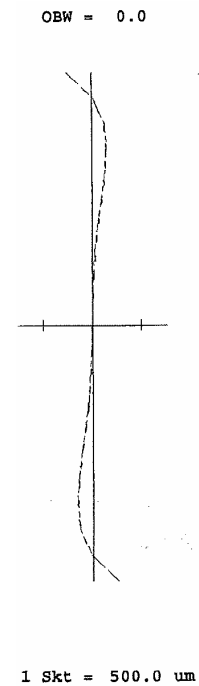


Abbildung 27: Queraberration

### 2.1.1.7 AP 2.7 Senderintegration

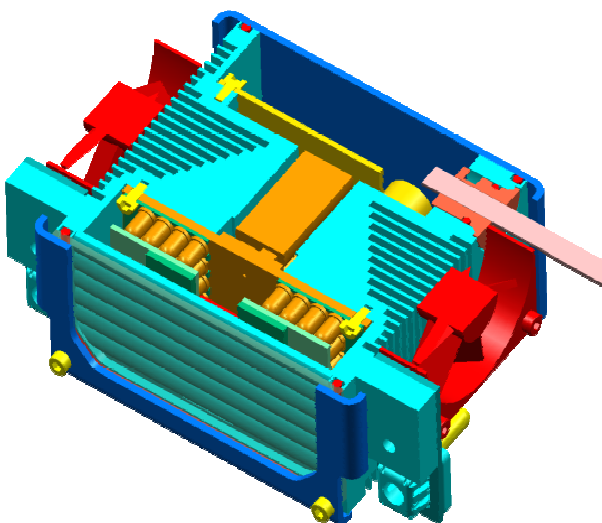
Nach Bearbeitung der Arbeitspakete 2.1 bis 2.6 waren die entwickelten Komponenten in einer Einheit zu integrieren. Die besondere Herausforderung bestand darin, ein Konzept zu finden, das in der Lage war die Verlustwärme abzuführen. Die Sender sollten im Außenraum montiert werden. D.h. die Gehäuse mussten luftdicht sein, um das Eindringen von Feuchtigkeit zu verhindern. Sie mussten gegen Spritzwasser geschützt sein und eine justierbare Halterung aufweisen. Die wichtigsten Kriterien sind noch einmal in folgender Tabelle zusammengefasst:

**Tabelle 14: Kriterien für die Bewertung der Sender**

- Wärmemanagement ( $T_a = -40 \dots 70 \text{ °C}$ ,  $P_d = 20 \dots 30 \text{ W}$ )
- Augensicherheit (Klasse 1, nach DIN EN 60825)
- EMV
- optische Pulsgestalt (Bandbreite)
- Abstrahlcharakteristik ( $45^\circ \times 16^\circ$ )
- Preis/ Leistungsverhältnis
- Entwicklungsrisiko

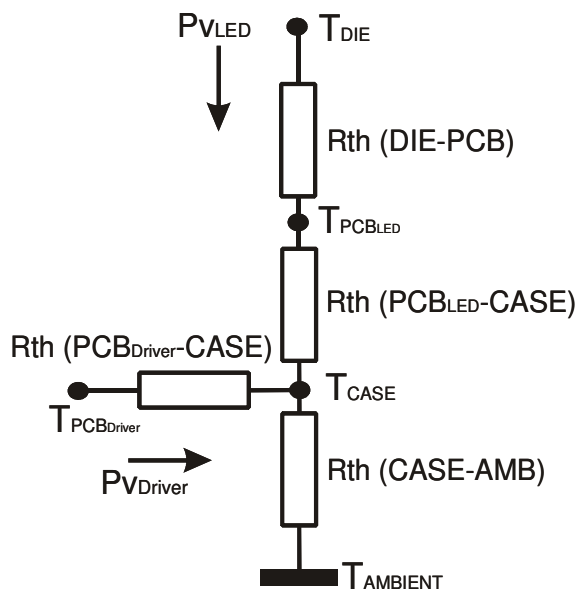
Die Augensicherheit, die optische Pulsgestalt, die Abstrahlcharakteristik, der Preis der Sendeelemente und das Entwicklungsrisiko wurden bereits in den vorhergehenden Arbeitspaketen diskutiert. Die EMV ist durch die Abschirmung des Alu-Gehäuses und Berücksichtigung der EMV-Richtlinien bei der Auslegung des Layouts bestmöglich gewährleistet.

**Abbildung 28: Querschnitt des Senders, Konstruktionszeichnung**



Das mechanische Konzept, das für eine möglichst effektive Abfuhr der Wärme sorgen sollte, ist in folgender Skizze vorgestellt. Direkt hinter den LEDs sorgt eine effektive mechanische Anbindung für einen optimalen Abtransport der Wärme. Eine Kupferplatte verhindert das Auftreten von Hot Spots. Zwischen der Platine und dem Gehäuse sorgt eine Wärmeleitfolie für den Ausgleich von Unebenheiten durch das Löten und damit für einen großflächigen Wärmeübergang. Um den Zustand des Senders möglichst präzise zu erfassen, wurde ein thermisches Modell entworfen [Han03], [Mül04](s. folg. Skizze). Die entsprechenden Punkte wurden bei verschiedenen Belastungszuständen und Umgebungstemperatu-

ren vermessen. Begonnen wurde mit der Vermessung der LEDs. Um die Chiptemperatur zu erfassen, wurden verschiedene Messverfahren angewandt. Die Durchlassspannung der Dioden wurde erfasst, die spektrale Verteilung der ausgesendeten Strahlung wurde vermessen, und schließlich wurden, praktisch und direkt, auch noch mehrere LEDs angebohrt, um über Messsonden die Temperatur in unmittelbarer Nähe der Chips zu messen. Umfangreiche Testreihen bestätigten das Modell:



Die Wärme wird auf dem Chip generiert. Von dort wird sie über das Package, maßgeblich über den Leadframe, d.h. die metallische Struktur zu der auch die Beinchen gehören, auf die Platine abgeführt. Zu einem kleinen Teil ist auch das Kunststoffpackage an der Ableitung beteiligt. Über die Platine wird die Energie dann auf das Gehäuse des Senders übertragen. Über das Gehäuse sollte die Wärme dann aktiv, d.h. über Lüfter, auf die Umgebung übertragen werden.

Eine weitere Wärmequelle ist die Platine der Stromversorgung. Auch diese Energie muss über das Gehäuse abgeführt werden. Dadurch ergibt sich ein zweiter Wärmepfad im Modell.

**Abbildung 29: Wärmeersatzschaltbild für den Sender**

Bis auf die Chiptemperatur lassen sich alle weiteren Temperaturen durch integrierte Sensoren einfach und vor allem während des Betriebs erfassen. Durch Kenntnis des ersten Wärmewiderstandes des LED-Packages kann über die Messung der Platinentemperatur auf die Chiptemperatur geschlossen werden. Sie ist das begrenzende Kriterium. Über eine intelligente Steuerung kann so die aktive Kühlung temperaturabhängig gesteuert oder der Betriebsmodus entsprechend angepasst oder begrenzt werden.

Ziel der thermischen Charakterisierung der LED bzw. des Senders ist, für ein gegebenes Gesamtsystem, bestehend aus LED, Elektronik, Platine, Kühlkörper und Gehäuse den thermischen Grenzbereich zu bestimmen. Über ein entsprechendes Wärmeersatzschaltbild lässt sich die maximale Verlustleistung bei bekannten Umgebungsbedingungen ermitteln, die die LED noch toleriert, ohne die kritische Junction-Temperatur von 100°C zu überschreiten. Denn eine langzeitige Belastung der LED im spezifizierten Grenzbereich wirkt sich direkt auf die Lebensdauer der LED aus.

Die technischen Möglichkeiten, die Wärmekapazitäten der LED-Chips zu ermitteln, stehen uns nicht zur Verfügung. Die Daten sind auch von den Herstellern nicht erhältlich. Daher beschränken wir uns auf ein quasistatisches Modell aus Widerständen. Das dargestellte Wärmeersatzschaltbild lässt sich statisch, im DC-Betrieb, relativ einfach vermessen. Die Widerstände (Einheit [K/W]) lassen sich über Temperaturmessungen an den verschiedenen Stufen des Weges des Wärmeflusses unter Kenntnis der abgeführten Wärmeleistung bestimmen. Kritisch dabei ist die Messung der Chip-Temperatur ( $T_j$ =Junction-Temperatur) der LED.

### Bestimmung der Chip-Temperatur über eine Wellenlängenmessung

Für die Messung der Chiptemperatur macht man sich das Phänomen der Wellenlängenverschiebung der ausgesendeten Strahlung bei Temperaturveränderungen zu Nutze. Die Abbildung zeigt die über ein optisches Spektrometer gemessene Verschiebung der Peak-Wellenlänge über der Chip-Temperatur. Die gemessene Steigung der Geraden von 0,21nm/K ist der sogenannte Temperaturkoeffizient der Wellenlänge. Mit der Kenntnis des Koeffizienten lässt sich nun umgekehrt über die gemessene Wellenlängenverschiebung die Chip-Temperatur bestimmen. Diese Methode hat sich für den DC-Betrieb bewährt. Eine zeitaufgelöste Messung der Chip-Temperatur für den Puls-Betrieb ist mit dieser Messmethode hingegen nicht möglich.

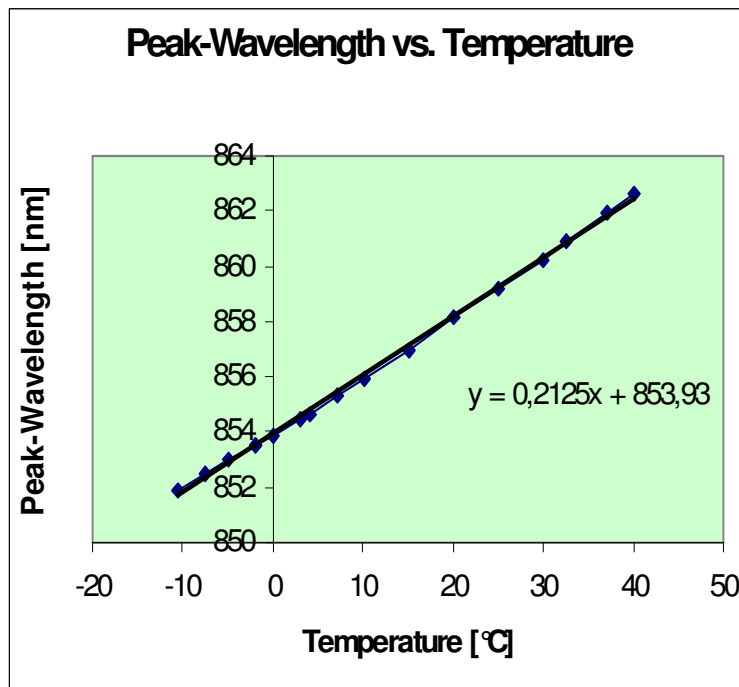


Abbildung 30: Temperaturkoeffizient der Wellenlänge

Unter „frei“ wird eine LED verstanden, die in freier Luft/ Umgebung platziert ist, während das Gehäuse der „eingepackten“ LED von der Umgebung thermisch abgeschirmt wird. Bei der thermisch abgeschirmten LED kann näherungsweise davon ausgegangen werden, dass der gesamte Wärmefluss durch die Pins der LED geleitet wird. Der thermische Widerstand zwischen LED-Chip ( $T_j$ ) und Umgebung über das Gehäuse kann gegenüber dem Wärmewiderstand durch die Pins der LED als so groß angenommen werden, dass der Wärmefluss durch das Gehäuse zu vernachlässigen ist.



Thermischer Widerstand zwischen:	„eingepackte“ LED (kaum Wärmeleitung über Package an Umgebung)	„freie“ LED
<b>T<sub>j</sub> - T<sub>cathode</sub></b>	<b>88 K/W</b>	<b>77 K/W</b>
<b>T<sub>cathode</sub> - T<sub>amb</sub></b>	<b>92 K/W</b>	<b>103 K/W</b>
<b>T<sub>j</sub> – T<sub>amb</sub> für LED-PINs</b>	<b>179 K/W</b>	<b>179 K/W</b>
<b>T<sub>j</sub> – T<sub>surface</sub></b>	<b>~ sehr groß</b>	<b>533 K/W</b>
<b>T<sub>surface</sub> – T<sub>amb</sub></b>	<b>~ sehr groß</b>	<b>373 K/W</b>
<b>T<sub>j</sub>-T<sub>amb</sub> für LED-Surface</b>	<b>~ sehr groß</b>	<b>906 K/W</b>
<b>T<sub>j</sub>-T<sub>amb</sub> für Surface+Pin</b>	<b>~ 179 K/W</b>	<b>150 K/W</b>

Tabelle 15: Gegenüberstellung: Thermischer Widerstand für die „freie“ und „eingepackte“ LED

Für den aufgebauten IR-Sender mit 100 LEDs ist nicht der thermische Widerstand der freien LED relevant, sondern vielmehr der des Gesamtsystems, bestehend aus „eingepackten“ LEDs, Platine und Kühlkörper bzw. Gehäuse. Eine erste Abschätzung über den gesamten thermischen Widerstand von LED-Chip zur Umgebung lässt sich über die Maxima von Verlustleistung und Betriebstemperatur berechnen. Bei einer anzunehmenden Verlustleistung der LEDs von <25W und einer Umgebungstemperatur von <70°C, lässt sich der notwendige thermische Widerstand mit <1,2K/W abschätzen. Zum Vergleich: 100 freie LEDs haben schon einen Widerstand von 1,5K/W – 3K/W zur Umgebung. Die Abschätzung macht deutlich, dass bei einem Array von 100 LEDs ein hoher Anspruch an die Wärmeabfuhr des Senders gestellt wird.

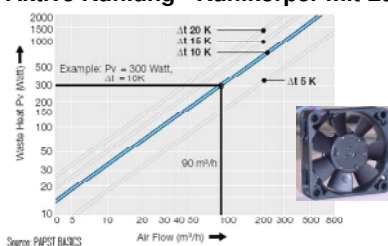
#### Passive Kühlung Kühlkörper:

Länge [mm]	Breite [mm]	Kühlrippenlänge [mm]	Thermischer Widerstand [K/W]
100	100	15	~2,8
100	100	25	~1,8
100	100	40	~1,4

gemessen:

 $R_{thSA,passiv} = 1,8 \text{ K/W}$ 

#### Aktive Kühlung - Kühlkörper mit Lüfter:



Luftstrom [m³/h]	Thermischer Widerstand [K/W]
10	0,3
20	0,15
30	0,10

gemessen:  $R_{thSA,aktiv} = 0,2 \text{ K/W}$ 

Tabelle 16: Thermische Widerstände für verschiedene Kühlkörper

Wie Tabelle 15 zeigt, wird der größte Teil der Wärme durch die Pins der LEDs abgeführt. Somit sollte sich an den Beinchen der LEDs eine große Wärmesenke, wie beispielsweise ein Kühlkörper, mit geringem thermischen Widerstand zur Umgebung anschließen. Der angegebene thermische Widerstand zwischen LED-Chip und Pin für 100 LEDs von ca. 1,5K/W (=150K/W/100) ist bereits größer als der zu erreichende Gesamtwärmeleiterstand von 1,2K/W. Dies zeigt, dass schon die Wärmeabfuhr aus der LED zum Kühlkörper ein großes Problem darstellt. Die Lösung des Problems lag in der Montage auf eine sehr gut wärmeleitende Kupferplatine. Die Beinchen der LEDs wurden extrem gekürzt. Das reduzierte nicht nur den Widerstand der Beinchen, sondern schuf eine zusätzliche Anbindung der LED-

Gehäuseunterseite auf die Platine und damit eine weitere Wärmeableitung, die den Wärmewiderstand weiter reduzierte.

Die Abschätzungen zeigen, dass die Anforderung an den Kühlkörper mit einem Wärmewiderstand von  $\ll 1,2 \text{ K/W}$  sehr hoch sind. In Tabelle 16 sind für verschiedene handelsübliche Kühlkörper und ein einfaches Gehäuse die Wärmewiderstände für eine passive Kühlung dargestellt. Ein normales Gehäuse, für das wir einen thermischen Widerstand von ca.  $10 \text{ K/W}$  ermittelten, kann unter gar keinen Umständen die Anforderungen erfüllen. Dies zeigt die Notwendigkeit eines guten und optimierten Kühlkörpers. Um aber mit einem Kühlkörper die Verlustleistung passiv abführen zu können, würde eine sehr große Fläche benötigt. Da der Bauraum aber kostbar ist, musste eine aktive Kühlung eingesetzt werden.

### Messung der Chip-Temperaturen über die Diodenspannung:

Um die Chip-Temperatur auch zeitabhängig zu ermitteln, wurde die Temperaturabhängigkeit des PN-Übergangs der Diode ausgenutzt. Hierzu muss über die Diode ein definierter Strom fließen, dann ist die gemessene Spannung über der Diode temperaturabhängig. Bei Vorabversuchen wurde festgestellt, dass nicht nur dieses Verfahren eine Temperaturabhängigkeit liefert. Man kann die Diode auch an der Anode auf ein bestimmtes Potential legen und an der Kathode ein Oszilloskop ( $R_i \sim 1 \text{ M Ohm}$ ) gegen Masse anschließen. Auch mit dieser Anordnung bekommt man eine temperaturabhängige Spannung geliefert. Diese Messmethode wurde dann auch herangezogen, um die Temperaturmessung durchzuführen. Das Messverfahren hat den Vorteil, dass auch Messungen im laufenden Betrieb durchgeführt werden können. Da der Sender rechteckig moduliert wird, gibt es hier immer Zeitpunkte, zu denen die Dioden ausgeschaltet sind und die Temperatur gemessen werden kann.

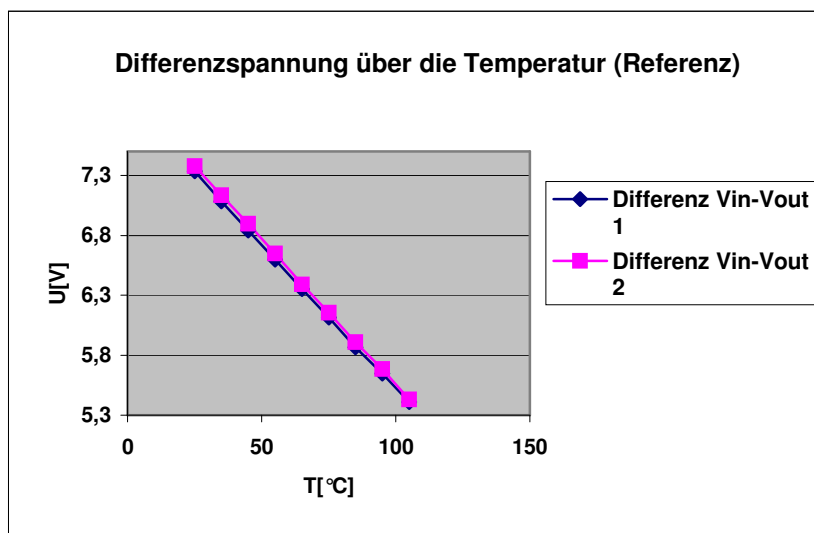


Abbildung 31: Temperaturkoeffizient der Diodenspannung

Die Abbildung zeigt das Ergebnis der Eichmessungen, die Abhängigkeit der Diodenspannung von der Chiptemperatur. Problematisch bei dieser Meßmethode ist der zeitliche Versatz zwischen Belastung und Messung.

Berechnung der Widerstände:

$$R_{th_{LED-PCB}} = \frac{T_{LED} - T_{PCB}}{I_{LED} * U_{LED}}$$

$$R_{th_{PCB-CASE}} = \frac{T_{PCB} - T_{CASE}}{I_{LED} * U_{LED}}$$

$$R_{th_{CASE-AMB}} = \frac{T_{CASE} - T_{AMB}}{I_{ges} * U_{BAT}}$$

Zur Einstellung einer präzisen Umgebungstemperatur wurden alle Messungen in einem Klimaschrank durchgeführt. Um mit der erwähnten Messmethode eine genaue Temperatur zu erhalten, wurde mit Eichmessungen begonnen. Hierzu wurde der Sender mit Strom versorgt, aber nicht moduliert, d.h. das Modulationssignal wurde nicht angeschlossen. Die Dioden leuchten also zu keinem Zeitpunkt und sollten folglich die gleiche Temperatur wie die Umgebung aufweisen. Anschließend wurde die Temperatur innerhalb des Senders bei konstanter Umgebungstemperatur (25°C) mit verschiedenen Modulationen vermessen. Um das aufgestellte Modell auch beschreiben zu können, wurde nicht nur die Chip-Temperatur gemessen sondern

auch noch die LED-Boardtemperatur, die Gehäusetemperatur, der Strom in das LED-Board, der Gesamtstrom in den Sender sowie die Spannungen an den Komponenten.

Der Arbeitspunkt der LEDs wurde über die Ansteuerspannung von 2,1V so gewählt, dass im Pulsmaximum eine optische Ausgangsleistung von 20 W bei einem Strom von ca. 600 mA durch die LEDs floss. Das Ziel war, möglichst viel optische Leistung zu erhalten ohne die LEDs zu zerstören, d.h. bei einer vertretbaren Verlustleistung. Bei diesem Arbeitspunkt nimmt der Sender eine mittlere elektrische Leistung von ca. 25W auf. 3W werden als optische Leistung bei einem Tastverhältnis von 16% abgestrahlt. Der komplette Sender muss demnach ca. 22W an Wärme abführen.

Zusammengefasst erhielten wir das in Tabelle 17 folgende Endresultat für den kompletten Sender bei den oben genannten Betriebsbedingungen. Der größte Fortschritt wurde in der effizienten Anbindung der LEDs an die Platine gemacht, der sich in einem Widerstand  $R_{th_{LED-PCB}}$  von nur noch 0,65K/W widerspiegelt. Zusammen mit den übrigen Widerständen ließ sich insgesamt noch ein Wärmewiderstand für den Sender mit aktiver Kühlung von 1,25 K/W erzielen, was anfangs gefordert wurde.

Parameter	Wert [K/W]	Bemerkung
$R_{th_{LED-PCB}}$	~0,65	
$R_{th_{PCB-CASE}}$	~0,4	Sil-Pad 950 und Wärmeleitpaste
$R_{th_{CASE-AMB}}$	~0,2	aktiv
$R_{th_{CASE-AMB}}$	~1,8	passiv
$R_{th_{ges}}$	~2,85	passiv
$R_{th_{ges}}$	~1,25	aktiv

Tabelle 17: Thermische Charakterisierung des Senders

Berechnung der maximalen Leistungsaufnahme

**Unter der Annahme dass die ermittelten Widerstandswerte konstant bleiben, gilt für die maximale Leistungsaufnahme folgende Formel:**

mit 
$$P_{MAX} = \frac{T_{LEDMAX} - T_{CASE}}{Rth_{DIE\_PCB} + Rth_{PCB\_CASE}}$$

$$T_{CASE} = P_{DRIVER} \cdot Rth_{CASE\_AMB} + P_{MAX} \cdot Rth_{CASE\_AMB} + T_{AMBIENT}$$

ergibt

$$P_{MAX} = \frac{T_{LEDMAX} - P_{DRIVER} \cdot Rth_{CASE\_AMB} - T_{AMBIENT}}{Rth_{DIE\_PCB} + Rth_{PCB\_CASE} + Rth_{CASE\_AMB}}$$

$Rth_{DIE\_PCB}$	→ Bekannte Größe durch Vormessungen
$Rth_{PCB\_CASE}$	→ Bekannte Größe durch Vormessungen
$Rth_{CASE\_AMB}$	→ Bekannte Größe durch Vormessungen
$T_{LEDMAX}$	→ Durch Datenblatt gegeben hier 100°C
$T_{CASE}$	→ Gehäusetemperatur ( Hilfsgröße)
$T_{AMBIENT}$	→ Umgebungstemperatur
$P_{MAX}$	→ Maximal zulässige mittlere Verlustleistung der LED's
$P_{DRIVER}$	→ Verlustleistung des Driverboards

Die Ermittlung der Verlustleistung der Treiberschaltung P ergab nach einigen Optimierungsschritten eine Leistung von **4,9W**.

Laut Herstellerangaben darf die LED-Temperatur 100° nicht übersteigen. Setzt man eine maximale Umgebungstemperatur von ca. 70°C voraus, so erhält man aus obiger Rechnung bei passiver Kühlung eine maximale Verlustleistung von 7W und bei aktiver Kühlung immerhin 23W, die abgeführt werden könnte.

Das Ergebnis der thermischen Charakterisierung des kompletten Senders wird in der folgenden Abbildung dargestellt. Sie zeigt, wie viel Verlustleistung von den LEDs im Mittel bei einer gegebenen Umgebungstemperatur vom Sender abgeführt werden kann, zusätzlich zur Verlustleistung des Treibers:

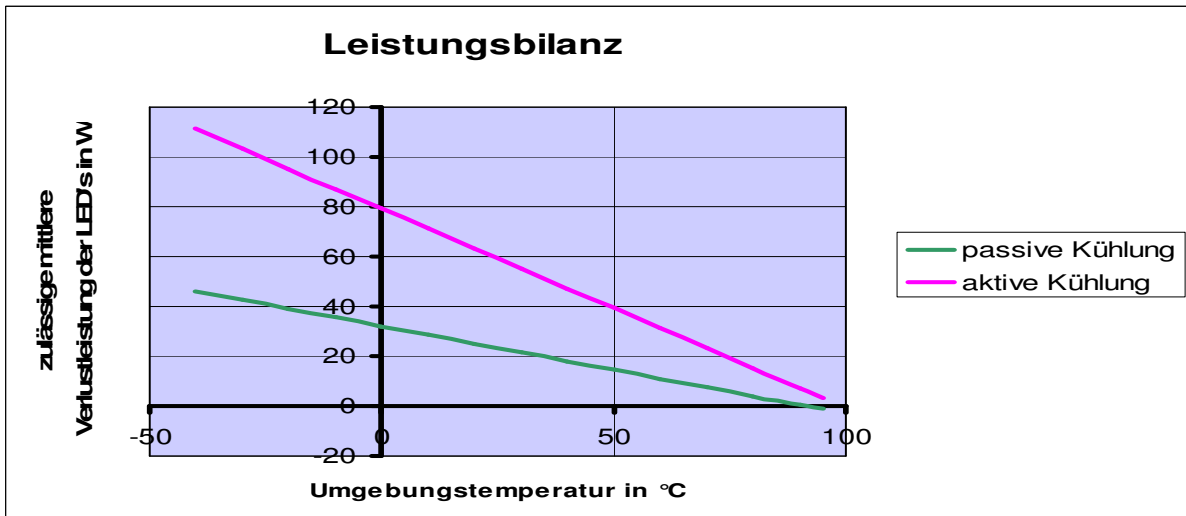


Abbildung 32: Verlustleistung, die von den LEDs abgeführt werden kann

Aus der zulässigen Verlustleistung lässt sich die Integrationszeit ermitteln, mit der der Sender noch betrieben werden darf bei der eingestellten optischen Pulsleistung von 20W. Daraus lässt sich erkennen, dass bei höheren Temperaturen, z.B. bei den spezifizierten 70°C die Verlustleistung die Grenze für den Betrieb darstellt, während bei niedrigen Temperaturen die Augensicherheit den Betrieb limitiert.

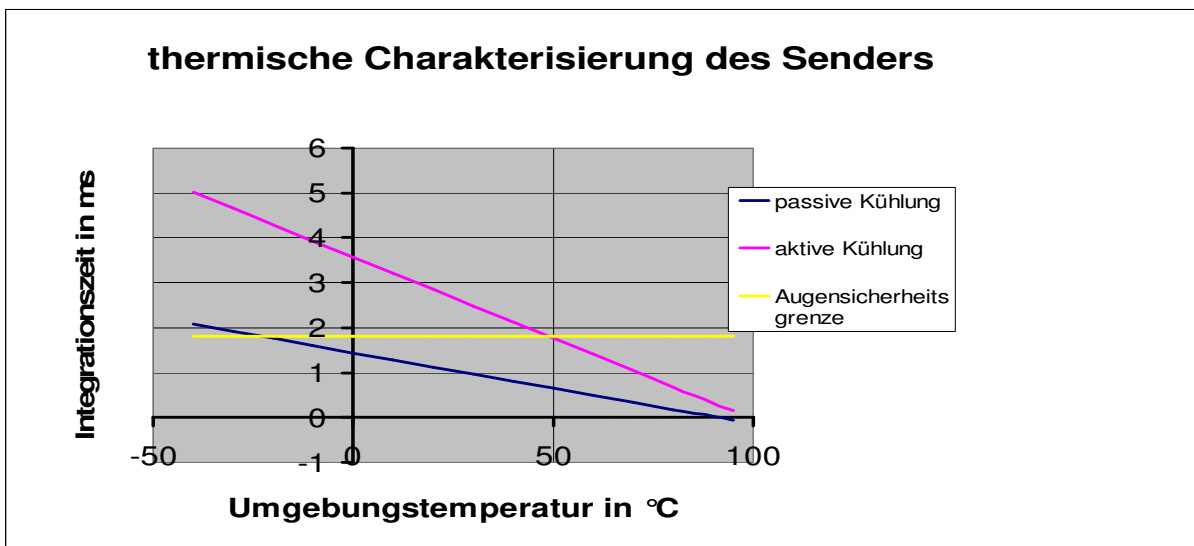
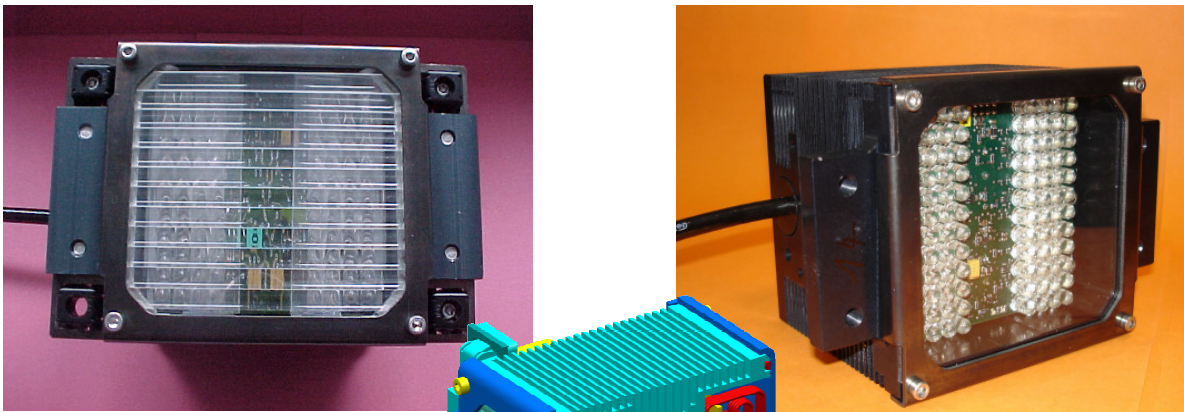


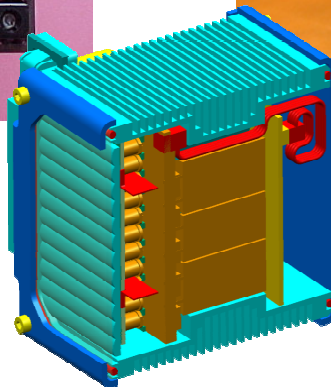
Abbildung 33: erlaubte Integrationszeiten

Der Aufbau des Senders mit und ohne Zusatzoptik ist in der folgenden Abbildung gezeigt.

**Abbildung 34: Sender mit Zusatzoptik und ohne Zusatzoptik**



**Abbildung 35: Querschnitt des Senders**



**Abmessungen:**  
 Höhe = 91mm  
 Breite = 135mm  
 Tiefe = 95mm

Nach Abschluss der Charakterisierung des Senders erhielten wir folgende Daten:

**Tabelle 18: Technische Daten des Senders**

Parameter	Wert	Einheit	Bemerkung
Sendeelement	96	LEDs	Vishay TSFF 5200
Abstrahlcharakteristik (hor.)	20	°	ohne Zusatzoptik (Vollwinkel, Halbwertsbr.)
Abstrahlcharakteristik (hor.)	45 x 20	°	mit Zusatzoptik (Vollwinkel, Halbwertsbr.)
Wellenlänge	870	nm	spektrale Bandbreite 40nm
opt. Anstiegs- /Abfallzeit	10	ns	
opt. Pulsleistung	20	W	U_LED=16.5V
thermischer Widerstand	1.3/ 2.9	K/W	aktive Kühlung/ passive Kühlung
max. LED Verlustleistung	23/ 7	W	aktive/ passive Kühlung, Ta=70°C
max. Tastverhältnis	16/ 5	%	aktive/passive Kühlung, Ta =70°C,
max. Integrationszeit	1/ 0.3	ms	aktive/ passive Kühlung
mittlere opt. Leistung	3/ 1	W	aktive/ passive Kühlung, Ta =70°C
max. Junction Temperatur	100	°C	LED
Betriebstemperatur	-40...70	°C	
Laser Klasse	1		nach IEC 60825-1:1993 + A2:2001

## 2.1.2 Teilprojekt 5: Fahrzeugintegration der 3D-Sensorik

Ziel der Arbeiten war, die Funktionen des Systems in einer realen Umgebung zu evaluieren und abschließend zu demonstrieren. In einem ersten Schritt wurde in enger Zusammenarbeit mit DaimlerChrysler und der FH Trier ein Anforderungskatalog zusammengetragen, mit dessen Hilfe ein geeignetes Fahrzeug ausgewählt werden konnte:

**Tabelle 19: Anforderungskatalog zur Fahrzeugauswahl**

Anforderungen	Bemerkung
Mercedes Benz	- Zugriff auf benötigte Daten zur Parametrisierung des Motors, Triebstranges und Gesamtfahrzeuges (D.C.) - mit der C-Klasse wurden gute Erfahrungen im S&G Betrieb gemacht (A.D.C.)
Typisches Mittelklasse Fahrzeug	wie z.B. C-Klasse
Benzinmotor	höheres Einsparpotential im Verbrauch als beim Dieselmotor
6-Zylinder Motor	- S&G Betrieb benötigt höheres Drehmoment im niedrigen Geschwindigkeitsbereich für ein komfortableres Verhalten - lauffruhiger als 4-Zylinder Motor
Automatik-Getriebe	notwendig für S&G Betrieb
ACC taugliches Fahrzeug (Zugriff auf das Zündschlossmodul über D.C., Conti)	Aktivierung der ACC Option für S&G Betrieb notwendig
Zugriff auf ESP/ Bremssteuergerät (D.C., Conti)	Umsetzen der max. Bremsbeschleunigung von $-2\text{m/s}^2$ auf $-4\text{m/s}^2$
nicht-infrarotabsorbierende Frontscheibe	Maximierung der optischen Strahlungsenergie am PMD
herkömmlicher Brems-Booster	nach bisherigem Kenntnisstand der A.D.C. reicht der Brems-Booster für den S&G Betrieb aus, es ist keine EHB o.ä. notwendig
Zugriff auf Bremse (D.C., Conti)	evtl. ist eine leichte Software-Anpassung notwendig, im schlimmsten Fall besteht Möglichkeit des Austauschs der Bremse
S&G taugliches HMI	Nachrüstmöglichkeit des ACC-tauglichen Combi-Instruments, evtl. Darstellung eines Querschnitts des E-Bildes auf Comand-Display

Es wurde ein Mercedes Benz der C-Klasse ausgewählt, da er schon viele wesentliche Komponenten aufweist, die für eine Längsregelung notwendig sind. Er besitzt eine Bus-Struktur, Bremsaktuatoren sowie diverse Steuergeräte, die von uns genutzt werden konnten. Die A.D.C. kann auf eine langjährige Erfahrung im Aufbau ähnlicher Testfahrzeuge von Mercedes aufbauen. Und nicht zuletzt traf es auch politisch das Marktsegment, das wir mit unserem System gerne bedienen würden. Wir beschafften folgendes Fahrzeug:

**Tabelle 20: Eigenschaften des Versuchsfahrzeugs**

Versuchsträger
Mercedes Benz C-Klasse, Limousine, C240, Baureihe 203
6-Zylinder-Benzinmotor
5-Gang-Automatik-Getriebe
Bedien- und Anzeigesystem COMAND APS (HMI, Einspeisung Video Signal)

### 2.1.2.1 AP 5.1 Aufbau des Versuchsfahrzeugs

Um das Fahrzeug als Versuchsträger tauglich zu machen, mussten eine Reihe von Umbauarbeiten durchgeführt werden:

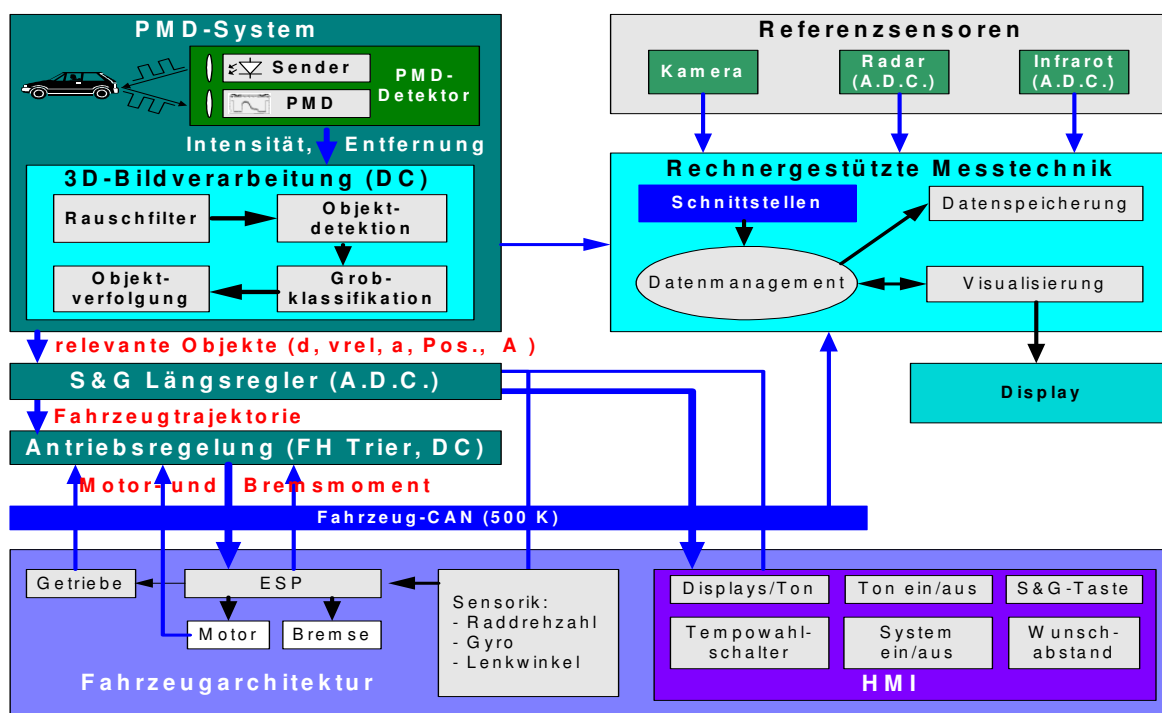
**Tabelle 21: Umbauarbeiten am Versuchsträger**

Austausch der Frontscheibe durch nicht infrarotabsorbierende Glasscheibe (MB Werkstatt)
Verkabelung des Fahrzeugs für alle geplanten Komponenten
Austausch/ Umprogrammierung des Zentralen Zündschlossmoduls (ACC Option aktivieren)
Austausch/ Umprogrammierung des ESP/ Bremssteuergerätes (Umsetzen der max. zulässigen Bremsbeschleunigung von $-2\text{m/s}^2$ auf $-4\text{m/s}^2$ )
Einbau eines ACC tauglichen Combi Instruments (HMI)
Einbau PMD-Kamera (A.D.C.) und vier IR-Sender (A.D.C.), 3D-Bildverarbeitungsrechner (D.C.), S&G-Längsregler-Box (A.D.C.), Antriebsregelungs-Box (D.C./ FH Trier)
Einbau der Messtechnik (A.D.C.)
Einbau Referenz-Sensorik: Radar-ACC-Sensor (A.D.C.), Infrarot-ACC-Sensor (A.D.C.) und 2D-Kamera (A.D.C.)

Abgeleitet aus den Systemanforderungen wurde ein Konzept für die Integration der Komponenten in das Fahrzeug erstellt. Die Einbauträume wurden so definiert, dass sich ein optimaler Messbereich ergab. Die Rechnerplattformen für die Softwaremodule wurden modular aufgebaut, um die Austauschbarkeit der Teilfunktionalitäten und damit eine gewisse Redundanz zu gewährleisten. Weiter sollte die Modularisierung die Integration der Softwarepakete und ihre unabhängige Realisierung durch die unterschiedlichen Projektpartner vereinfachen, aufbauend auf bereits existierenden Lösungen. Die Schnittstellen wurden zwischen der A.D.C., der FH Trier, Temic, und DaimlerChrysler abgestimmt. Neben den PMD-gestützten Steuerungskomponenten wurden Referenzsensoren ins Fahrzeug integriert. Diese dienen dazu, das PMD-System zu vermessen und im Betrieb zu überwachen ohne in den eigentlichen Regelungsprozess einzugreifen. Die Radar- und Lidar-Sensorik vermisst die Objekte, während die 2D-Kamera gleichzeitig die Szenen für eine nachfolgende Bearbeitung und Interpretation aufzeichnet. Zur Aufzeichnung sämtlicher Daten wurde die Messtechnik, d.h. ein spezieller Rechner in das Fahrzeug integriert.

Von speziellem Interesse für die Systemauslegung war die Gestaltung und Konzeption des HMIs. Die Interaktion des Fahrers mit dem System ist von erheblicher Bedeutung für die Vermarktung. Der Wunsch und die Herausforderung ist, das System gleichzeitig möglichst komfortabel zu gestalten, es aber auch sicher zu machen und den Fahrer in den Betrieb aktiv miteinzubinden. Diese Einbindung des Fahrers dient dazu, sicherheitskritische Funktionen, die bisher von der Sensorik noch nicht abgedeckt werden können, durch den Fahrer abzusichern, zu verhindern, dass die Aufmerksamkeit nachlässt und ihn damit auch in der Verantwortung zu halten.



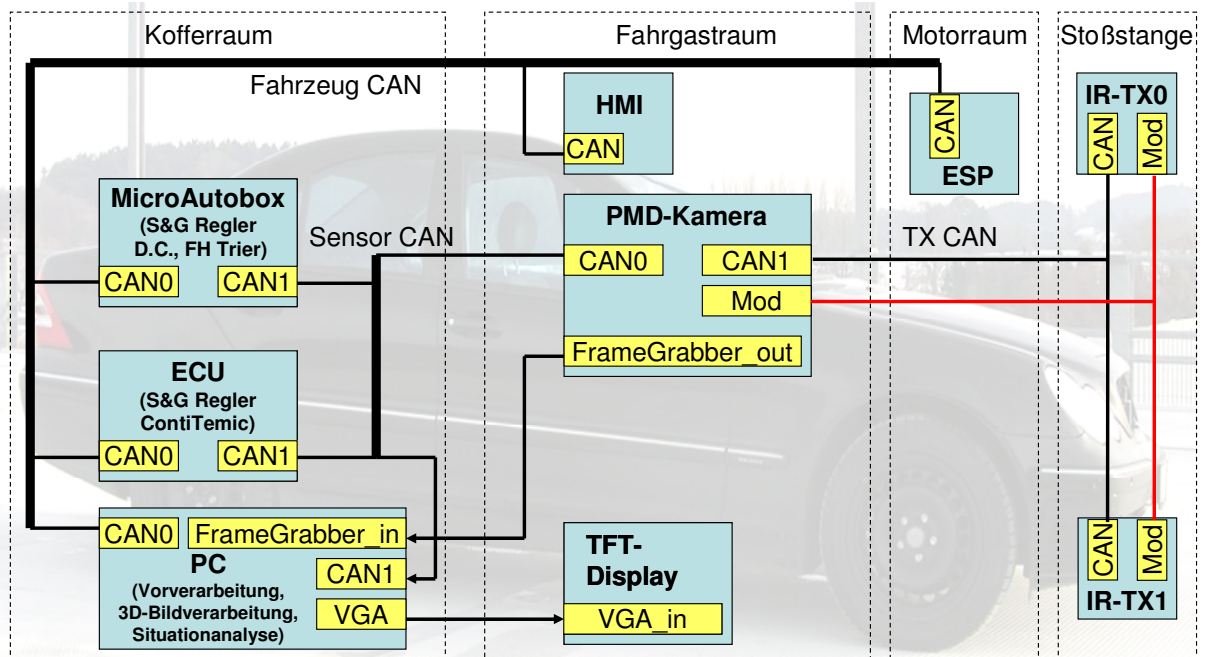


**Abbildung 36: Konzeption des Aufbaus des Versuchsträgers mit den Hauptkomponenten PMD-Sensorsystem, Referenzmesstechnik und Fahrzeug**

Obige Abbildung gibt einen Überblick über alle beteiligten Komponenten und ihre strukturelle Anordnung innerhalb des PMD-Systems, der Messtechnik und dem Versuchsfahrzeug.

Die Abbildung zeigt die Vernetzung der Module, HW und SW-Module und den Datenfluss, insbesondere die Daten, die zwischen den Modulen ausgetauscht werden. Das Format dieser Daten wurde in Abstimmung mit den Projektpartnern festgelegt.

Die Komponenten Spezifikation hat ergeben, dass eine C-Klasse von Mercedes als Versuchsträger alle notwendigen Kriterien erfüllt. Die für den Stop&Go-Betrieb als sehr kritisch beurteilten Bremsanforderungen konnten von dem serienmäßig eingebauten Booster erfüllt werden. Probleme, die sich während der Systemtests ergaben, traten laut Nachforschungen nur in der ersten Generation der Brems-Booster auf und konnten durch eine Neuprogrammierung der Bremssteuergeräte ausgeräumt werden.



**Abbildung 37: Fahrzeugaufbau und Anordnung der Komponenten**

Obige Abbildung zeigt schematisch die Anordnung der Komponenten im Fahrzeug und die Struktur für den Datentransfer. Während alle regelungsrelevanten Daten den CAN-Bus nutzen, werden die hohen Datenraten der Rohbilder über eine parallele Framegrabber-Schnittstelle übertragen. Die Triggersignale für die Modulation der Sender werden über eine LVDS-Verbindung geleitet.

Die PMD-Kamera wird im Dachknoten verbaut und die Sender im Bereich der Nebelscheinwerfer. Die PMD-Kamera befindet sich damit noch im Wischerbereich um eine hohe Systemverfügbarkeit zu gewährleisten. Der Einbauraum für die Sender eignet sich aus technischen und aus Designgründen. Optisches Übersprechen und die Reflektionsverluste an der Windschutzscheibe wurden verhindert.

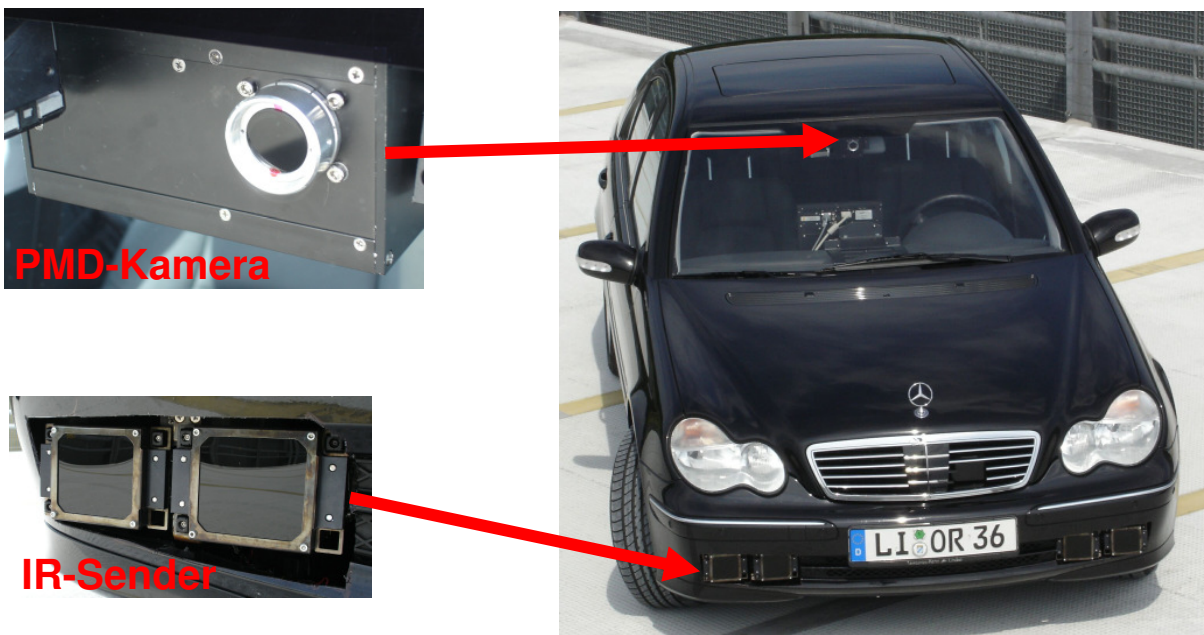


Abbildung 38: Integration des PMD-Systems ins Fahrzeug

Die wesentlichen Rechnerplattformen wurden im Kofferraum verbaut, das Steuergerät für den Stop&Go Regler, die MicroAutoBox für die fahrzeugnahe Regelung und Steuerung, der Messtechnikrechner sowie diverse Stromversorgungen und Schnittstellen.



Abbildung 39: Rechnerplattformen im Kofferraum zur Fahrzeugsteuerung

HMI:Tacho mit Display

HMI: Systemaktivierung  
GeschwindigkeitswahlTFT-Display:  
Darstellung  
der Sensor  
InformationenHMI: Abstandswahl,  
Warnton: an/ ausHMI:  
Stop&(Go)-Taste

Abbildung 40: Komponenten des HMI

Zu den Komponenten zählt das Display[Schä04], das den Arbeitsmodus des Systems anzeigt, d.h. ob es aktiviert ist, bereits einem vorausfahrenden Fahrzeug folgt und welcher Geschwindigkeitswunsch eingestellt ist. Dazu befinden sich ein Rädchen zur Einstellung des Wunschabstandes im Fahrgastraum, ein Hebel am Lenkrad zur Einstellung der Wunschgeschwindigkeit und ein Knopf zur Initiierung des Anhaltens hinter einem stehenden Fahrzeug bzw. dem automatischen Wiederanfahren. Das lichtstarke TFT-Display dient lediglich in der Entwicklungsphase und in der Demonstration der Darstellung des Systemzustandes.

Von größter Bedeutung für die Nutzbarkeit des Systems und damit auch für die Fahrerakzeptanz ist die leichte Erreichbarkeit der Aktivierungselemente, insbesondere des S&G-Knopfes, der aus diesem Grund am Lenkrad untergebracht ist, wo er blind zu erreichen ist. Viele S&G-Situationen lassen nicht die Zeit erst nach einem Hebel zu suchen. Das Bedienelement, vorzugsweise ein Knopf, muss instinktiv und unmittelbar erreichbar sein, ähnlich wie die Bremse.

Zur Überwachung und Verifizierung des PMD-Systems wurden Referenzsensoren im Fahrzeug verbaut. Ein Radar- und ein Lidar-Sensor am Kühlergrill und eine Grauwertkamera im Dachknoten. Damit konnte näherungsweise dasselbe Beobachtungsfeld realisiert werden wie mit der PMD-Kamera.

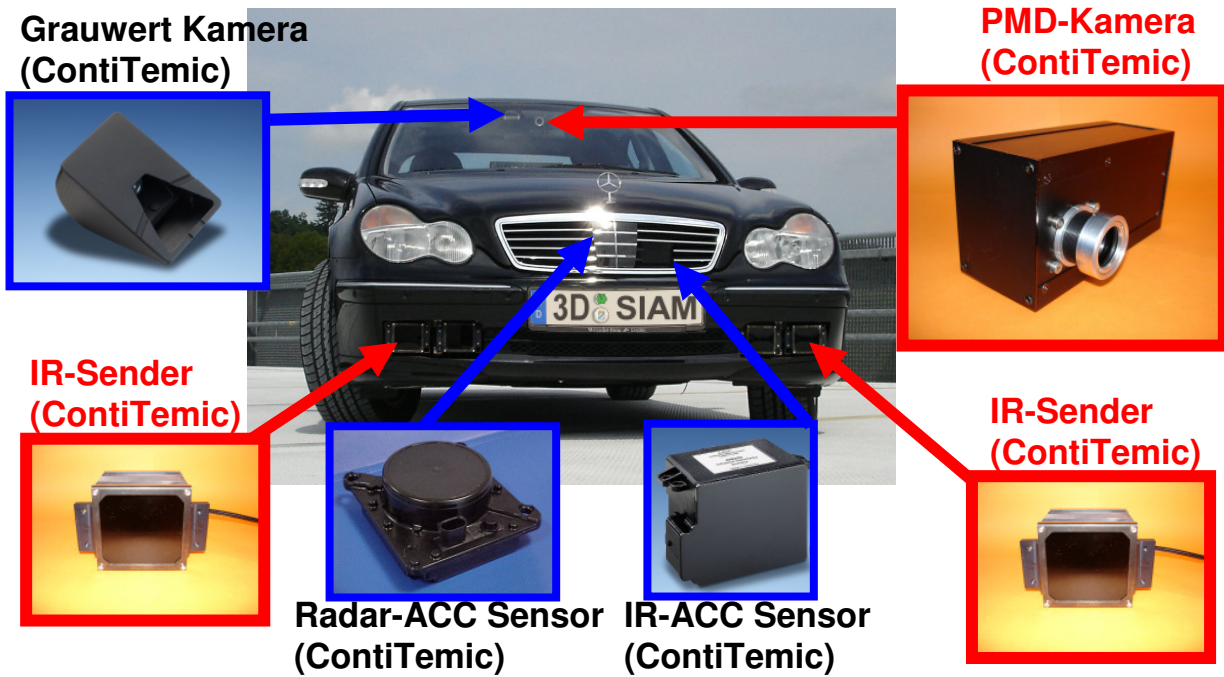


Abbildung 41: Sensorsystem im Fahrzeug, Steuersensorik (PMD)(rot) u. Referenzsensorik(blau)



### 2.1.2.2 AP 5.2 Szenen-Quelldaten

Die Aufnahme und Archivierung von Szenenquelldaten diente dazu, reproduzierbar zu entwickeln, das Verhalten der Software zu verifizieren, bzw. die Software durch reproduzierbare Tests parametrieren zu können. Abschließend konnte die Funktion des Systems auch auf Basis der Quelldaten im Labor demonstriert werden. Die Aufnahme der Quelldaten ist in folgender Abbildung skizziert:

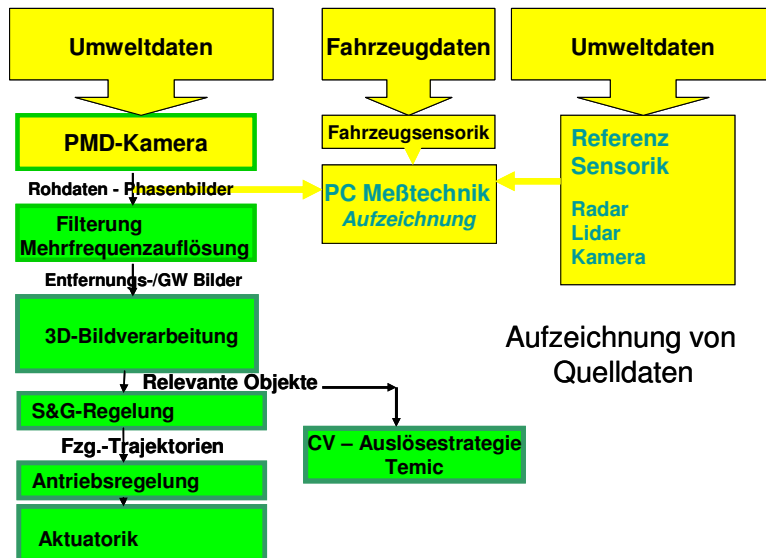


Abbildung 42: Aufnahme von Quelldaten

Zur Entwicklung der Software wurde das System so ausgelegt, dass die aufgenommenen Rohdaten, zusammen mit den Daten der Referenzsensoren, wieder in das System zurückgespielt werden konnten, um anstelle der Realdaten das weitere System zu passieren. Abgespeichert wurden sämtliche erfasste Daten, die PMD-Rohdaten, die Daten der Referenzsensoren und die Fahrzeugdaten.

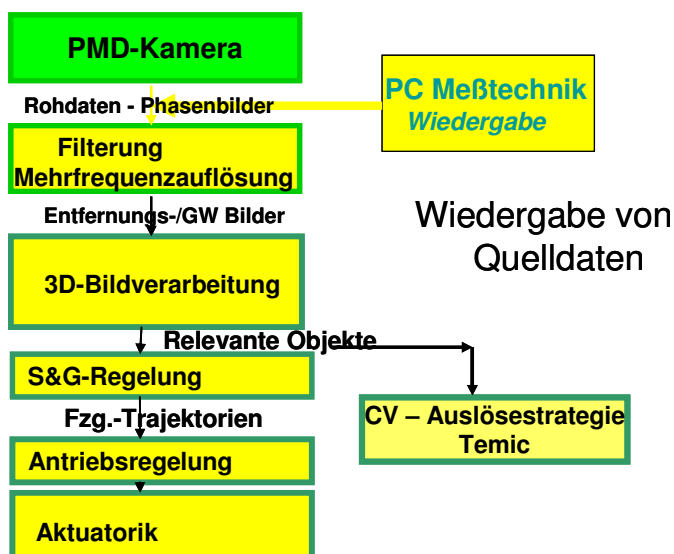
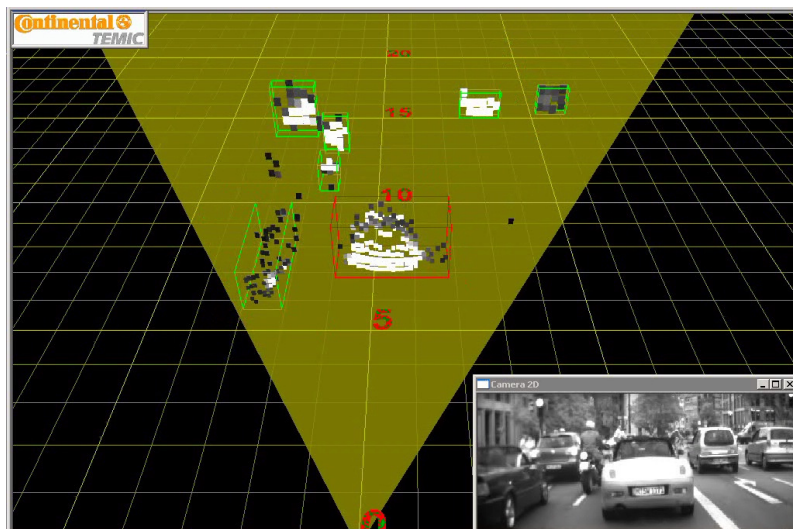


Abbildung 43: Wiedereinspeisung von Quelldaten

Mit der Wiedereinspeisung der Rohdaten in das System konnte das Verhalten des Systems im Labor simuliert werden. Dadurch war es möglich, die anschließenden Softwarepakete bis zur Ansteuerung der Aktuatorik zu entwickeln und zu parametrieren.

Aufgenommen wurden in zahlreichen Versuchsfahrten möglichst unterschiedliche Szenen, Fahrbahnen, Verkehrsteilnehmer, Objekte, Wetterbedingungen und Situationen. Von besonderem Interesse waren Fahrzeuge, Radfahrer, Fußgänger, enge Kurven, der Anhaltevorgang, der Bremsweg bei automatischen Bremsmanövern, das Wiederanfahren, die Identifikation möglicher Störeinflüsse, Reichweitenuntersuchungen, usw.. Im Folgenden werden exemplarisch einige aufgezeichnete Szenen wiedergegeben:

**Abbildung 44: komplexe Szene mit mehreren unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern: Alle Objekte können gut voneinander getrennt detektiert werden.**



**Abbildung 45: Allee, viele schlecht reflektierende Ziele: Alle Ziele im relevanten Bereich werden erkannt.**

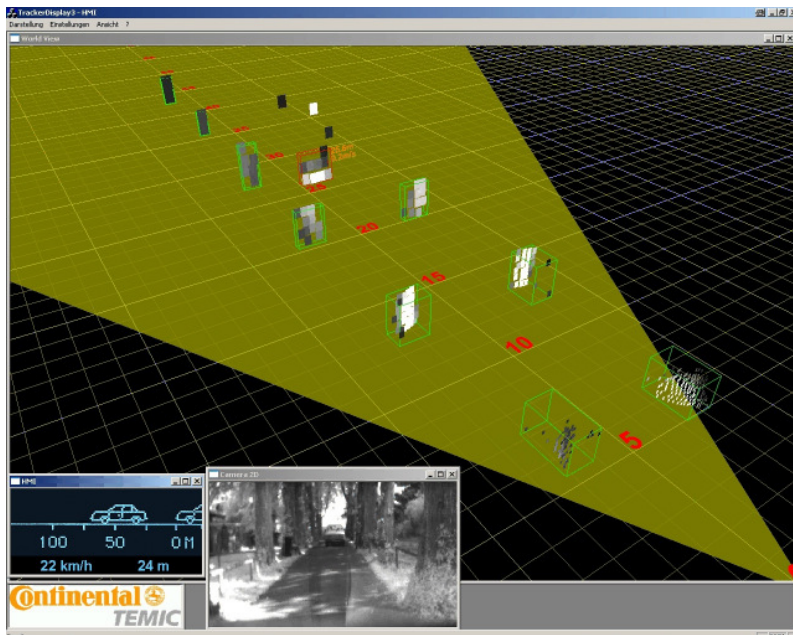


Abbildung 46: Fußgänger vor dem Fahrzeug auf einer leicht ansteigenden Straße: Sowohl die Fußgänger als auch die Straße werden verlässlich detektiert.

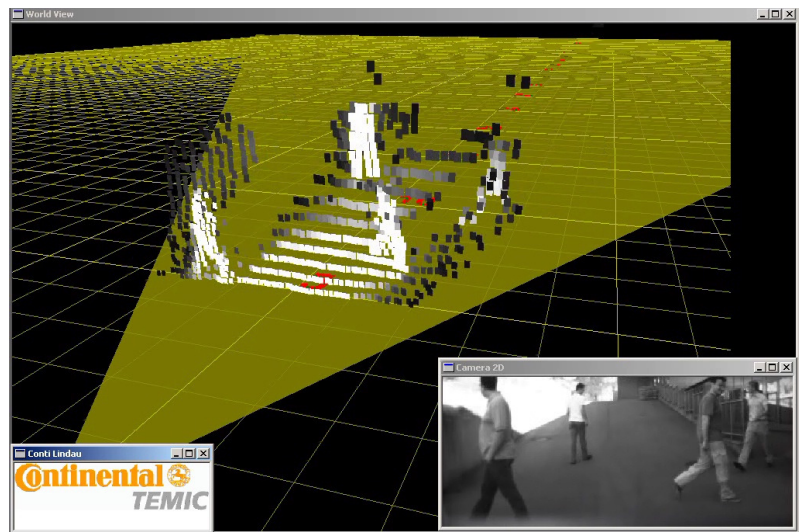


Abbildung 47: Motorradfahrer werden eindeutig erkannt. Nicht nur der Reflektor sondern der Fahrer und das Motorrad werden detektiert.

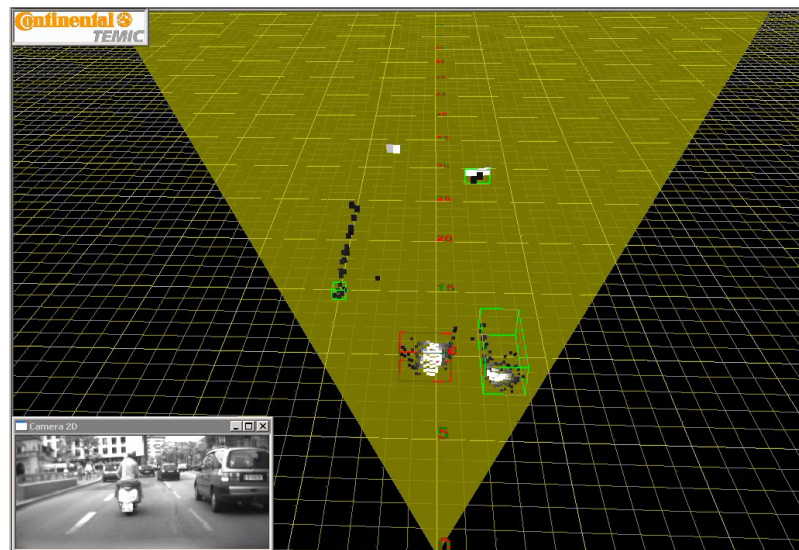


Abbildung 48: Die Funktion des Systems ist auch im Tunnel und beim Übergang ins Freie sichergestellt.

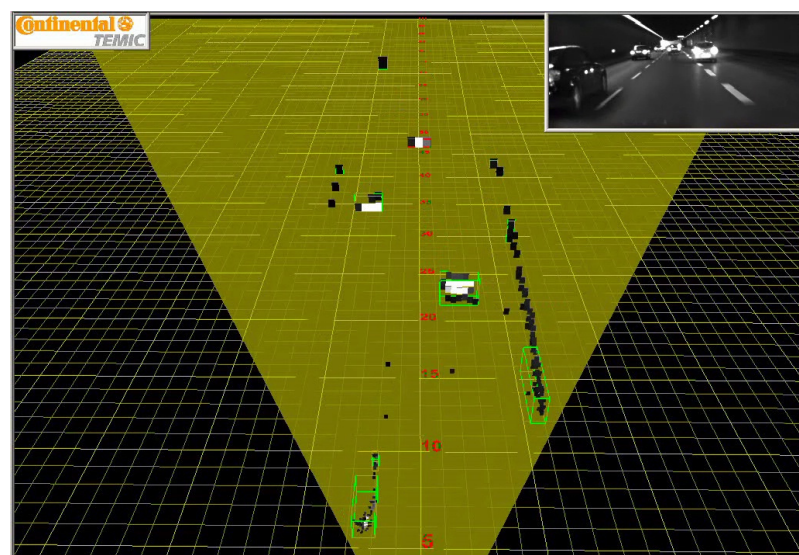




Abbildung 49: 2 Fahrradfahrer können mit guter Auflösung getrennt detektiert werden.

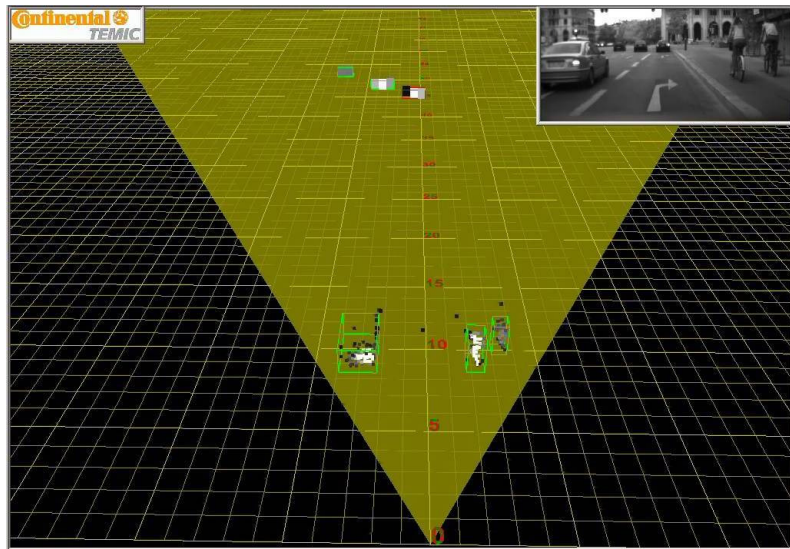


Abbildung 50: typische S&G-Folgesituation: Das System erfasst alle wichtigen Objekte mit guter Auflösung.



Abbildung 51: In komplexen Szenen wie z.B. Baustellen können auch kompliziertere, ausgedehnte Strukturen erfasst werden



### **2.1.2.3 AP 5.3 Software-Integration**

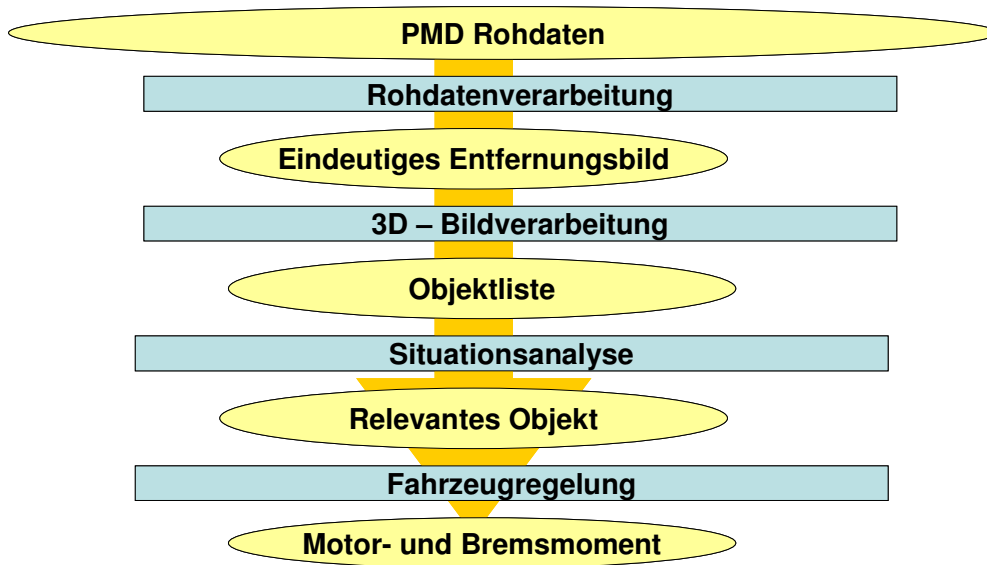
Vor der Integration der Softwarepakete musste eine Rahmensoftware entwickelt werden, die für die Kommunikation der Daten sorgte. Von der Software zur Fahrzeugregelung war ein spezielles Protokoll einzuhalten, um vom Fahrzeug akzeptiert zu werden. Die Pakete zur 3D-Bildverarbeitung, der Situationsanalyse und der Fahrzeugregelung wurden in Form von DLLs integriert. Der Rahmen wurde von A.D.C. zur Verfügung gestellt.

Die MicroAutoBox war in das System zu integrieren. Auf ihr sollte die Regelung der FH Trier und DaimlerChrysler ablaufen, mit der das Kraftstoffeinsparpotential geprüft wurde. Als problematisch erwies es sich, eine reibungslose Kommunikation der Daten zum Fahrzeug sicherzustellen. Parallel wurde der von der A.D.C. entwickelte Stop&Go-Regler, der auf Fahrkomfort optimiert wurde, in die ECU integriert, die normalerweise für die ACC-Funktion verwendet wird.

Das Paket 2.3 ist in erster Linie Voraussetzung für die Ermöglichung der weiteren APs. Das besondere Ergebnis des APs selbst kann in der Einschätzung über den Ressourcenbedarf der Software gesehen werden, um einen Realtime-Betrieb zu ermöglichen.

Die Abstimmung der 3D-Bildverarbeitung auf das Fahrzeug, d.h. die Eichung sollte automatisch erfolgen. Zu diesem Zweck wurde ein Softwaremodul entwickelt, das bei Annäherung an eine Wand automatisch die Parametrierung, z.B. die Offsetkorrektur oder eine Korrektur der systematischen Fehler, übernimmt.

Einen Überblick über die zu integrierenden Softwarepakete und den Datenfluss innerhalb des Systems liefert folgende Skizze. Bei den zu integrierenden SW-Paketen handelt es sich um die Rohdatenverarbeitung, die 3D-Bildverarbeitung, die Situationsanalyse und die Fahrzeugregelung. Die PMD-Kamera liefert für mehrere Frequenzen jeweils einen Satz von Phasenbildern. Diese sind in geeigneter Weise zu einem Entfernungsbild[Joe99] zusammensetzen, zu korrigieren und zu filtern (Details folgen in nächster Skizze). Aus den 3D-Entfernungsbildern ist es Aufgabe der Bildverarbeitung, Objekte zu isolieren, diese zu verfolgen (tracken) und ihre Eigenschaften (Ort, Geschwindigkeit, Verlässlichkeit) zu berechnen und zu kommunizieren. Aus diesen Daten selektiert anschließend die Situationsanalyse, welche Objekte für das Fahrzeug kritisch sind, und welchem entsprechend im S&G-Modus zu folgen ist, das sogenannte relevante Target. In Kenntnis der Daten des relevanten Targets und der eigenen Fahrzeugdaten (Geschwindigkeit) berechnet die Fahrzeugregelung schließlich das optimierte Beschleunigungsverhalten, um dem relevanten Target in idealer Weise, möglichst unter Einhaltung des Sicherheitsabstandes zu folgen. (s.u.)



**Abbildung 52: Datenverarbeitung im Fahrzeug**

Von der A.D.C. selbst entwickelt wurde die Rohdatenverarbeitung (s. Systemtechnik AP 1.4), die Situationsanalyse (s. AP 1.6 Systemintegration S&G) und ein Teil der S&G-Regelung (s. Systemtechnik).

#### **2.1.2.4 AP 5.5 Erprobung Stop&Go**

Nach einer ersten vollständigen Integration des Gesamtsystems wurde das Fahrzeug in allen relevanten Verkehrsszenarien bewegt. Dies diente in erster Linie dazu, die Software so zu parametrieren, dass die Funktion sichergestellt werden konnte. Dabei wurde das HMI durchweg von allen Fahrern angenommen. Das System erwies sich gegenüber Störungen als sehr robust. Ähnliche Systeme, die parallel betrieben wurden, führten nicht zu Fehlmessungen. Die extremsten Störlichtverhältnisse, starker Sonnenlichteinfall auf schneebedeckte, intensiv reflektierende Oberfläche, führen nicht zu einem Systemausfall. Auch bei direkt einfallendem Sonnenlicht fallen durch die abbildende Optik lediglich diejenigen Pixel aus, auf die das Sonnenlicht abgebildet wird. Da die übrigen Pixel, auf die die Umgebung abgebildet wird, nicht davon betroffen sind, arbeitet das System weiterhin. Zu keinem Systemausfall, wenn auch zu ernstesten Einschränkungen, führen extreme Wettersituationen. Bei nasser Fahrbahn aufgewirbelte Gischt sowie Nebel führen zu einer Einschränkung der Reichweite. Positiv ist, dass keine Fehlziele generiert wurden. Regen und Schnee zeigen einen nur geringen Einfluss auf die Reichweite. Die Erprobung bestätigte die Nutzung der Funktion unter den nachfolgend definierten Betriebsbedingungen:

Tabelle 22: typische Betriebsbedingungen S&amp;G:

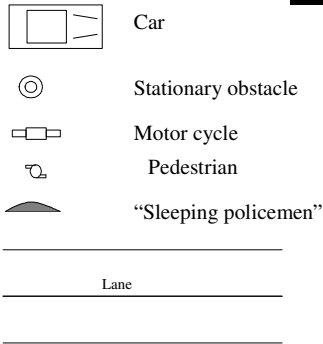
<b>Einsatzbereich:</b>	Autobahn, Landstraße und innerstädtischen Hauptverkehrswege
<b>Geschwindigkeitsbereich:</b>	0-30 km/h [0 - 210 km/h] Kombination mit ACC durch Sensorfusion möglich
<b>Sensor-Messbereich:</b>	[0 .. 40 m] (auf „worst case“ Target, R = 20%) - 45° x 16° (hor. x vert.)
<b>Maximale Beschleunigung:</b>	[-4.5 m/s <sup>2</sup> bis 2.5 m/s <sup>2</sup> ]
<b>Relevante Ziele:</b>	bewegte Objekte in Fahrtrichtung und in der eigenen Spur schon getrackte stehende Objekte stehende Objekte nach dem Aktivierungskommando („Resume“) stehende Objekte nach Aufforderung (Stop&Go – Knopf)
<b>Aktivierung:</b>	Standard Cruise Control (CC) Hebel:
<b>Deaktivierung:</b>	Bremspedal CC-Off Schalter Lenkradwinkel > 45° Eigengeschwindigkeit > 60 km/h (automatische Abschaltung über Lenkwinkel und Eigengeschwindigkeit zur Unterbindung des Systemmissbrauchs)
<b>„Go“ Freigabe:</b>	Stop&Go Knopf, CC-Hebel, oder Gaspedal nach dem „Go-Freigabe Ton“
<b>Geschwindigkeitwahl:</b>	Standard CC/ ACC - Hebel

Die Situationen, die untersucht und bewertet wurden, sind auf den folgenden Seiten abgebildet und bezüglich ihrer Relevanz eingestuft:

### Abbildung 53: Sammlung der typisch S&G-relevanten Verkehrssituationen

Erklärung der Bezeichnungen und Inhaltsangabe:

## Legend :



- A Standard operation scenarios**  
 A1.xx Basic operation scenarios  
 A2.xx Environmental scenarios  
 A3.xx Target behaviour  
 A4.xx Driver behaviour  
 A5.xx Target separation
- B False reaction scenarios**  
 BX.xx

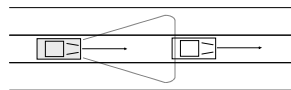
Ranking:	
<b>Frequency:</b>	<b>Importance:</b>
1 almost never	1 less important
2 seldom	3 not neglectable
3 usual driving condition	5 very important (ko criterium)



## A 1 Basic operation scenarios

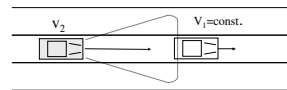
A1.01

Short description:	
Low speed following	
$(V_{max} = thd)$	
Expected system behaviour:	
System follows in safety distance	
Frequency:	Importance:
3	5



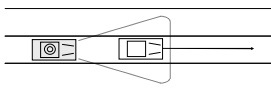
A1.02

Short description:	
Typical approach situation	
$V_1 << V_2$	
Expected system behaviour:	
System decelerates behind the vehicle	
Frequency:	Importance:
3	5



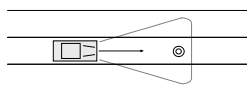
A1.03

Short description:	
Typical „Go“ situation	
Expected system behaviour:	
System starts automatically or driver initiated	
Frequency:	Importance:
3	5



A1.04

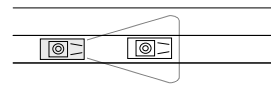
Short description:	
Obstacle on the lane	
e.g. approach to a stopped car	
Expected system behaviour:	
System stops before the obstacle automatically or on demand	
Frequency:	Importance:
3	5



⊙ Stationary obstacle

A1.05

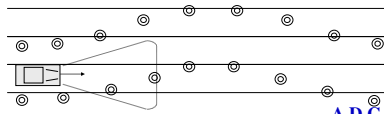
Short description:	
Typical „Stop“ situation	
Expected system behaviour:	
System remains in stopped condition	
System keeps safety distance	
Frequency:	Importance:
3	5



# A 2 Environmental scenarios

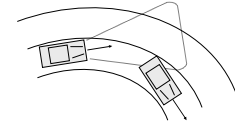
A2.01

Short description:			
Road works			
Expected system behaviour:			
System keeps constant velocity			
Frequency:	2	Importance:	3



A2.02

Short description:			
Curve driving			
Curve radius > thd			
Expected system behaviour:			
No target loss			
System keeps safety distance			
Frequency:	3	Importance:	5



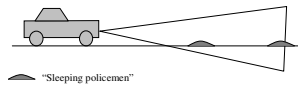
A2.03

Short description:			
Vertical curvature			
Bridges and underpass			
Expected system behaviour:			
No target loss in area of operation (thd)			
Frequency:	3	Importance:	5



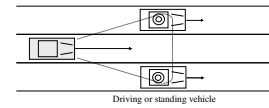
A2.04

Short description:			
"Sleeping policemen" on the lane			
Expected system behaviour:			
No reaction			
Frequency:	2	Importance:	2



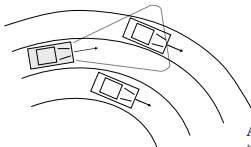
A2.05

Short description:			
Drive through situation			
gap > vehicle with plus 1.5m			
Expected system behaviour:			
System drives through without reaction			
Frequency:	3	Importance:	5



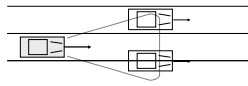
A2.06

Short description:			
Drive through situation in a curve			
Curve radius > thd			
Expected system behaviour:			
System drives through			
Frequency:	3	Importance:	5



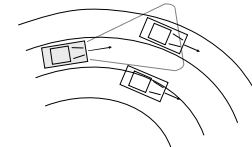
A2.07

Short description:			
Drive not through situation			
gap < vehicle with plus 1.5m			
Expected system behaviour:			
System keeps distance			
Frequency:	3	Importance:	5



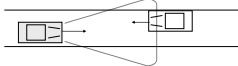
A2.08

Short description:			
Drive not through situation in a curve			
Curve radius > thd			
Expected system behaviour:			
System keeps distance			
Frequency:	3	Importance:	5



A2.09

Short description:			
Reaction on oncoming traffic on narrow roads			
Expected system behaviour:			
Brake if target is in trajectory			
Frequency:	1	Importance:	2



A2.10

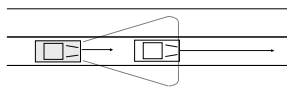
Short description:			
Ice on the road, system brakes more than friction allows			
Expected system behaviour:			
First: no acceleration, finish the manoeuvre then: switch off the system, warning			
Frequency:	1	Importance:	3



Car should be equipped with ABS

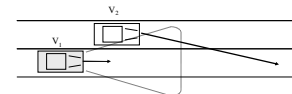
A3.01

Short description:			
Target acceleration			
Expected system behaviour:			
System accelerates up to max. speed			
Frequency:	3	Importance:	5



A3.02

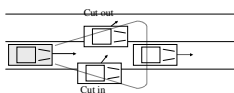
Short description:			
High speed cut-in			
$V_t \gg V_v$			
Expected system behaviour:			
System keeps constant velocity			
Frequency:	2	Importance:	4



# A 3 Target behaviour

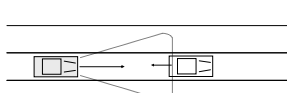
A3.03

Short description:			
Target behaviour			
cut-in or cut-out			
Expected system behaviour:			
Keep safety margin to new target			
Frequency:	3	Importance:	5



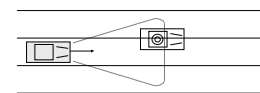
A3.04

Short description:			
Vehicle driving in the rear direction			
Expected system behaviour:			
Braking autonomously or on demand			
Frequency:	1	Importance:	2



A3.05

Short description:			
Target with lateral offset			
Expected system behaviour:			
Stop in front of the relevant vehicle if there is a part of it in the trajectory			
Frequency:	2	Importance:	5

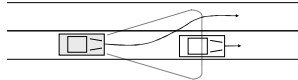


# A 4

## Driver behaviour

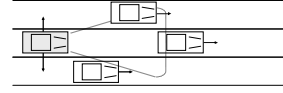
A4.01

Short description:
<b>Overtaking</b>
Expected system behaviour:
Adaptation to preceding vehicle until it is passed
Frequency: 3 Importance: 5



A4.02

Short description:
<b>Typical lane change scenario with different targets</b>
Expected system behaviour:
Keep safety margin to new target
Frequency: 3 Importance: 5



A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

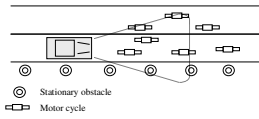
A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

# A 5

## Target separation

A5.01

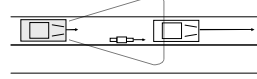
Short description:
<b>Max. number of targets (lateral separation with gap between targets)</b>
Expected system behaviour:
System reacts on relevant target
Frequency: 2 Importance: 5



⊙ Stationary obstacle  
⊞ Motor cycle

A5.02

Short description:
<b>Longitudinal separation(velocity/distance)</b>
Expected system behaviour:
System reacts on relevant target
Frequency: 2 Importance: 5



⊞ Motor cycle

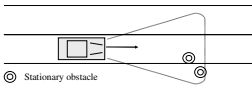
A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A5.03

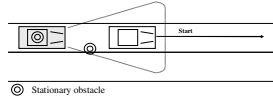
Short description:
<b>Target separation of small stationary obstacles</b>
Expected system behaviour:
System stops at stationary target in trajectory auto. or on demand
Frequency: 2 Importance: 5



⊙ Stationary obstacle

A5.04

Short description:
<b>Additional relevant stationary obstacle in trajectory</b>
Expected system behaviour:
Stay behind the relevant target
Frequency: 2 Importance: 5



⊙ Stationary obstacle

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

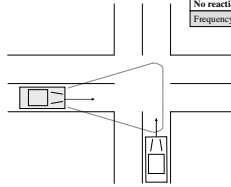
A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

# A x

## other scenarios

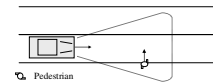
Ax.01

Short description:
<b>Lateral movement/Low speed crossing</b>
Expected system behaviour:
System brakes when target is in trajectory No reaction on lateral movement
Frequency: 1 Importance: 3



Ax.02

Short description:
<b>Lateral movement/pedestrian</b>
Expected system behaviour:
System brakes on demand when pedestrian is in trajectory. No reaction on lateral movement
Frequency: 1 Importance: 5



⊞ Pedestrian

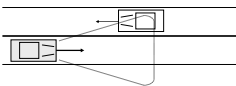
A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

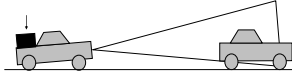
Ax.03

Short description:
<b>Oncoming traffic</b>
Expected system behaviour:
No reaction
Frequency: 3 Importance: 5



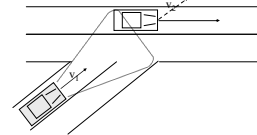
Ax.04

Short description:
<b>Car loaded</b>
Expected system behaviour:
No target loss
Frequency: 2 Importance: 5



Ax.05

Short description:
<b>Highway merging</b>
Expected system behaviour:
System decelerates when target is in trajectory and $v_x < v_y$
Frequency: 1 Importance: 2



A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

# B1

## Basic false reaction scenarios

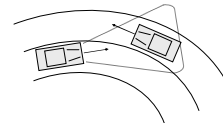
B1.01

Short description:
<b>Ghost target caused by street reflection</b>
Expected system behaviour:
No reaction
Frequency: 3 Importance: 5



B1.02

Short description:
<b>Oncoming Traffic in Curves</b>
Curve radius $> r_{th}$ .
Expected system behaviour:
No reaction
Frequency: 3 Importance: 5



A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

## B 2 Environmental false reaction scenarios

**B2.01**

Short description:	
Ghost target caused by guard rail or bank	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	3
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.02**

Short description:	
Ghost target caused by zebra crossing	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	1
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.03**

Short description:	
Ghost target caused by traffic light	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	1
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.04**

Short description:	
Ghost target caused by a bridge	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	3
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.05**

Short description:	
Ghost target caused by street reflector	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	1
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.06**

Short description:	
Weather conditions false alarm scenario rain/fog/snow	
Expected system behaviour:	
No reaction on ghost target and show system limits	
Frequency:	3
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.07**

Short description:	
Weather conditions target not detected rain/fog/snow	
Expected system behaviour:	
Show system limits or react properly	
Frequency:	3
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.08**

Short description:	
Vertical curvature ibd.	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	3
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.09**

Short description:	
Ghost target caused by road sign	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	3
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.10**

Short description:	
Fixed not relevant obstacle in a curve Ghost target caused by road sign curve radius $R > \text{thd}$ .	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	3
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.11**

Short description:	
Highway exit or lane bifurcation with obstacle in between	
Expected system behaviour:	
No reaction on not relevant targets	
Frequency:	3
Importance:	3

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B2.12**

Short description:	
Extended not relev. obstacle in curve Curve radius $> \text{thd}$ .	
Expected system behaviour:	
No reaction	
Frequency:	3
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

## B 3

### Target behaviour false reaction scenarios

## B 4 Driver behaviour false reaction scenarios

**B3.01**

Short description:	
Lateral movement/Trajectory of target	
Expected system behaviour:	
System brakes when target is in trajectory. No reaction on lateral movement	
Frequency:	1
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B4.01**

Short description:	
Lane change	
Expected system behaviour:	
Adaptation to new relevant target	
Frequency:	1
Importance:	5

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH

**B4.02**

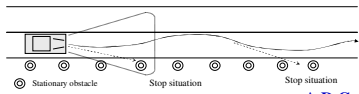
Short description:	
Parking	
Expected system behaviour:	
Stop right behind the vehicle: autom. or on demand	
Frequency:	1
Importance:	1

A.D.C.  
Automotive Distance Control System GmbH



**B4.03**

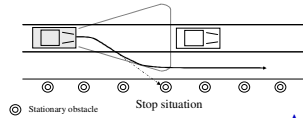
Short description:	
Vehicle trajectory	
Expected system behaviour:	
Reaction on relevant stationary objects in trajectory <b>auton. or on demand</b>	
Frequency:	1
Importance:	5



**A.D.C.**  
Automotive Distance Control System GmbH

**B4.04**

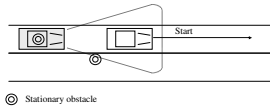
Short description:	
overtaking	
Expected system behaviour:	
Constant speed	
Frequency:	3
Importance:	5



**A.D.C.**  
Automotive Distance Control System GmbH

**B5.01**

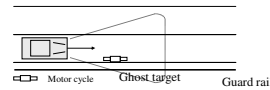
Short description:	
Additional, not relevant obstacle in start situation (lateral Separation)	
Expected system behaviour:	
Follow the target	
Frequency:	3
Importance:	5



**A.D.C.**  
Automotive Distance Control System GmbH

**B5.02**

Short description:	
Separation from ghost target	
Expected system behaviour:	
System keeps safety margin	
Frequency:	1
Importance:	5

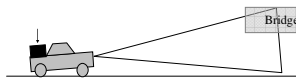


**A.D.C.**  
Automotive Distance Control System GmbH

**B 5**  
 Target separation  
 false reaction scenarios

**Bx.01**

Short description:	
Car loaded	
Expected system behaviour:	
No false reaction	
Frequency:	2
Importance:	4



**A.D.C.**  
Automotive Distance Control System GmbH

**B x**  
 other false  
 reaction scenarios

**A.D.C.**  
Automotive Distance Control System GmbH

## 2.1.3 Teilprojekt 1: Systemtechnik

### 2.1.3.1 AP 1.2 Systemkonzept Stop&Go

#### 2.1.3.1.1 Funktionales Konzept

Das zu konzipierende System soll in erster Linie dazu dienen, den Fahrer in der besonders ermüdenden Situation in einem Verkehrsstau zu unterstützen. Dazu soll es ihm häufig durchzuführende Routinetätigkeiten abnehmen. Das anzustrebende Wunschziel wäre natürlich ein völlig autonom arbeitendes System, das vom Fahrer keinerlei zusätzlichen Eingriff erfordern würde. Ein komplexes Verkehrsgeschehen sowie Grenzen in der Leistungsfähigkeit der Sensorik sind allerdings immer verbunden mit einem gewissen Fehlreaktionsrisiko. Zusätzlich ergibt sich prinzipiell ein gewisses Fehlinterpretationsrisiko, da das System die Absicht des Fahrers nicht immer zu erkennen vermag. Dennoch kann bereits ein eingeschränkt operierendes Stop&Go-System einen gewaltigen Nutzen für den Fahrer bieten.

- **ZIEL:**        **Unterstützung des Fahrers und Abnahme von Routinetätigkeiten im Verkehrsstau**

- **Kundennutzen:**

- Komfortables und entspanntes Fahren
- Minimierung der potentiell gefährlichen Situationen
- Reduzierung der Fahrerbelastung

- **Funktionalität:**

- Längsregelung des Fahrzeugs in **Stausituationen** auf Autobahnen, Landstraßen und innerstädtischen Hauptverkehrswegen
- Regelung auf bewegte relevante Objekte in Fahrtrichtung und stationäre Objekte auf Anforderung



**Abbildung 54: : Entspanntes Fahren im Stau mit S&G-Assistenz**

Die gewünschten bzw. geforderten Eigenschaften des Stop&Go Systems im Fahrzeug lassen sich durch folgende Tabelle beschreiben:

	Minimales Projektziel	Wunsch
Einsatzgebiet	Autobahn, Landstraßen und innerstädtische Hauptverkehrswege	
Geschwindigkeitsbereich	0 ... 20km/h	0 ... 40km/h
Beobachtungsbereich		
Distanz:	0 – 17m	40m
Vertikaler Öffn.winkel:	16°	20°
Horizont. Öffn.winkel:	45°	60°
Systemaktivierung	Knopf im Lenkrad	Knopf im Lenkrad
Zielauswahl	Bewegte relevante Objekte in Fahrtrichtung (extrapol. Fzg.trajektorie), stationäre Objekte auf Anforderung durch Knopf im Lenkrad	Bewegte und stationäre relevante Objekte in Fahrtrichtung (extrapol. Fzg.trajektorie)
Startfreigabe	Manuell durch Knopfdruck im Lenkrad oder Tippen auf Gaspedal	automatisch
Relevante Ziele	Pkw,Lkw, Motorräder, Fahrräder, landw. Fzge. (keine Fußgänger)	Pkw,Lkw, Motorräder, Fahrräder, landw. Fzge., Fußgänger
Wahl der Wunschgeschwindigkeit	Möglich in Schritten von 5km/h (default 20km/h)	Möglich in Schritten von 1km/h
Maximale Beschleunigung	-4m/s <sup>2</sup> (geschwindigkeits- und situationsabhängig) +2m/s <sup>2</sup>	-4,5m/s <sup>2</sup> (geschwindigkeits- und situationsabhängig) +2,5m/s <sup>2</sup>
Kombination: ACC + S&G Optional	Manuelles Umschalten erforderlich	Möglich innerhalb eines (Kombi)-Betriebsmodus

**Tabelle 23: Spezifikation des S&G-Systems im Fahrzeug**

Das folgende Bild gibt einen Überblick über die wesentlichen Betriebszustände, in denen sich das System typischerweise befindet. Die „Geschwindigkeitssteuerung“ entspricht der gewöhnlichen Tempomatfunktion, bei der die voreingestellte Geschwindigkeit automatisch gehalten wird. Die Abstandssteuerung entspricht der Regelung, die bei Erkennung eines relevanten Hindernisses einsetzt, eines fahrenden oder gegebenenfalls eines bestätigten stehenden, um eigenständig immer einen Sicherheitsabstand einzuhalten. Die Haltesteuerung schließlich ist der Betriebszustand, der nach einem notwendigen Anhalten durch die Abstandssteuerung erreicht wird, bis das Fahrzeug sich bei frei werdender Fahrspur nach einer Bestätigung des Fahrers wieder in Bewegung setzen kann.

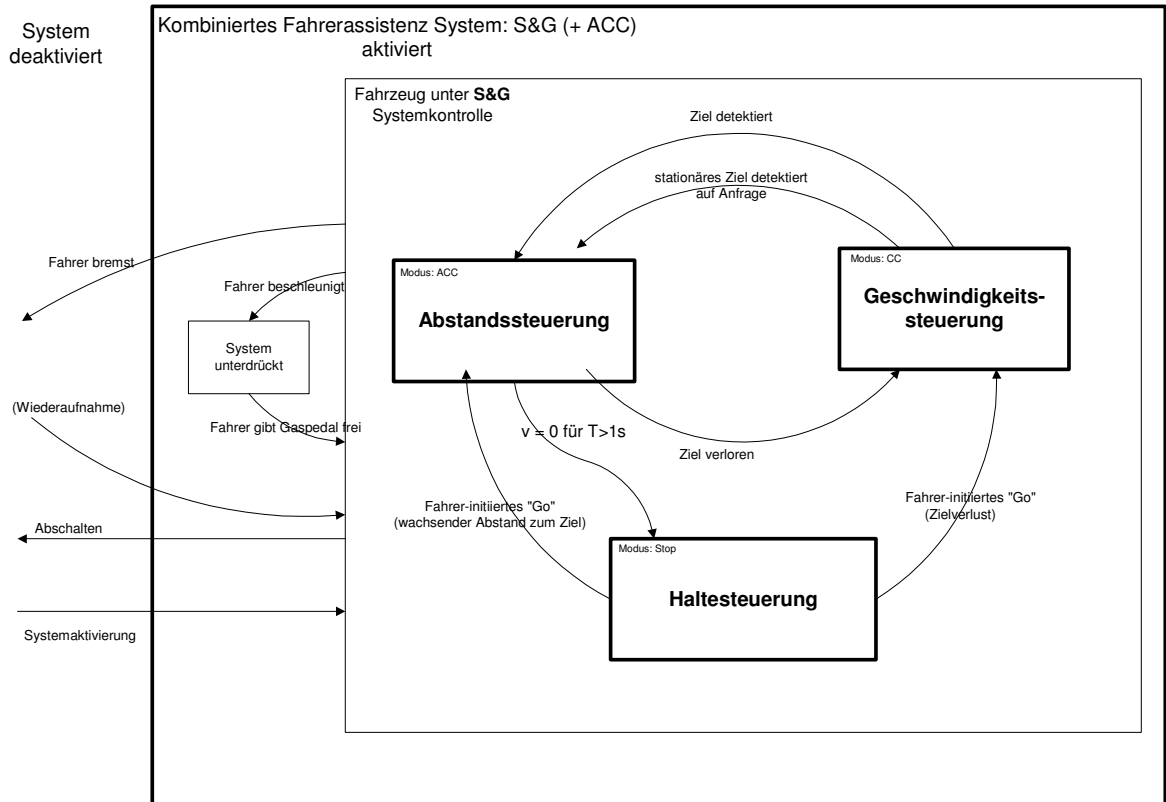


Abbildung 55: Betriebszustände des S&amp;G-Systems

Die maßgeblichen Interaktionen die nach wie vor vom Fahrer gefordert werden, sind eine Bestätigung des Starts und eine Bestätigung auf ein stehendes Hindernis zu reagieren. Beide Fahrereingriffe sind jedoch mit einem minimalen Aufwand verbunden und erfüllen gleichzeitig den Zweck, die Aufmerksamkeit des Fahrers kontinuierlich an das Verkehrsgeschehen zu binden. Wie die Umsetzung mit nur einem einzigen Knopf als Bedienelement umzusetzen ist, zeigt folgendes Schaubild. Aufgrund der jeweiligen Situation ist die Funktion des Knopfes jeweils eindeutig festgelegt. Für den Fahrer bedeutet dies, dass er das Bedienelement schnell, einfach und ohne lange überlegen zu müssen, erreichen kann, was für die Stop&Go Funktion, die nur wenig Spielraum an Abstand lässt, auch notwendig ist.

### Typische S&G Eingriffe

(minimierter Arbeitsaufwand)

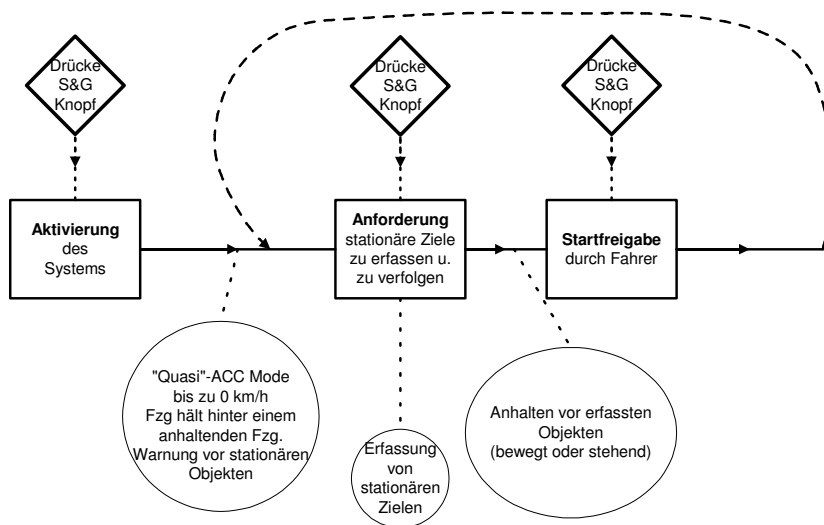


Abbildung 56: Ablauf der Steuerung über einen einzigen „S&G-Knopf“

Der anzustrebende Einbauort ist vorzugsweise ein Knopf am Lenkrad, da nur dieser Platz einfach, schnell und bei der Häufigkeit der Nutzung auch entsprechend bequem zu erreichen ist.

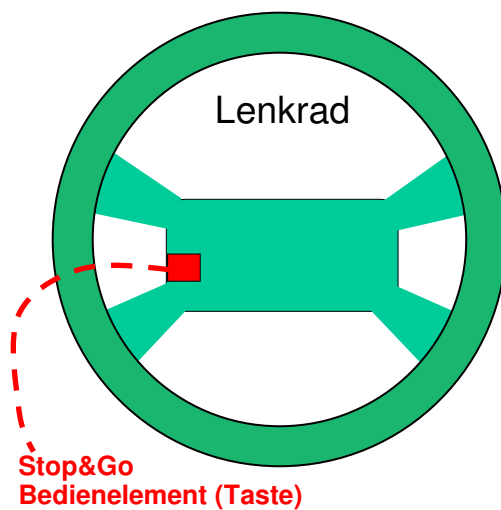


Abbildung 57: Bevorzugte Anordnung der S&G-Taste

#### Festlegung des Beobachtungsfeldes:

Reichweite:

Die minimale Sensor-Reichweite ergibt sich aus dem benötigten Anhalteweg (Reichweite = Anhalteweg ( $A$ ))

$$A = -\frac{v^2}{2a_b} + v * T_R + d_0$$

$A$ : Anhalteweg in m,  $v$ : Geschwindigkeit in m/s,  $a_b$ : Bremsverzögerung in  $m/s^2$ .  $d_0$ : Abstand zum vorausf. Fahrzeug im gestoppten Zustand = Haltedistanz in m,

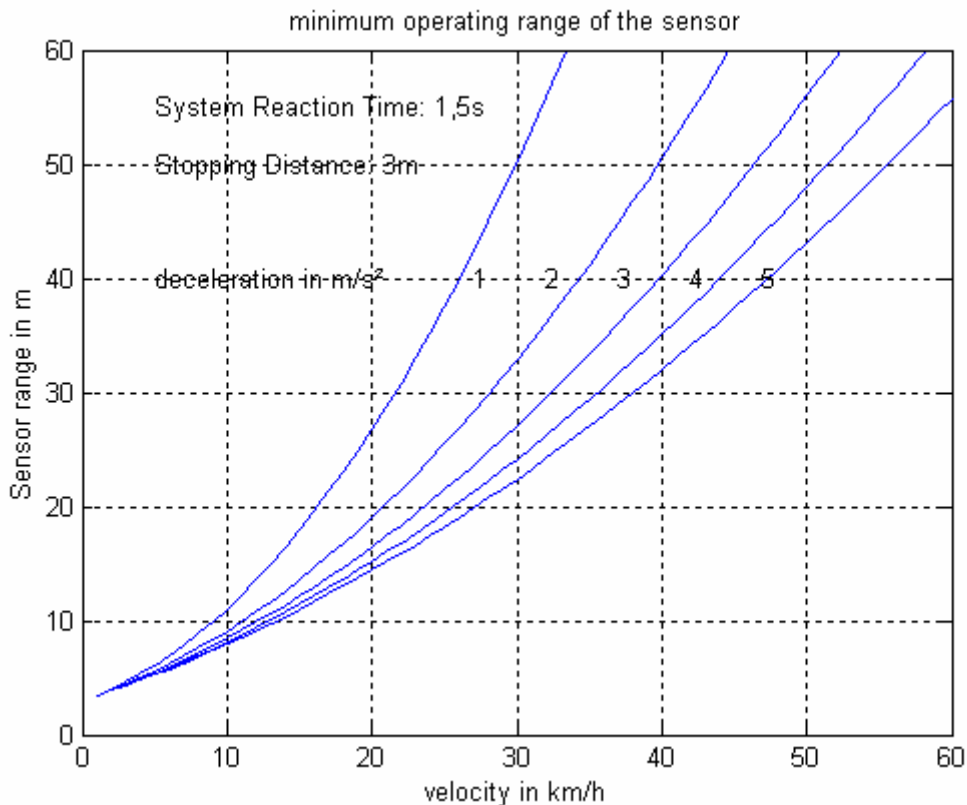
Die Gesamtreaktionszeit des Systems ergibt sich aus der Reaktionszeit des Fahrers für einen notwendigen Eingriff, der Reaktionszeit des Sensors und des Fahrzeugs.

$T_R$ : Reaktionszeit des Fahrers und des Systems in s.

$$T_R = T_{\text{Fahrer}} + T_{\text{Sensor}} + T_{\text{Aktuator}}$$

$T_{\text{Fahrer}}$  von ca. 1,0s wird benötigt zur Aktivierung des Systems für stationäre Hindernisse und zu einem gegebenenfalls notwendigen Eingreifen des Fahrers bei einer Fehlreaktion.  $T_{\text{Sensor}}$  wird auf ca. 150ms geschätzt bei einer Zykluszeit von 30ms und einer fünffach redundanten Messwertevaluierung. Mit einer Reaktionszeit der Bremse von ca. 350ms ergibt sich eine Systemreaktionszeit von ca. 1,5s.

Das Ergebnis des benötigten Anhalteweges ist in folgendem Diagramm dargestellt:



**Abbildung 58: Darstellung der benötigten Sensor-Reichweite abhängig von Geschwindigkeit und maximaler Verzögerung**

Dieser Anhalteweg ist identisch mit dem minimalsten benötigten Messbereich. Da bei einer Phasemessung, wie sie vom PMD durchgeführt wird, Messungen bei Überschreiten der Periodenlänge mehrdeutig werden, muss dieses Überschreiten der Periodenlänge, des sogenannten Eindeutigkeitsbereiches verhindert werden. Dies lässt sich bei einem unbeschränkten Messbereich nur dadurch verhindern, dass jedes weiter entfernte Signal zu schwach für eine Auswertung wird. D.h. die Periodenlänge und Empfindlichkeit des Systems sind aufeinander abzustimmen. In anderen Worten:

Der Eindeutigkeitsbereich muss so weit ausgedehnt werden, dass ein starkes Ziel am Ende des Eindeutigkeitsbereiches immer noch deutlich unter dem kleinsten noch zu detektierenden Signal bleiben muss. Dieses kleinste zu detektierende Signal wird erzeugt durch ein sogenanntes „Worst-Case-Target“ am Ende des Messbereiches.

#### Horizontaler Öffnungswinkel

Es sollten am Ende des Messbereiches möglichst noch die beiden Nachbarspuren mitbeobachtet werden können. Objekte sollten in Kurven bei Kurvenradien, die in der definierten Umgebung typischerweise auftreten, noch verfolgt werden können. Auf kurzen Distanzen sollte möglichst die gesamte Fahrzeugfront beobachtet werden können, z.B. um auch hinter einem versetzt fahrenden Motorradfahrer anzuhalten. Dieser Wunsch für den Nahbereich stimmt gleichzeitig in etwa mit den Anforderungen der Precrash-Funktion überein.

#### Vertikaler Öffnungswinkel:

Der Vertikale Öffnungswinkel wird begrenzt durch die Motorhaube nach unten und die horizontale Blickrichtung für weit entfernte Ziele. Zusätzlich ist eine Toleranz von ca.  $2^\circ$  durch eine Frontabsenkung zu berücksichtigen, die sich durch die Dynamik von Fahrmanövern, durch Bremsen mit einer Verzögerung von  $3\text{m/s}^2$  ( $1^\circ$ ) und durch unterschiedlichen Reifendruck ergeben kann.

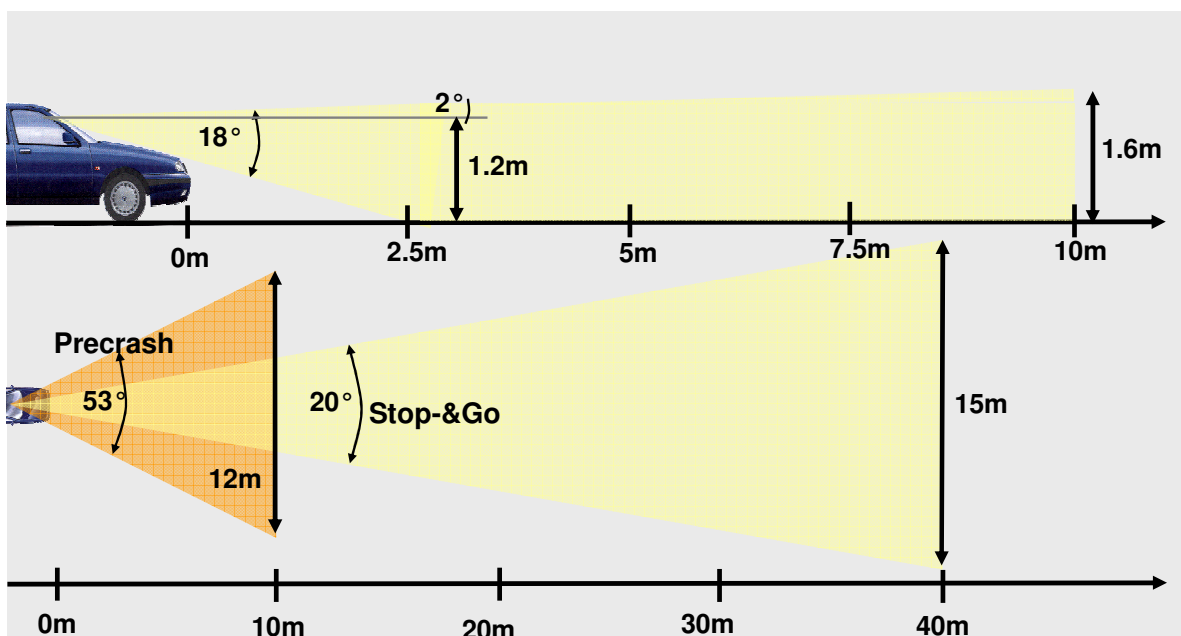
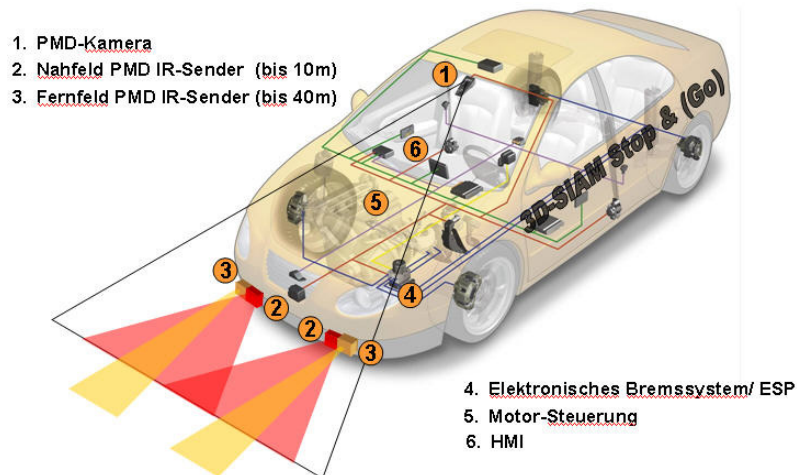


Abbildung 59: Öffnungswinkel der PMD-Kamera

### 2.1.3.1.2 Fahrzeug-Konzept

Folgende Skizze zeigt schematisch den Aufbau des Fahrzeugs, den Beobachtungsbereich und den Ausleuchtungsbereich. Für jede Applikation werden jeweils zwei Sender im Fahrzeug verbaut. Die Ausleuchtung für den mittleren Entfernungsbereich für S&G ist gelb markiert, die Ausleuchtung für kurze Entfernungen für die Precrash-Funktion ist rot markiert. Dieses Konzept garantiert einen optimalen Beobachtungsbereich, verhindert direktes Übersprechen zwischen Sender und Empfänger und vermeidet Verluste der Sendeenergie, wie sie z.B. bei einer Integration im Innenraum auftritt. Die Kamera befindet sich dabei in einer Position, die vom Wischer gereinigt wird.



**Abbildung 60 PMD-System-Integration ins Fahrzeug:**

Der Verbau von vier Sendern ergab sich im Laufe des Projektes. Für die Leistungsausbeute und die Abdeckung des Beobachtungsfeldes wären zwei Sender ausreichend. Die Systemerprobung ergab allerdings, dass für die Precrash-Funktion eine breitere und lückenlosere Abdeckung der Fahrzeugfront notwendig ist, als die relativ schmalen Strahlkeulen der S&G-Sender dies hätten garantieren können. Die schnellste Lösung war, für die Precrash-Funktion weitere Sender mit entsprechend aufgeweiteten Strahlen zusätzlich zu integrieren.



## 2.1.3.1.3 Sensor-Konzept

Es wurde im Fahrzeug ein einziges PMD-System für beide im Projekt geplanten Funktionen integriert. Die Anforderungen wurden abgestimmt. Auch in einer späteren Serie wird sicher nur eine einzige Kamera im Fahrzeug verbaut werden können. Auch sie muss dann in der Lage sein, alle angedachten Funktionen zu erfüllen. Ausgehend von obiger funktionaler Spezifikation wurden die Anforderungen an die PMD-Kamera abgeleitet:

**Tabelle 24: Sensorspezifikation für S&G und für die Precrash-Sensierung**

Parameter	Stop&Go	Precrash	Bemerkung
Entfernungsmessbereich	1,9...18,5m	1,9...10m	ab Windschutzscheibe
Entfernungseindeutigkeitsbereich	0...187m		
Entfernungsmessgenauigkeit (statistisch)	1,9...11m: +/- 10cm 11...18,5m: +/- 30cm	+/- 10cm	= $\pm\sigma$ = Standardabweichung
Entfernungsmessgenauigkeit (absolut)	+/- 0,5m		
Geschwindigkeitsmessbereich	+/- 50km/h	0...-150km/h	
Geschwindigkeitsmessgenauigkeit (statistisch)	1,9...11m: +/- 1km/h 11...18,5m: +/- 3km/h	+/- 1km/h	= $\pm\sigma$ = Standardabweichung
Öffnungswinkel (hor. x vert.)	45° x 16°	60° x 16°	Vollwinkel, Sensor hinter WSS
Laterale Auflösung (hor. x vert.)	50cm x 50cm	10cm x 20cm	= 2 x (projizierte Pixelgröße)
Projizierte Pixelgröße (hor. x vert.)	25cm x 25cm	5cm x 10cm	in 18,5m(S&G)/ 7m(CV)Entfg.
PMD-Pixelanzahl (hor. x vert.)	64 x 16 (60 x 21)	(110 x 20)	Wunschwerte in Klammern
Daten Update Rate	30ms	15ms	CV Wunschwert: 10ms

Entsprechend den unter 1.3.2. genannten Gründen der Umwidmung wurde der Aufwand für Precrash reduziert. Für einige Parameter, insbesondere die Zykluszeit und den Öffnungswinkel, wurde ein Kompromiss akzeptiert:

**Tabelle 25: Zusammengeführte Sensorspezifikation für S&G und Precrash**

Parameter	Stop & (Go) und Precrash	Bemerkung
Entfernungsmessbereich (ab Stoßstange) (Winkelangabe =Vollwinkel)	0.1...10 m (53° hor.) 0.1...40 m (20° hor.)	
Entfernungsmessgenauigkeit (statistisch)	<10m (53°): +/- 10cm <40m (20°): +/- 10cm	= $\pm\sigma$ = Standardabweichung auf „worst case“ Target (Reflektion=20%)
Entfernungsmessgenauigkeit (absolut)	+/- 0,5m	
Geschwindigkeitsmessgenauigkeit (statistisch)	10m: +/- 1km/h 40m: +/- 3km/h	= $\pm\sigma$ = Standardabweichung
Öffnungswinkel (hor. x vert.)	53° x 18° (min. 45°x16°)	Vollwinkel, Sensor hinter WSS
Laterale Auflösung (hor. x vert.)	0.8° x 1.1°	0.15m x 0.20m @10m 0.60m x 0.80m @40m
PMD-Pixelanzahl (hor. x vert.)	64 x 16	
Daten Update Rate	25ms (40 Hz)	für eindeutige Entfernungsbilder

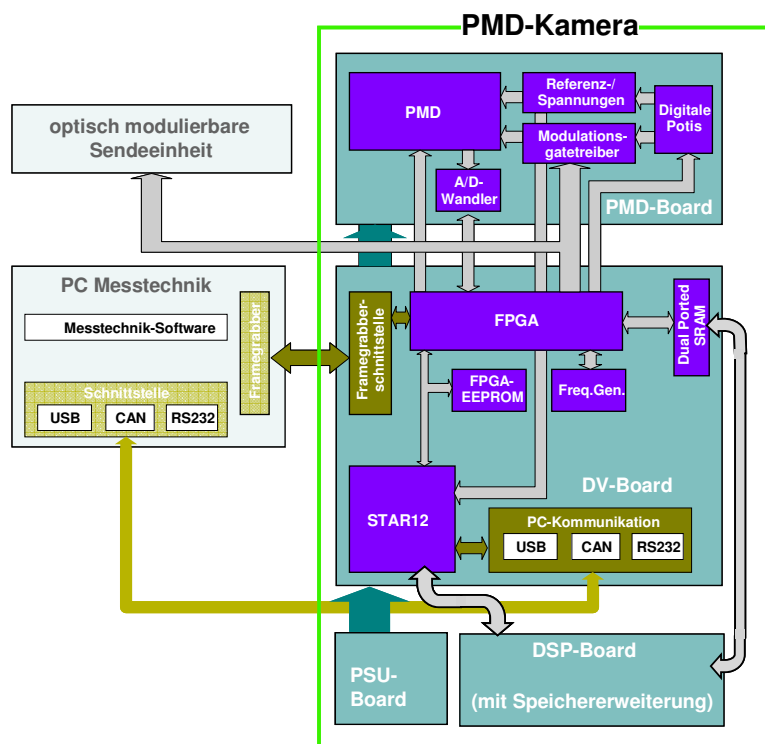
### 2.1.3.2 AP 1.3 Elektrooptische AVT

Es wurde eine Kamera aufgebaut, die gleichzeitig als Laborsystem nutzbar war und im Fahrzeug verbaut werden konnte. Für das Labor wurde ein Höchstmaß an Flexibilität gefordert und die Möglichkeit analoge Spannungen am PMD individuell einstellen zu können. Dies war notwendig, da sich erst im Verlaufe der Charakterisierungsarbeiten im Projekt die optimalen Arbeitspunkte ergaben. Für das Fahrzeug war ein hinreichend kleines Bauvolumen gefordert. Wichtigstes Kriterium allgemein war ein EMV-optimierter Aufbau. Um mit der derzeit gelieferten PMD-Empfindlichkeit eine für die Applikation ausreichende Reichweite zu erzielen, ist es notwendig, das Systemrauschen möglichst gering zu halten. Andererseits ist ebenfalls darauf zu achten, keine Einstreuungen aufzufangen, um keine systematischen Fehler zu produzieren. Aus den genannten Gründen wurde ein modularer Aufbau gewählt. Dies reduzierte nicht nur das Volumen, sondern verhinderte auch bestmöglich das Übersprechen der digitalen Verarbeitung und der Spannungserzeugung auf den analogen Signalpfad. Ein weiterer gravierender Vorteil der Modularität ist die Adaptierbarkeit an neue PMD-Generationen. Zu diesem Zweck genügt die Anpassung der PMD-Platine, der Rest des Systems kann weiter verwendet werden.

Die Regelbarkeit analoger Spannungen erforderte allerdings den Einsatz von Potentiometern, die das Volumen deutlich vergrößerten. Für eine spätere Serienlösung spielt dies keine Rolle. Für unseren aktuellen Aufbau konnte ein tragbarer Kompromiss gefunden werden.

#### Kamerakonzept:

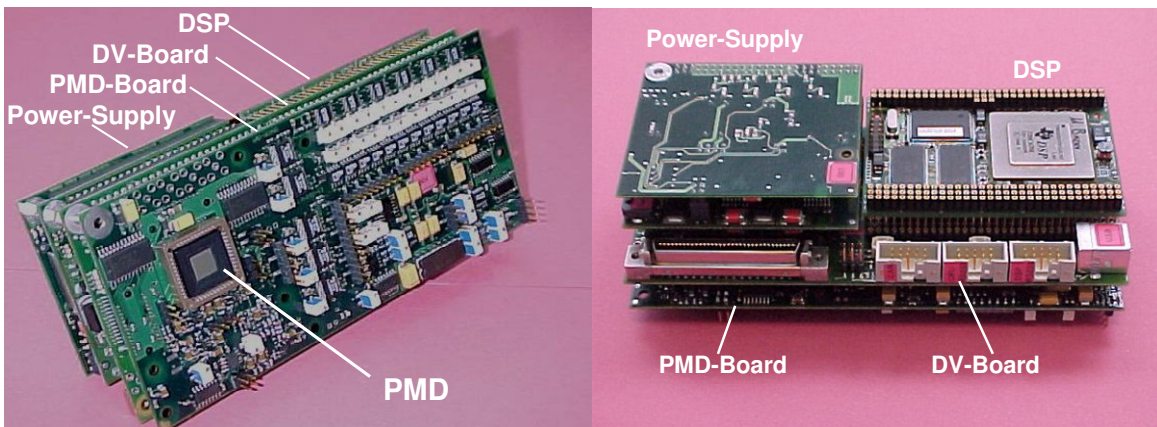
Der modulare Aufbau der Kamera wird in der Abbildung wiedergegeben. Die Kamera besteht aus drei Platinebenen. Die erste Ebene bildet das PMD-Board mit den analogen Signalpfaden und der Möglichkeit die analogen Spannungen zu steuern. Auf der zweiten Ebene, dem DV-Board, befinden sich die Komponenten der digitalen Verarbeitung. Dies sind im Wesentlichen der Controller und das FPGA zur Generierung der Modulation, der Phasenverschiebungen, der Ansteuerung und Auslese des PMD



im Messablauf und der Rohdatenverarbeitung. Die dritte Ebene bildet ein DSP-Board zur optionalen Integration der 3D-Bildverarbeitung und ein Board für die Stromversorgung.

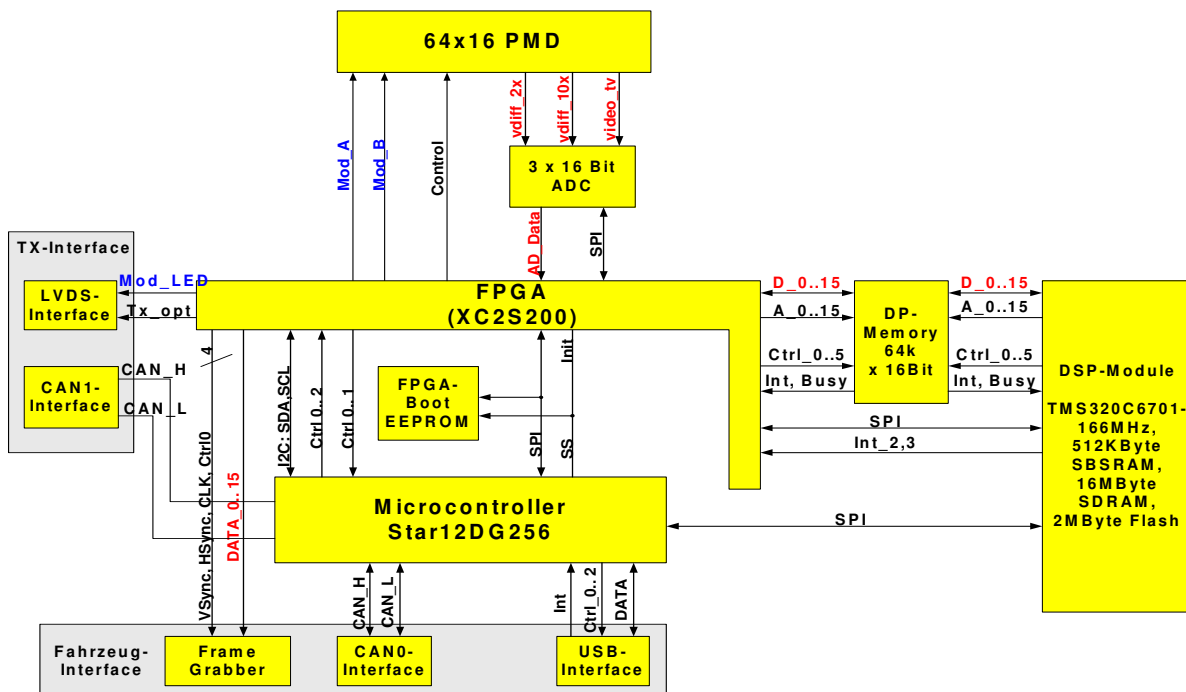
**Abbildung 61: Anordnung der Komponenten auf den drei Platinebenen**

Den Aufbau der Kamera zeigen folgende Abbildungen. Die Modulbauweise erlaubt eine gute Ausnutzung des Volumens. Dabei kann man abschätzen, dass sich der Bauraum für ein Serienprodukt noch einmal um eine Größenordnung reduzieren lässt. Gleichzeitig bietet das PMD-Board alle Eingriffsmöglichkeiten, die man für Labormessungen benötigt. Da das System der Evaluierung dienen soll, sind im Gegensatz zu einem Serienprodukt Funktionen redundant vorhanden. So sind mehrere AD-Wandler parallel auf dem Board, die in der Lage sind, die Phasenbilder in mehreren Verstärkungen gleichzeitig zu liefern. Welche Kanäle am geeignetsten sind, wurde erst im Laufe der Evaluierungsphase ermittelt.



**Abmessungen (Gehäuse ohne Objektiv):**  
 Höhe = 88mm, Breite= 170mm, Tiefe = 70mm

**Abbildung 62: Vorder- und Rückansicht des Platinenstapels der PMD-Kamera**



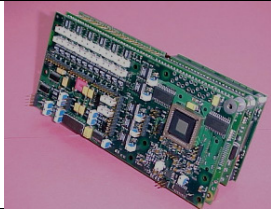
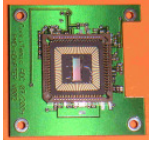
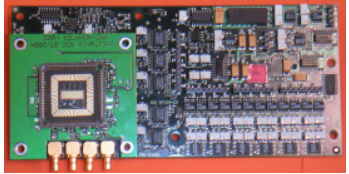
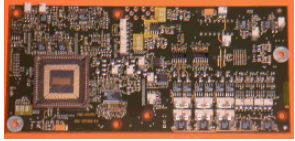
**Abbildung 63: Blockschaltbild der Kamera mit Darstellung der internen Kommunikation**

Siehe auch Verzeichnis der Abkürzungen

Zur Aufzeichnung der Rohdaten wurden die Einzelphasenbilder des PMDs über eine Framegrabber-Schnittstelle zum Messtechnikrechner weitergeleitet. Aufgrund des Projektverlaufes konnte die Bildverarbeitungssoftware nicht mehr auf das DSP übertragen werden. Die Verarbeitung fand gleich auf dem Messtechnikrechner statt. Dies hatte auf das Projektergebnis keinen Einfluss. Inwieweit in späteren Serienprojekten die Datenverarbeitung eher zentral oder modular in den Sensoren geschieht, wird gerade bei den Automobilherstellern diskutiert.

Zur Durchführung der Kommunikation und Integration der SW-Module wurde eine Rahmensoftware entwickelt. Dies umfasste im Wesentlichen den Controller und das FPGA.

Die Schaltungsentwicklung der Kamera wurde in der A.D.C. durchgeführt, die Layouterstellung, die Leiterplattenfertigung und die Bestückung als Auftrag vergeben. Im Laufe des Projektes wurden drei Generationen von PMD-Chips entwickelt. Zur Nutzung dieser PMD-Varianten wurden zwei Platinengenerationen und eine Zwischenlösung entwickelt.

	<b>PMD-Matrix</b>	<b>Kamerageneration</b>	
1. Wafer Run	Hauptthema: <b>16x16 Matrix</b> ohne Fremdlichtunterdrückung (=SBI) 16 x 16 Pixel mit Spannungsauslese und Verstärker zur Untersuchung der Matrixeinflüsse	Generation 1 ausgelegt für 16 x 16 Pixel und direkte Ausgabe der PMD-Signale	
2. Wafer Run	Hauptthema: Fremdlichtunterdrückung in der Matrix M1: <b>16 x 16 Pixel</b> mit SBI (V1) M2: <b>16 x 16 Pixel</b> , 4 Quadranten mit SBI (V2, V3, V4) sowie adaptiver Integrationszeitregelung (AIZS) M3: <b>64 x 16 Pixel</b> : optional mit oder ohne SBI Differenzverstärker mit 2 Ausgängen	Generation 1 mit Adapterplatine für PMD 	
3. Wafer Run	Hauptthema: <b>64x16 Matrix</b> mit On-Chip-Elektronik zur Vermeidung der Sättigung (z.B. durch Reduzierung des Fremdlichteinflusses und Erhöhung der Signaldynamik (AIZS))	Generation 2: verarbeitet 16 x 64 Pixel und ist an die On-Chip-Elektronik angepasst 	

**Tabelle 26: PMD-Chip- und Systemvarianten die im Laufe des Projektes aufgebaut wurden**

Die zweite Generation der Kameras diente nicht nur der Anpassung an die neue 64 x 16 PMD-Matrix, sondern vornehmlich auch zur Systemoptimierung.

### 2.1.3.3 AP 1.4 Integration S/E-Modul

Die Ergebnisse der Arbeitspakete TP 2 zur Senderentwicklung, AP 1.3 zum Aufbau der Kameraelektronik sowie AP 2.6 zur Empfangsoptik flossen direkt in den Aufbau des 3D-Sensorsystems ein. Neben dem Hardwareaufbau wurde für das Kameramodul ein Betriebssystem entwickelt. Aufgaben des Betriebssystems waren die Messablaufsteuerung, die Datenerfassung, die Zwischenspeicherung und der Datentransfer. Die Daten mussten der Systemumgebung zur Verfügung gestellt werden. Dazu wurden eine CAN-Schnittstelle für das Fahrzeug, eine Framegrabber-Schnittstelle für die Messtechnik und eine serielle Übertragung via USB über ein Messtechnik-Interface in die Kamera integriert. Die Empfindlichkeit und der Betriebsmodus der Kamera mussten an die Leistungsfähigkeit des Senders angepasst werden. Das FPGA übernahm die Modulationserzeugung und die Messablaufsteuerung inklusive der Datenerfassung und der Kommunikation. Da im Laufe der Systemcharakterisierung die Rohdatenverarbeitung ständig zu modifizieren war, wurde sie vom Controller auf den Messrechner ausgelagert. Dies gestattete einen flexibleren und effizienteren Zugriff. Die Phase der Programmierung und Evaluierung konnte damit wesentlich verkürzt werden. Auch die temperaturabhängige Steuerung der Sender wurde anstelle der Kamera von der Messtechnik wahrgenommen. (Die Sender besitzen allerdings noch einen eigenen unabhängigen Überlastungsschutz) Der Controller hatte lediglich die Aufgabe den Messablauf zu kontrollieren. Er regelte die Kommunikation der Parametereinstellungen mit dem Fahrzeug über CAN und überwachte Temperatur und Spannungen auf der Kameraplatine. Die Rohdatenverarbeitung gliedert sich wie folgt:



**Abbildung 64: Rohdatenverarbeitung**

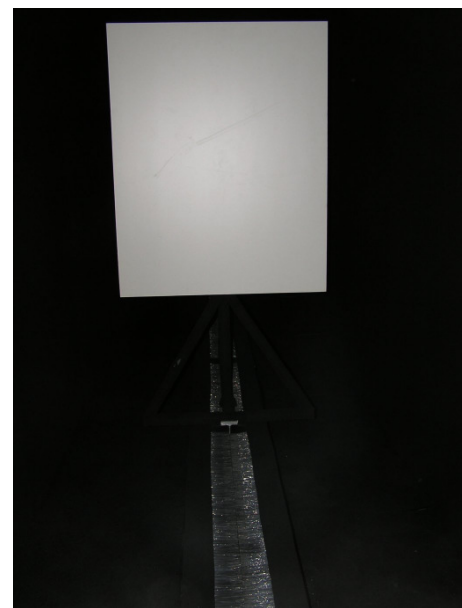
Für ein Entfernungsbild ist die Aufnahme von 4 Phasenbildern notwendig. Um die gesamte Reichweite abzudecken, ist dieser Vorgang mit mehreren Frequenzen zu wiederholen. In unserem Fall wurden drei Frequenzen genutzt. Um die Daten korrekt zu interpretieren ist der Arbeitsmodus des PMD abzufragen, d.h. welche Anteile der On-Chip-Funktionen aktiv waren. Weitere Aufgaben waren die Plausibilisierung der Daten (Prüfung auf Sättigung), die Auswahl der szenenabhängig optimalen Verstärkerstufe und die Korrektur, falls die Schaltung zur Dynamikerweiterung (AIZS) eingeschaltet wurde. Einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Performance der gesamten Kamera zeigte die Rohdatenfilterung.



Daher wurden verstärkte Anstrengungen in die Entwicklung und Anpassung dieser Filter gelegt. Es wurden unterschiedliche Filterarten getestet und auf mehreren Ebenen der Datenprozessierung eingesetzt. Die besten Ergebnisse erzielten wir mit einem gewichteten, räumlichen und zeitlichen Mittelwertfilter. Eingesetzt wurde die Filterung bei den Phasenbildern, bei der Berechnung der Entfernungsbilder und schließlich nach der Mehrdeutigkeitsauflösung bei den eindeutigen Entfernungsbildern. Mit der Anwendung dieser Filterung ließ sich die Empfindlichkeit und damit die Reichweite dramatisch steigern. Allerdings ergaben sich auch Einflüsse auf den Kontrast und damit die Erscheinungsform der Targets. Auf die passende Einstellung der Filter ist daher bei einer eventuellen Objektklassifikation zu achten. Wichtigstes Ergebnis ist daher, dass die Filterung unbedingt an die Applikation anzupassen ist.

### Charakterisierung des PMD-Kamerasystems:

Die Eigenschaften des Kamerasystems, insbesondere die statistischen und systematischen Fehler, wurden auf einer hauseigenen Messstrecke in cm-Schritten über alle Entfernungen vermessen. Die Messstrecke war 27m lang, mit einer stark IR-absorbierenden Schicht ausgekleidet und mit einem Antriebssystem ausgestattet, das Zieltafeln mit ausgewählten Geschwindigkeiten (bis zu 30km/h) auf beliebige Entfernungen bringen konnte. Die Steuerung des Antriebs erfolgte über einen PC in einer LabVIEW-Umgebung. Da für die PMD-Messtechnik ebenfalls eine LabVIEW -Oberfläche genutzt wurde, war es möglich, die Antriebskontrolle und die PMD-Datenauswertung in eine einzige Systemumgebung zu integrieren. Dadurch konnten große statistische Datenmengen bei beliebigen Entfernungen vollautomatisiert aufgezeichnet werden. Die Distanzmessstrecke hatte den Vorteil, dass der Signalverlauf, insbesondere die relative Änderung der Phase mit der Signalstärke der Realität entspricht.



**Abbildung 65: diffus reflektierende, helle Tafel auf der Antriebsschiene der Messstrecke**

Wichtigste Ergebnisse für die Einschätzung der Systemleistung sind Empfindlichkeit und Reichweite. Sie lassen sich aus den folgenden Messreihen für die Standardabweichung entnehmen. Dafür wurden folgende Messbedingungen gewählt:

- **kein Hintergrundlicht**
- 4 Phasenmessung
- Integrationszeit pro Phase = 1000µs
- PMD Z12-M1-ME1 mit SBI und AIZS
- Objektiv: f=12.5mm, F#1.3 mit IR-Filterglas RG780
- 20W opt. Peakleistung (20° x 20°), 870nm
- weißes Target (BxH) 80x100cm, R=0,8
- 2000 Messungen pro Messpunkt (Parametersatz )

Die Genauigkeit eines Mehrfrequenzverfahrens wird bestimmt durch die höchste Modulationsfrequenz. Zur Auswahl der günstigsten Messfrequenz wurden Messreihen aufgezeichnet bei unterschiedlichen Frequenzen. Dabei wurden alle Ausgänge ausgewertet, die der On-Chip-Verstärker zur Verfügung stellte. Als Ergebnis zeigte sich ein eklatanter Fortschritt im Vergleich zu allen bisher zur Verfügung stehenden Systemen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass das System noch nicht die letzte Optimierungsstufe erreicht hat. Die Filterung der Rohdaten und der Einsatz einer lichtstärkeren Optik mit  $F=0.7$  brachten noch einmal einen deutlichen Fortschritt in der Reichweite des Systems.

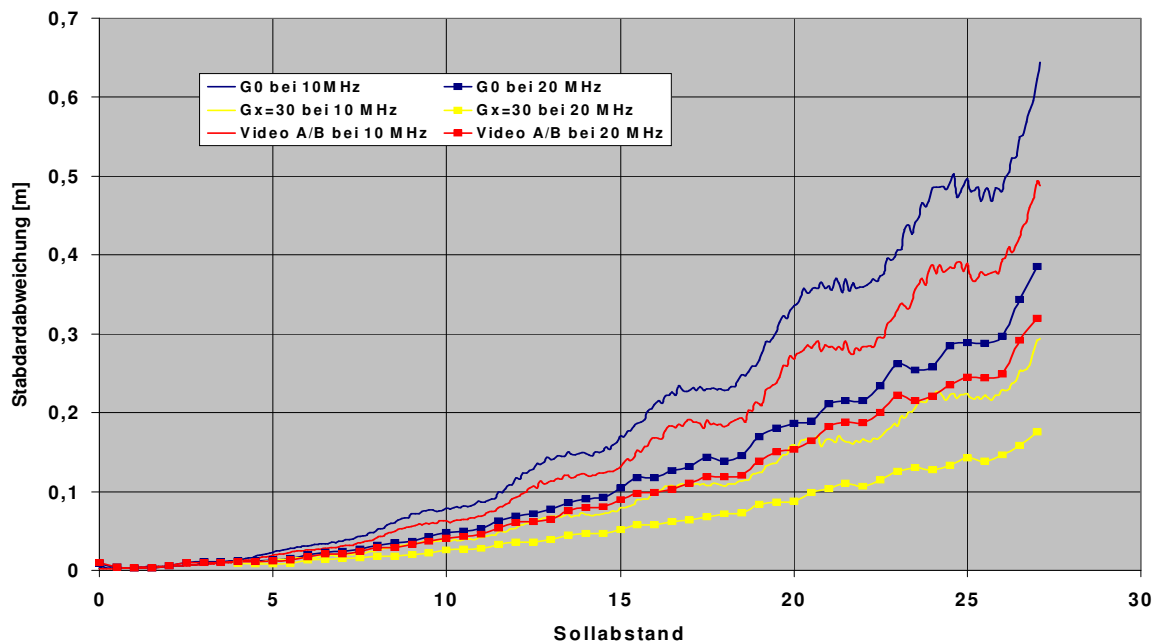


Abbildung 66: Messergebnisse zu Empfindlichkeit/Reichweite des Systems bei unterschiedlichen Ausgangskanälen (Verstärkungen:  $G_0=1x$ ,  $G_x=30x$ , Video A/B=1 direkter Ausgang ohne Differenzverstärker) zur Wahl der höchsten Messfrequenz, die über die Genauigkeit des Mehrfrequenzverfahrens entscheidet.

Für die interne Regelung der Kamera musste herausgefunden werden, welchen Verstärkerausgang die Kamera für eine optimale Datenerfassung zu wählen hatte. Dazu wurden sämtliche zur Verfügung stehende Datenkanäle ausgewertet und verglichen. Neben den Ausgängen der On-Chip-Verstärker mit Verstärkungsfaktoren von 1, 5, 10, 20 und 30 kann noch der direkte Ausgang des PMD genutzt werden. Gemessen wird bei einer Modulationsfrequenz von 20 MHz, da nur die höchste Frequenz für die Messgenauigkeit des Systems verantwortlich ist. Das Ergebnis zeigt folgende Abbildung:

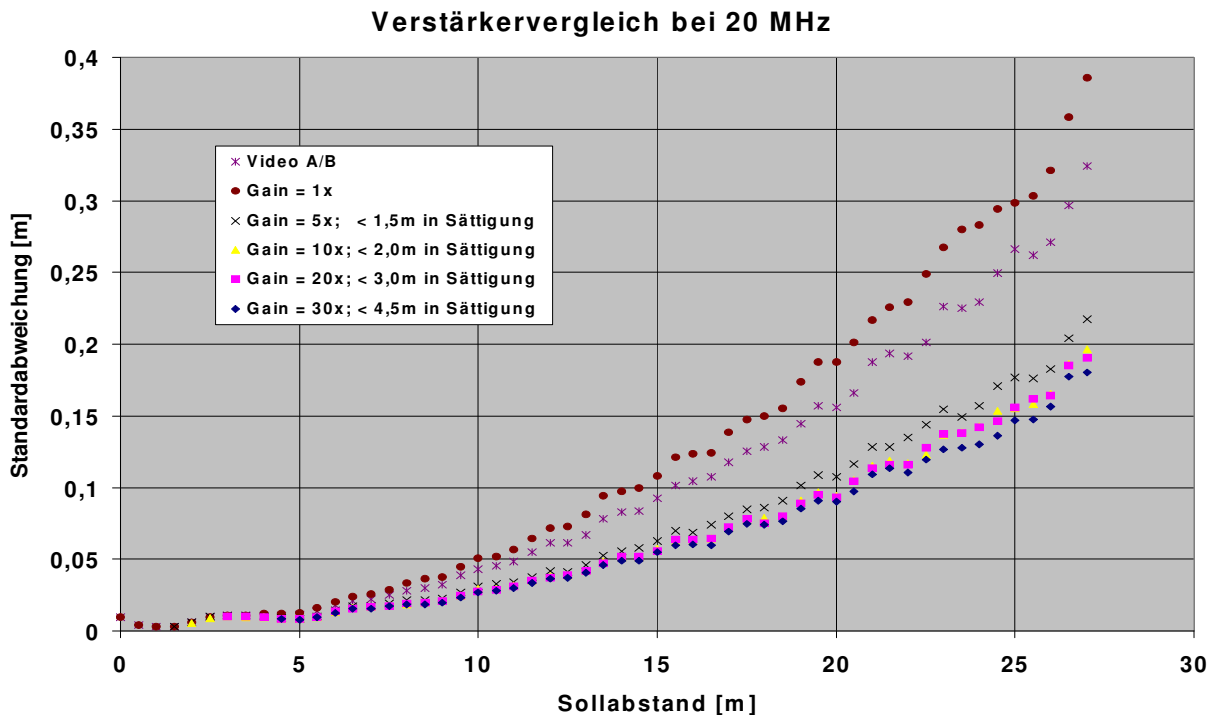


Abbildung 67: Vergleich der Ausgangskanäle (Verstärkungen) für die favorisierte Messfrequenz

Der direkte Vergleich der PMD-Ausgänge (VideoA/B) mit dem Verstärker (Verstärkung=1) zeigt dass der Verstärker eine zusätzliche Rauschquelle darstellt, wie nicht anders zu erwarten war. Dennoch werden die Ergebnisse bei einer Wahl höherer Verstärkungsfaktoren besser. Dies kommt daher, dass die Rauscheinflüsse der restlichen Systemtechnik bei höheren Verstärkungsfaktoren auf dem Chip eine immer untergeordnetere Rolle spielen. Bei der Wahl des Verstärkungsfaktors ist allerdings zu berücksichtigen, dass das System bei höheren Verstärkungen natürlich früher in Sättigung geht, was dann schon bei größeren Entfernungen geschieht. Diese Abhängigkeit ist in der Abbildung angegeben und fordert einen Kompromiss zwischen Dynamik und Empfindlichkeit. Sollte das System allerdings einen geringen Rauschbeitrag liefern, wäre der Gewinn durch die On-Chip-Verstärker entsprechend niedrig. Der eigentliche Vorteil liegt dann darin, dass sich in einer Serienfertigung bei Verwendung von Vorverstärkern auf dem Chip das System entsprechend einfacher und damit billiger gestalten lässt.

In realen Szenen treten Objekte mit unterschiedlicher Reflektanz auf. In weiteren Messreihen wurde deshalb die Funktion des Systems mit unterschiedlich reflektierenden Materialien getestet. Es wurde ein Reflektor verwendet sowie diffus reflektierende Tafeln (Lambert-Reflektoren) mit einer Albedo von 0,8, 0,06 und 0,01. Dies sind extreme Eigenschaften. In der normalen Umgebung treten Stoffe mit einer Albedo, die im Infraroten kleiner als 0,2 ist, nur sehr selten auf. Zu rechnen ist mit einer Albedo von ca. 0,2 bis 200 (für gerichtete Reflektion eines Reflektors). Dies entspricht einer Zieldynamik von etwa Faktor 1000. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen auf der Mess-Strecke:



**Messparameter:**

- kein Hintergrundlicht
- Integrationszeit = 1000 $\mu$ s
- PMD Z10 M3E
- Objektiv: f=12.5mm, F#1.3

- 1x4 Phasenmessung
- 20W opt. Peakleistung
- Target (BxH) 80x100cm
- 1000 Mittelungen pro Messung

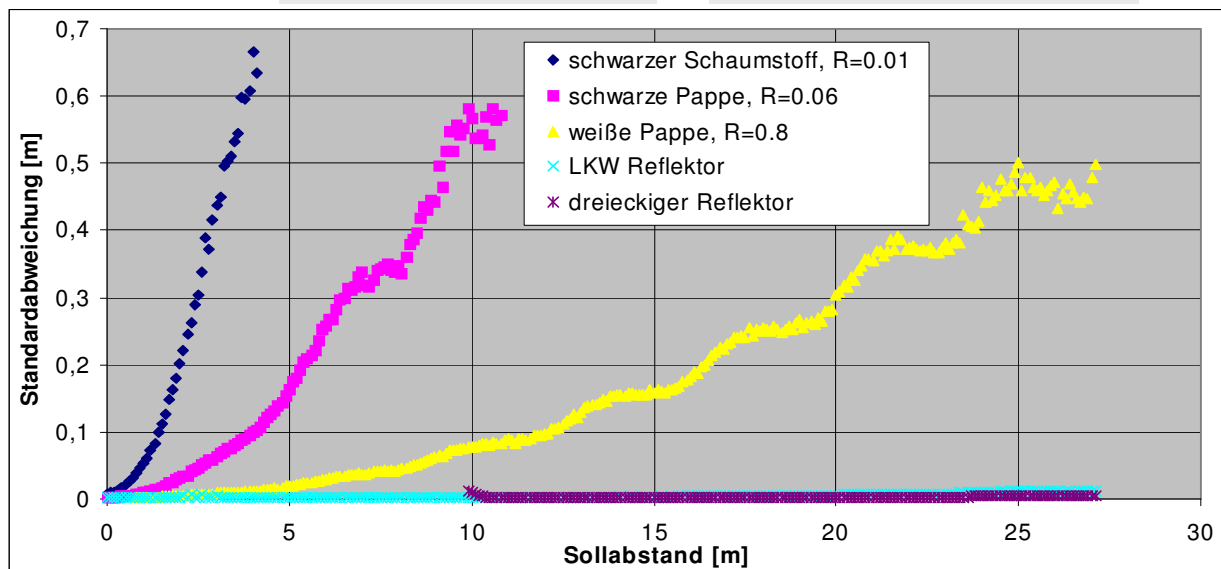


Abbildung 68: Reichweite auf unterschiedliche Ziele

Das System war in der Lage auch die besten Absorber noch zu detektieren. Aus obigem Diagramm kann die Reichweite auf beliebige Materialien berechnet werden. Trägt man denselben Fehler, d.h. dieselben Messwerte, gegen einen gemeinsamen Parameter an, z.B. die Amplitude der Phasenbilder, so erhält man eine vom Material unabhängige, übereinstimmende Funktion:

**Messparameter:**

- kein Hintergrundlicht
- Integrationszeit = 1000 $\mu$ s
- PMD Z10 M3E
- Objektiv: f=12.5mm, F#1.3

- 1x4 Phasenmessung
- 20W opt. Peakleistung
- Target (BxH) 80x100cm
- 1000 Mittelungen pro Messung

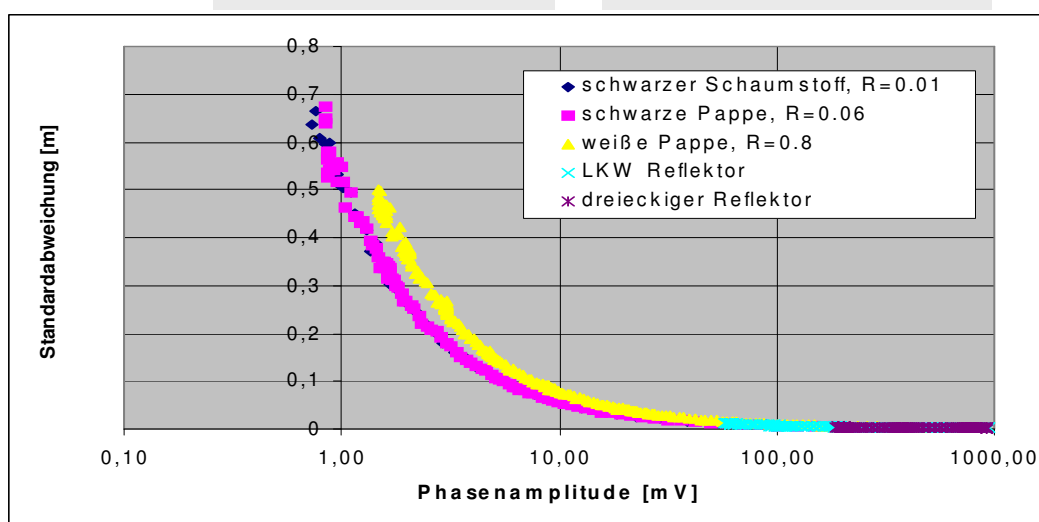
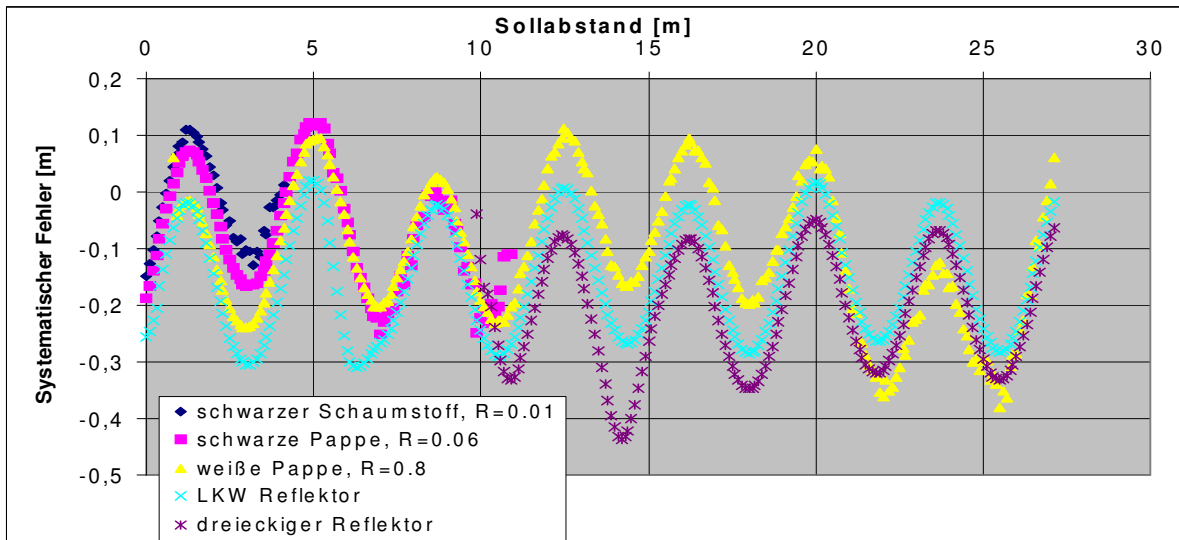


Abbildung 69: Vergleich der Rohdaten bei unterschiedlichen Zielen liefert gute Übereinstimmung

Neben den statistischen Fehlern ist es wichtig den absoluten Fehler zu kennen. Dazu musste der systematische Fehler erfasst werden. Er konnte aus den durchgeführten Messreihen ermittelt werden:

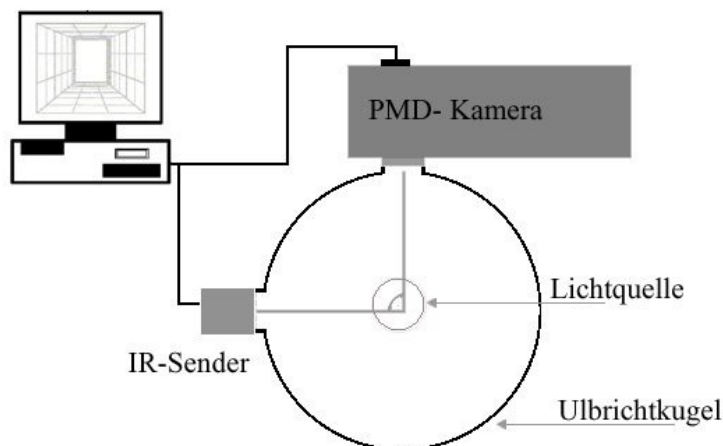
<b>Messparameter:</b>	- kein Hintergrundlicht - Integrationszeit = 1000 $\mu$ s - PMD Z10 M3E - Objektiv: f=12.5mm, F#1.3	- 1x4 Phasenmessung - 20W opt. Peakleistung - Target (BxH) 80x100cm - 1000 Mittelungen pro Messung
-----------------------	--	---



**Abbildung 70: Darstellung des systematischen Fehlers**

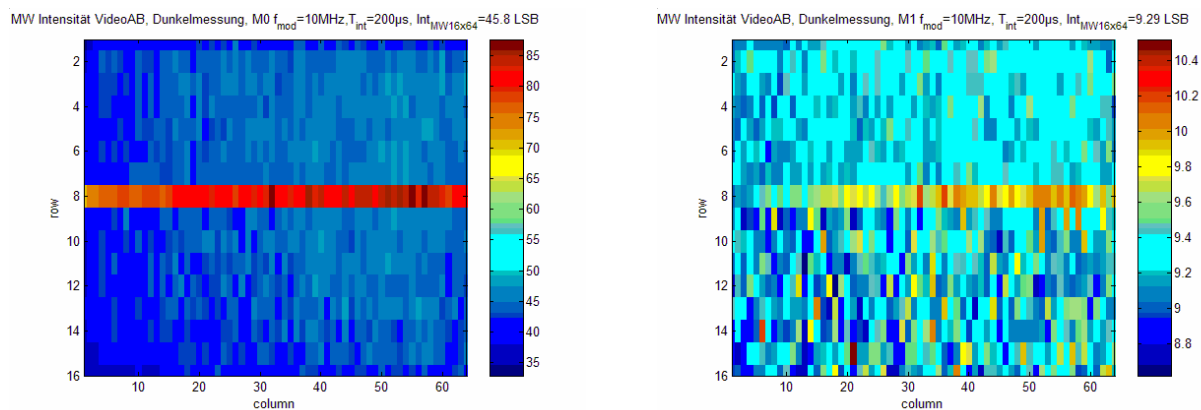
In den periodischen Abweichungen erkennt man ein für Phasenmessungen typischerweise auftretendes Verhalten. In diesem Fall wird es verursacht durch die Abtastung der Korrelationsfunktion mit einer endlichen Anzahl von vier Phasenlagen. Daraus ergab sich auch die Bezeichnung Vierphasenmessung für das angewandte Messprinzip. Das reproduzierbar periodische Verhalten ermöglichte eine entsprechende Korrektur in der Rohdatenverarbeitung.

Die wichtigsten Einflussfaktoren auf die Messgenauigkeit sind die Signalstärke und das aufgefangene Fremdlicht. Neben den Messungen auf der Distanzmessstrecke wurden daher Messungen mit folgendem Laboraufbau [Schmie05] durchgeführt. In die Ulbrichtkugel konnte eine definierte Menge von Signal und Fremdlicht eingeleitet werden. Damit konnten alle wesentlichen Parameter - Signal, Fremdlicht und Phase - unabhängig voneinander eingestellt werden, um ihren Einfluss zu vermessen. Jedes Pixel der Kamera erhielt dadurch dasselbe Signal. Damit konnte gleichzeitig eine Statistik über die Pixel der PMD-Matrix aufgenommen werden.



**Abbildung 71: Laboraufbau zur Charakterisierung des Sensorsystems**

Um die Auswertung der Kamera optimal auf den Rauschpegel einzustellen, wurde der Rauschpegel zeitlich und räumlich statistisch vermessen. Dabei wurden Signalstärke und Fremdlicht unabhängig variiert. Der räumliche Vergleich über die Pixel lieferte gleichzeitig Informationen über das FPN-Rauschen des Sensors. Begonnen wurde ohne Signal und Hintergrundlicht. Zum Vergleich werden die Aufnahmen aus der ersten und der zweiten Vierphasenmessung dargestellt, die innerhalb eines Messzyklus von 25ms aufgenommen werden.



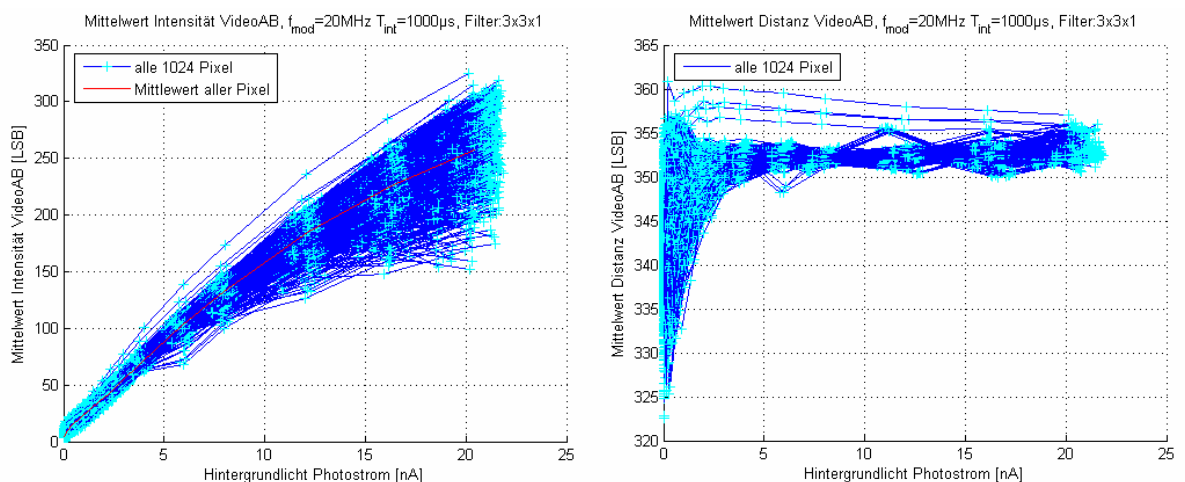
**Abbildung 72: Ergebnis von Dunkelmessungen (ohne Sender und Hintergrundlicht)**

Dabei fällt zuerst eine Pixelzeile in der Mitte des Sensors auf. Sie zeigt ein Verhalten, das grundsätzlich vom Rest der Matrix abweicht. Die Pixelzeile ist kein Totalausfall, macht aber eine einheitliche Auswertung der kompletten Matrix nahezu unmöglich. Weitere Tests mit anderen Chips ergaben, dass ca. 40% der Chips von derartigen Anomalien betroffen waren. Ob es auf ein Designproblem oder ein Prozessproblem zurückzuführen war, konnte nicht mehr geklärt werden. Für das Projekt wurden die Chips entsprechend selektiert.

Betrachtet man die Amplituden der Pixel, erkennt man einen signifikanten Unterschied zwischen der ersten und der zweiten Messung im Zyklus. Ein zeitlicher Vergleich aller Phasenbilder zeigte ein Einschwingverhalten des Systems. Dies führte dazu, dass das Rauschen zu Beginn der Messung deutlich höher lag als im weiteren Verlauf. Aus diesem Grunde wurde eine sogenannte „Vormessung“ eingeführt. Diese Vormessung verfolgte mehrere Ziele. Das System sollte einschwingen, um das Rauschen zu reduzieren. Gleichzeitig konnte in dieser Zeit das Fremdlicht gemessen werden, um bei der eigentlichen Messung den dadurch bedingten Rauschpegel besser abzuschätzen. Ziel war auch noch, schwache Signale gegenüber dem Rauschpegel zu identifizieren.

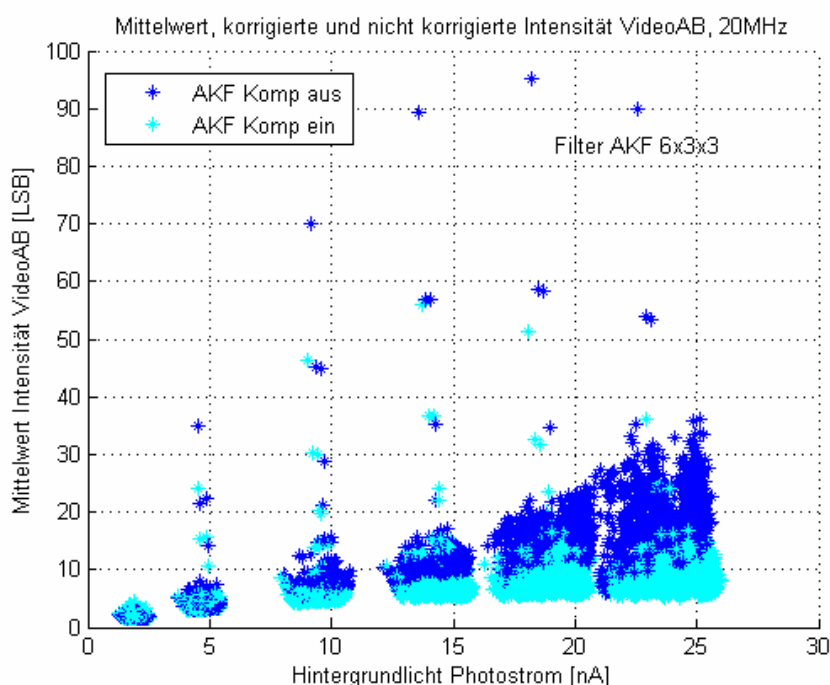
Dass sich der Rauschpegel mit dem Pegel des Hintergrundlichtes erhöhen würde, war erwartet worden[Huss]. Wichtigstes Ergebnis im Verlaufe der Messungen war, dass auch eine Differenzspannung gemessen wurde, die mit dem Hintergrundlicht anstieg. Mehr noch, die Differenzspannung zeigte völlig überraschend auch eine Korrelation mit der Modulation, ebenso wie ein Zielobjekt. Das bedeutet in anderen Worten, das Fremdlicht generiert ein Scheinziel, dessen Stärke mit dem Fremdlicht zunimmt. Dies zeigen die Messungen in folgender Abbildung: Mit der Zunahme des Fremdlichts steigen die Differenzspannungen und die Auswertung der Entfernung ergibt ein Ziel bei einer festen reproduzierbaren Distanz. Dabei nimmt die scheinbare Genauigkeit der Scheinmessung mit dem Fremdlicht deutlich zu, d.h. die statistische Streuung nimmt stark ab.

**Abbildung 73: Amplitude und Streuung der Messwerte mit zunehmendem Fremdlicht**



Bei dem von uns verwendeten Phasenmessverfahren kann man unterschiedliche Ziele nicht trennen. Man erhält vielmehr eine amplitudengewichtete Mischphase, ein Objekt, das sich aus der Vektorsumme der einzelnen Phasenvektoren der Einzelziele ergibt. Damit würde die Verlässlichkeit der Messwerte mit zunehmendem Fremdlicht stark eingeschränkt. Die Interpretation des Effektes fiel schwer. Nach Diskussion mit den Projektpartnern, insbesondere der S-TEC, sind nach der derzeit aktuellen Meinung Unsymmetrien in der Modulationserzeugung durch das FPGA dafür verantwortlich. Da FPGAs im Allgemeinen nicht dafür produziert werden, derart laufezeitstabil zu arbeiten, wie dies von der vorliegenden Anwendung gefordert wird, ist ein derartiger Effekt bei allen ähnlich aufgebauten Systemen zu erwarten. In jedem Fall existiert zukünftig im FPGA und seiner Systemumgebung ein wichtiges Optimierungspotential auf Hardwareseite. Zu prüfen sind insbesondere die Steuerung der Treiberströme des FPGA, die Belastung der Treiber durch die Systemumgebung, die relative Phasenlage der Abtastung der Korrelationsfunktion sowie die interne und externe Leitungsführung in und um das FPGA. Grundsätzliche Abhilfe böte ein anderes Auswerteverfahren mit Referenzmessungen, das allerdings die Messzeit dramatisch verlängern würde.

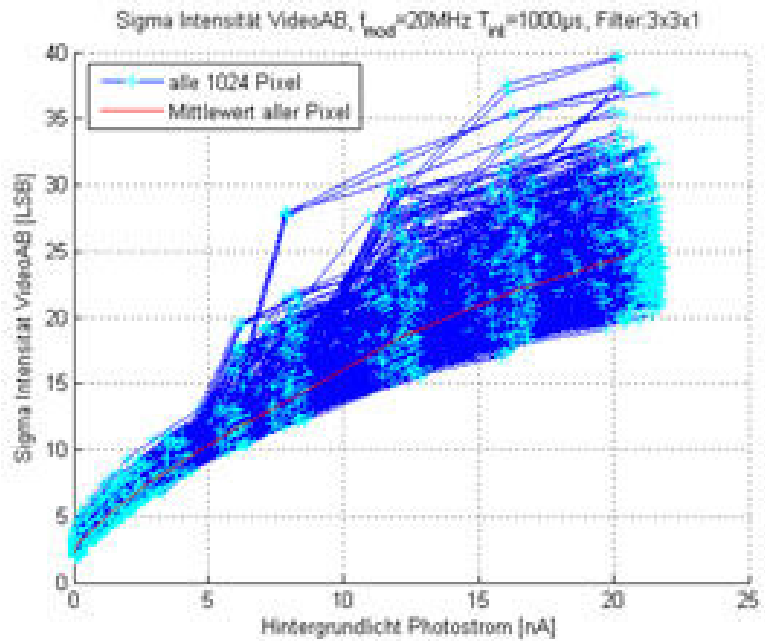
Aus diesem Grunde wurde ein Verfahren entwickelt, um dieses Scheinziel bestmöglich zu „entfernen“. Dazu diente die Vormessung. Das Fremdlicht wurde während der („Vor-“)Integrationsphase gemessen. Aus den Daten der Systemcharakterisierung konnte die zu erwartende Amplitude des Scheinziels, d.h. die zugehörige Amplitude der Korrelationsfunktion, abgeschätzt und von den eigentlichen Messwerten subtrahiert werden. Das folgende Bild zeigt das Resultat des Algorithmus'. Die Amplitude und damit der Einfluss des Scheinziels konnte deutlich reduziert, allerdings nicht komplett korrigiert werden. Messungen sind damit auch bei starkem Umgebungslicht möglich. Allerdings kann der Effekt immer noch eine Verschiebung der realen Objekte um einige Zentimeter bewirken.



**Abbildung 74: Vergleich der korrigierten und nicht korrigierten Amplituden bei steigendem Fremdlicht**

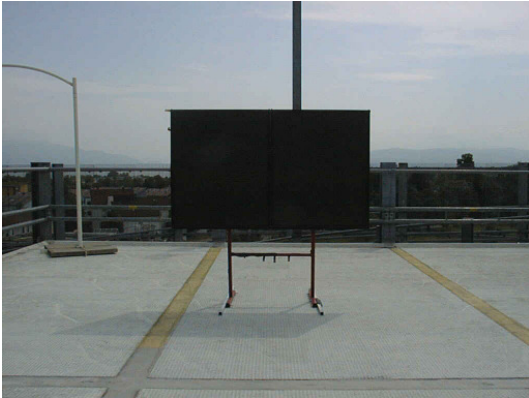
Die weitere Auswertung ergab, dass mit Einsetzen der SBI eine deutliche Zunahme der Streuung einsetzte, siehe dazu folgende Abb.:

**Abbildung 75: Anstieg der Amplituden mit starkem Fremdlicht bei Einsetzen der Fremdlichtunterdrückung (SBI-Schaltung)**



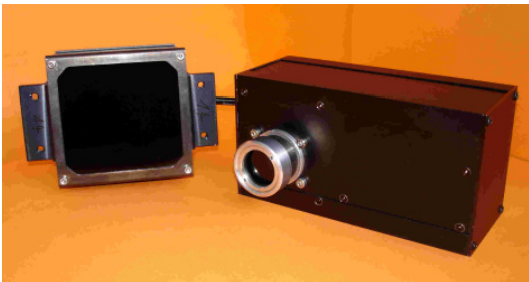
Zur Ermittlung der Rauschgrenze wurde aus den Messwerten eine Näherungsfunktion bestimmt. Mit Hilfe der Vormessung wurde der Photostrom pixelindividuell erfasst und anschließend mit Hilfe der Näherungsfunktion der Rauschpegel für jedes Pixel abgeschätzt.

Abschließend wurden Messungen in realer Umgebung durchgeführt. Benutzt wurde eine Kamera mit einem Objektiv der F-Zahl 0,7. Das Zielobjekt war eine Tafel mit einer Seitenlänge von 1 x 1,6 m, dem typischen Fahrzeugquerschnitt und einer Reflektivität, (20%) die einem verschmutzten Fahrzeug entspricht. Der Sender lieferte die spezifizierten 20W Pulsleistung.



**Abbildung 76: Referenz-Tafel**

Entspricht einem verschmutzten Fahrzeug



**Abbildung 77: Desktop-System, Kamera + ein Sender**

Mit diesem System konnte bei Sonnenbeleuchtung eine Reichweite von knapp 40m erzielt werden.



**Abbildung 78: Fahrzeug-Demonstrationssystem**

Desktop-System und System im Fahrzeug sind vergleichbar. Bei Verwendung von 2 Sendern im Fahrzeug wird allerdings die Hälfte der Energie von der Windschutzscheibe reflektiert. Damit steht beiden Systemen etwa dasselbe Signal zur Verfügung. Da die Windschutzscheibe auch 50% des Fremdlichts reflektiert, sollte das Fahrzeug leichte Vorteile zeigen. Mit dem Fahrzeug konnte die Reichweite von 40m bestätigt werden.

Die bei der Charakterisierung des Kamerasystems erfassten Eigenschaften werden in folgender Tabelle zusammengefasst:

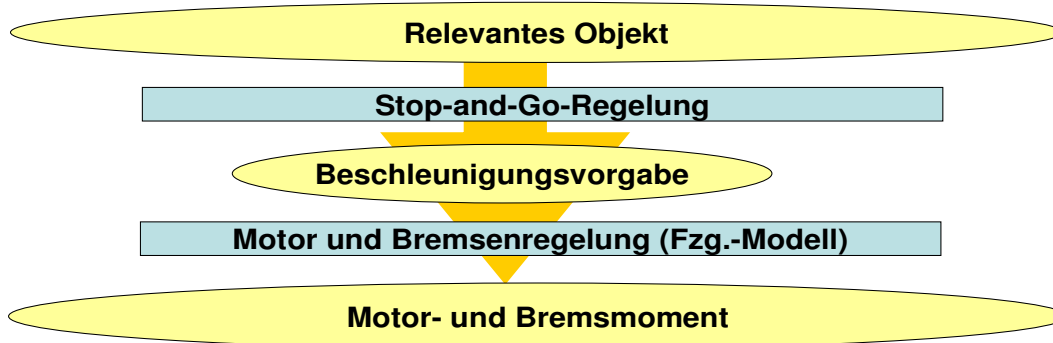
**Tabelle 27: Technische Daten der PMD-Kamera:**

Parameter	Wert	Bemerkung
PMD-Chip	Z12_M1_ME1	3. Waferun in 3D-SIAM
PMD-Pixelanzahl (hor. x vert.)	64 x 16	ca. 0.8° x 1.1° pro Pixel
Pixel-Pitch (hor. x vert.)	155µm x 210.8µm	Sensorgroße: 9.94mm x 3.37mm
PMD Modulationskontrast	27%	(VidA-VidB) / (VidA+VidB)
Füllfaktor	22%	
Brennweite Objektiv	9.85 mm	F-Zahl: 0.7
Optische Filter	RG830 + KP907	Kombination Lang-/ Kurzpass
Öffnungswinkel (hor. x vert.)	53° x 18°	Vollwinkel
Optische Pulsleistung pro Sender	20 W	@ 870nm, spek.Bandbreite: 40nm
Zykluszeit	25ms, 40Hz	eindeutige Entfernungsbilder
Integrationszeit pro Phasenmessung	1ms	
Algorithmus Entfernungsberechnung	3x 4-Phasenmessung	
Auflösung Entfernungsmehrdeutigkeit	3-Frequenz-Verfahren	20MHz (7.5m), 4MHz (37.5m), 0.8MHz (187.5m)
Eindeutiger Entfernungsmessbereich	187.5m	
Signal Photostrom	2pA ... 20nA	SW-Filter: 3x3x6 Pixel, 1000µs Integrationszeit
gesamter Photostrom (Fremdlicht + Signal)	< 30nA	
Signaldynamik	80dB	20 x log(50000 LSB/ 5 LSB) = 20 x log(20nA/ 2pA)
Entfernungsmessgenauigkeit (statistisch) (= ±σ = Standardabweichung)	±0.0015m	„Best Case“ (Amp. = 50000 LSB)
Entfernungsmessgenauigkeit (statistisch) (bedeckter Himmel)	±0.03m ±0.1m	„LKW-Reflektor“ in 70m „worst case“ Target (R=20%) in 40m
Max. Reichweite auf „worst case“-Target (Reflektion = 20%)	40m 42m	@7nA Fremdlicht @2nA Fremdlicht



### 2.1.3.4 AP 1.6 Systemintegration Stop&Go

Die eigentliche Stop&Go-Regelung schließt sich an die Detektion eines relevanten Objektes an. Die erste Stufe ist die Vorgabe einer idealen Wunschbeschleunigung, die aus den Bewegungsdaten des relevanten Objekts und des eigenen Fahrzeugs ermittelt wird (Stop&Go-Regelung). Daraus wird mit Hilfe des Fahrzeugmodells berechnet, wie Bremsen und Motor gesteuert werden müssen, um den Beschleunigungswunsch möglichst umzusetzen.



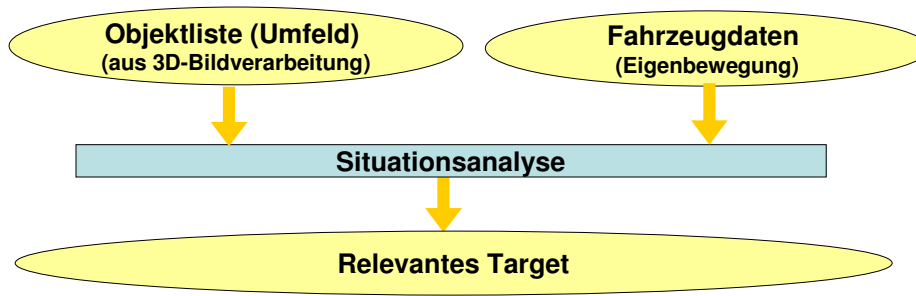
**Abbildung 79: S&G-Regelung**

Im Laufe von 3D-SIAM wurden zur Sicherheit zwei Stop&Go-Regler entwickelt und integriert. Ein von DaimlerChrysler und der FH Trier entwickelter S&G-Regler sollte prüfen, inwieweit es möglich ist, Kraftstoff einzusparen. Dieser Regler wurde auf der MicroAutoBox integriert. Die A.D.C. entwickelte einen S&G-Regler, der auf Fahrkomfort optimiert wurde. Dieser Regler wurde in die ECU des Fahrzeugs integriert. Die Auswahl des Reglers konnte über eine Bedieneinheit in der Mittelkonsole vorgenommen werden. Diese Bedieneinheit enthält einen Controller, der von der A.D.C. programmiert wurde, um mit dem Fahrzeug über CAN zu kommunizieren.

Für das Verhalten des S&G-Systems spielt neben der reinen Regelung vor allem die Situationsanalyse eine große Rolle[Frey04], [Rep04]. Die Auswahl des relevanten Objekts, dem das Fahrzeug folgt, aus der Liste aller, von der 3D-Bildverarbeitung gelieferten Objekte, hat maßgeblichen Einfluss auf die Eigenschaften des S&G-Systems.

#### **Die Situationsanalyse:**

In diesem Arbeitspaket wurde von der A.D.C. ein Verfahren zur Interpretation der Verkehrssituation[Scher05] entwickelt. Das Ergebnis dieser Interpretation ist die Eingangsgröße für einen Stop&Go-Regler. In zahlreichen Testfahrten wurde gezeigt, dass das entwickelte Verfahren in der Lage ist, die relevanten Verkehrssituationen richtig und schnell zu analysieren. Wesentlich für die Verlässlichkeit der Situationsanalyse ist die Qualität der Sensordaten. Die Sensorik besteht in unserem Fall aus der Umfelderkennung und der Fahrzeugsensorik.



**Abbildung 80:**  
**Datenfluss in der**  
**Situationsanalyse**

Für eine verlässliche Interpretation der Verkehrssituation spielt die Qualität der Umfelddaten eine herausragende Rolle. Die PMD-Kamera liefert Entfernungsdaten mit einer unerreicht hohen lateralen Auflösung, verglichen mit anderen Sensortechnologien. Dies ermöglicht bereits eine erste Grobklassifikation der Objekte und eine feine Unterscheidung verschiedener Objekte. Je nach Reflektivität und Größe der Ziele variiert die Reichweite zwischen 40m auf das sogenannte „Worst-Case-Target“ und über 150m auf große und gut reflektierende Objekte wie z.B. LKWs und Autobahnschilderbrücken. Dies ist für die im Projekt angestrebten Applikationen ausreichend.

Um die Verkehrssituation richtig interpretieren [Wie01] zu können, muss die derzeitige und zukünftige Fahrspur (Trajektorie), auf der sich das geregelte Fahrzeug bewegt, bekannt sein. Die auftretenden Objekte müssen hinsichtlich ihrer Lage zur Fahrspur beurteilt werden. Nur wenn sich ein Objekt, oder ein nennenswerter Teil davon, in der prädierten Fahrspur befindet, ist es relevant. Da der Fahrer die Fahrspur bestimmt, kann sie dem System prinzipiell nicht exakt bekannt sein. Sie kann lediglich vorausgeschätzt werden. Sie wird, auf Grundlage einer Hypothese, aus den Werten der Inertialsensorik des Fahrzeugs berechnet. Eine solche Hypothese birgt immer ein Restrisiko. Dieses Restrisiko kann z.B. durch eine virtuelle Einengung des Fahrschlauches, d.h. des vom Fahrzeug durchfahrenen Raumes, abgebildet werden [Win04]. Sind die Objekte mit ihren Trajektorien und die Fahrspur des geregelten Fahrzeugs bekannt, ermittelt die Situationsanalyse daraus ein relevantes Objekt [Hol04], auf das der Stop&Go Regler dann reagieren muss.

Die Situationsanalyse reagiert derzeit nicht auf entgegenkommende Objekte und nur in Ausnahmefällen auf bereits stehende Objekte, wie sie z.B. auch ein Stauende darstellt. Die Reaktion auf stehende Objekte stellt ein technisches und prinzipielles Problem dar. Es gibt im normalen Verkehrsraum sehr viele stehende Objekte wie z.B. Büsche, Mauern, Masten, parkende Fahrzeuge, und nur wenige bewegte, z.B. fahrende Kfz und Fahrräder. Durch die Berücksichtigung stehender Objekte ist die Situationsanalyse mit einer riesigen Anzahl von Objekten konfrontiert, die richtig beurteilt werden müssen. Eine vollautomatische Funktion mit stehenden Objekten wird damit wahrscheinlich die Anzahl von Fehlreaktionen deutlich erhöhen. Um dennoch, auch bei stehenden Objekten wie Stauenden, ein vom System geregeltes Anhalten zu gewährleisten, wird dem Fahrer ein Kompromiss angeboten. Er kann die automatische Reaktion auf stehende Objekte von Fall zu Fall freigeben. Hat ein stehendes Objekt, z.B. das letzte Fahrzeug eines Staus, sich bereits bewegt und wurde dies vom Sensor registriert, ist ein Freischalten nicht mehr erforderlich.

Auch wenn alle Daten aus der Umwelt vollständig und richtig erfasst werden, ist eine optimal auf den Fahrer abgestimmte Operation der Situationsanalyse nicht immer möglich. Durch die Trennung von

Planung (Fahrer) und Steuerung(System) ist es für die Situationsanalyse prinzipiell nicht möglich zu erkennen, ob der Fahrer einem erkannten Hindernis auszuweichen plant oder nicht. Der Abstand den das System benötigt, um vor dem Hindernis anzuhalten, ist länger als der Abstand, den der Fahrer benötigt, um es zu umfahren. Die Entscheidung auszuweichen kann also später stattfinden, als der Entschluss zu bremsen. Aus diesem Grund kann das System auch bei idealen Voraussetzungen aus Sicherheitsgründen gelegentlich unkomfortabel reagieren. Ziel muss es daher sein, einen für den Fahrer akzeptablen Kompromiss zu finden.

Die wichtigsten Aufgaben der Situationsanalyse werden in folgender Tabelle zusammengefasst.

Vorausschätzung der Fahrspur
Zuordnung der Objekte zur geschätzten Fahrspur
Ermittlung der notwendigen Objekteigenschaften: Abstand, Geschwindigkeit, Laterale Geschwindigkeit
Verfolgung der Objekthistorie zur Beurteilung der Verlässlichkeit der Objektinformationen
Überbrückung kurzer Datenausfälle, z.B. durch Sensorperformance oder Umweltbedingungen wie z.B. Abdeckungen in Kurven o.ä.
Klassifikation der Objekte, z.B. nach Geschwindigkeit, Historie etc.
Optional: Erkennung typischer Verkehrssituationen
Auswahl des relevanten Objekts
Ausgabe des relevanten Objekts und seiner Eigenschaften (z.B. Geschwindigkeit) auf den CAN

**Tabelle 28: Aufgaben der Situationsanalyse**

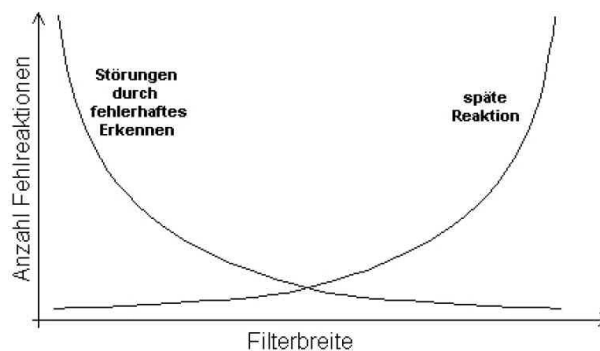
Das Erkennen von typischen Verkehrssituationen, z.B. Ein- oder Ausschersituationen, abbiegenden Fahrzeugen u.v.m., würde eine viel angepasstere Reaktion ermöglichen, d.h. ein schnelleres und sichereres Verhalten des Systems. Innerhalb des Projekts konnten bereits einfache Situationen häufig erkannt werden. Dies dürfte in Zukunft wahrscheinlich ein Einsatzgebiet neuronaler Netze werden.

Die typischen Aktionen [Naab04] der Situationsanalyse, bedingt durch die auftretenden Verkehrssituationen, beschreibt folgende einfache Tabelle:

Situation	Aktion
Befindet sich im Verkehrsraum vor mir ein Fahrzeug	Objekt erkennen (Fahrzeug), Abstand ermitteln
das in meiner Spur	Spur erkennen bzw. voraussagen
steht, langsamer oder gleich schnell in meiner Richtung fährt	Geschwindigkeit der Objekte ermitteln
wird es auch dort bleiben	laterale Geschwindigkeit bzw. Spurwechsel ermitteln
den momentanen Geschwindigkeitszustand beibehalten	Beschleunigung bzw. Bremslichter erkennen
dann passe die eigene Geschwindigkeit (max. 30km/h) der des Vorfahrenden an	Eigengeschwindigkeit ermitteln und beeinflussen
bleibe hinter ihm stehen bis dieser wieder anfährt	Erkennen des Wieder-Anfahrens, die Möglichkeit bis in den Stillstand zu bremsen, automatisch oder auf Fahrerwunsch anfahren
wenn dies noch ohne Fahrereingriff möglich ist	kritische Situationen erkennen (Precrash-Thematik)
halte einen vernünftigen Abstand	Abstandswunsch des Fahrers
ansonsten warne den Fahrer	haptisch oder akustische Warnung

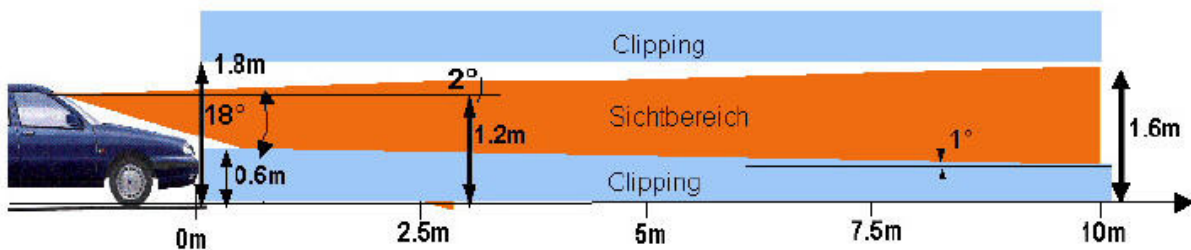
**Tabelle 29: typische Aktionen der Situationsanalyse**

Bei der Reaktionszeit auf Objekte musste ein Kompromiss gefunden werden zwischen einer verlässlichen Reaktion durch Voraussetzung einer langen Objekthistorie und einem hinreichend kurzen Bremsweg.



**Abbildung 81: Darstellung der Fehlreaktionswahrscheinlichkeit mit der Reaktionszeit**

Thematisch wären zwei weitere Probleme bei der Situationsanalyse anzuordnen, die Erkennung der Straße und die Bestimmung des Nickwinkels. Beim derzeitigen Stand der Protokolle des Datentransfers kann die Situationsanalyse dies nicht leisten, da ihr die Informationen nicht zur Verfügung gestellt werden. Die Erkennung der Straße ist notwendig, da sie vom Sensor erkannt wird. Ohne weitere Verarbeitung würde die Bildverarbeitung aus ihr ein Objekt produzieren, das scheinbar vor dem Fahrzeug herfährt. Das Fahrzeug würde sofort anhalten. Aus diesem Grund wurden alle Objekte unterhalb einer definierten Ebene abgeschnitten und damit die Straße beseitigt. Leider verliert man dabei auch kleine Objekte, die mitabgeschnitten werden. Ziel muss es zukünftig sein, die Straße zu erkennen, damit gleichzeitig den Nickwinkel zu bestimmen und sie dann wesentlich präziser zu entfernen. Dadurch könnten auch sehr kleine Objekte auf der Straße, z.B. Randsteine, noch erkannt werden. Derzeit findet das Entfernen der Straße bereits im 3D-Bildverarbeitungsmodul statt. Unter Benutzung des Umweltkoordinatensystems werden tief und hoch liegende Bereiche abgeschnitten („clipping“):



**Abbildung 82: Begrenzung des relevanten Bereiches zur Beseitigung von Straße oder Brücken**

Im Laufe der Erprobung stellte sich ein Problem der Objektinformationen heraus. Beim Umgang mit sehr großen ausgedehnten Objekten ist die Information über den Schwerpunkt und seinen Ort nicht mehr ausreichend. Hier muss zukünftig ein angepasster Datensatz entwickelt werden, der alle notwendigen Informationen enthält. Die Ausdehnung von Objekten ist eine wichtige Information, um z.B. in sicherheitskritischen Situationen einen Fluchtkorridor zu ermitteln.

Ein Interaktionsschema der Situationsanalyse mit verbundenen Softwaremodulen zeigt folgende Abbildung:

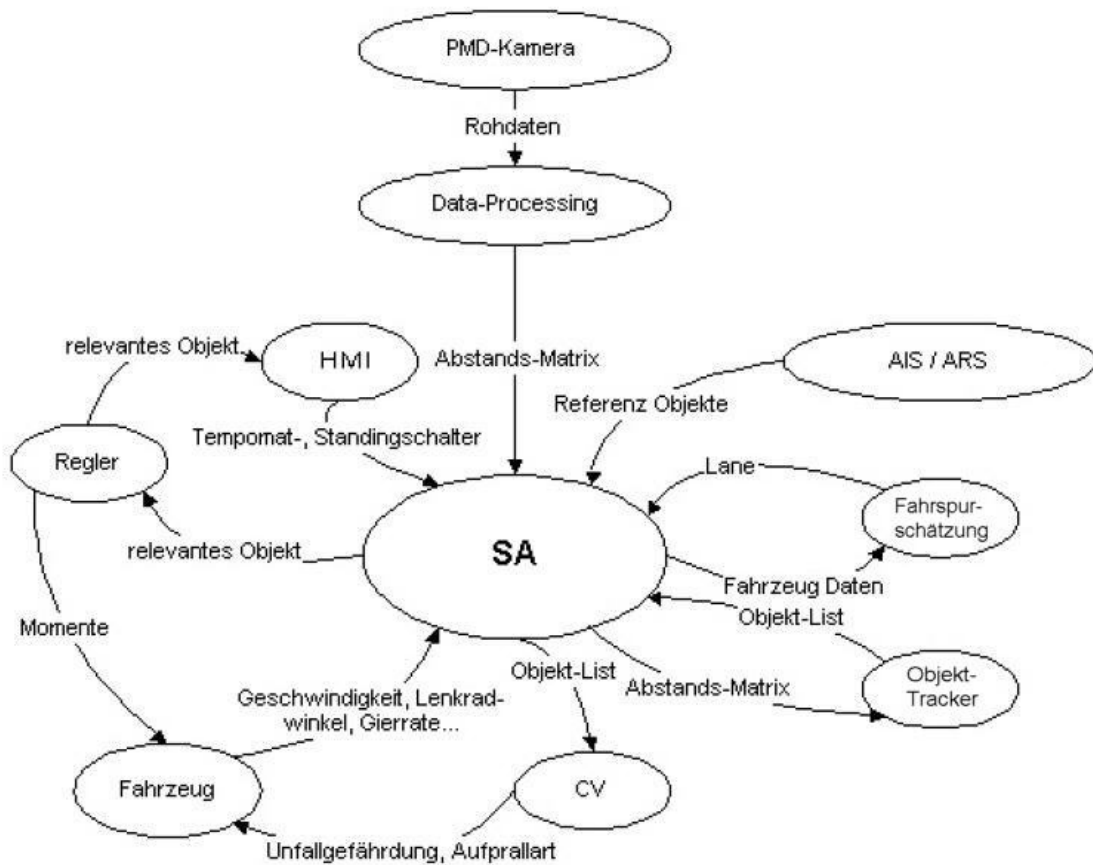


Abbildung 83: Zustandsdiagramm der Situationsanalyse

## 2.1.4 Teilprojekt 3: PMD-Chip

### 2.1.4.1 AP 3.4 3D-Sensorspezifikation

Die Sensorspezifikation wurde während des Projekts überarbeitet und den Gegebenheiten und Resultaten des Projektfortschritts angepasst. Die Spezifikation erfolgte in enger Abstimmung zwischen der Temic, der A.D.C., der S-TEC und ZMD. [JFrey04], [MiBa04], [Xu04], [ZyLa04]:

Parameter	Wert/ Beschreibung
Pixel pitch	155,3 (H) x 210,8 (V) $\mu\text{m}^2$
Auflösung	64 (H) x 16 (V)
Sensorgroße	9,94 (H) x 3,37 (V) $\text{mm}^2$
Fill Factor	22%
Effektive Integrationskapazität	600fF
Pixelelektronik	SBI & AIZS
Modulationskap. eines 16x16 Bereichs	300pF bis 400pF
gesamte Modulationskapazität	1200pF bis 1600pF
Digitale Eingänge	3.3V
Digitale Ausgänge	5V
Analoge Ausgänge	vdiff v1: Differenzsignal mit Verstärkung von 1 vdiff vx: Differenzsignal mit programmierbarer Verstärkung video tv: Zeitsignal mit Verstärkung ca. 0,64 video av: PMD Kanal A, nur Charakterisierung, Verst. 0,64 video bv: PMD Kanal B, nur Charakterisierung, Verst. 0,64
Programmierbare Verstärkung	digi2 digi1 --> vdiff vx 0 0 --> 5x 0 1 --> 10x 1 0 --> 20x 1 1 --> 30x

Tabelle 30: PMD-Chipspezifikation

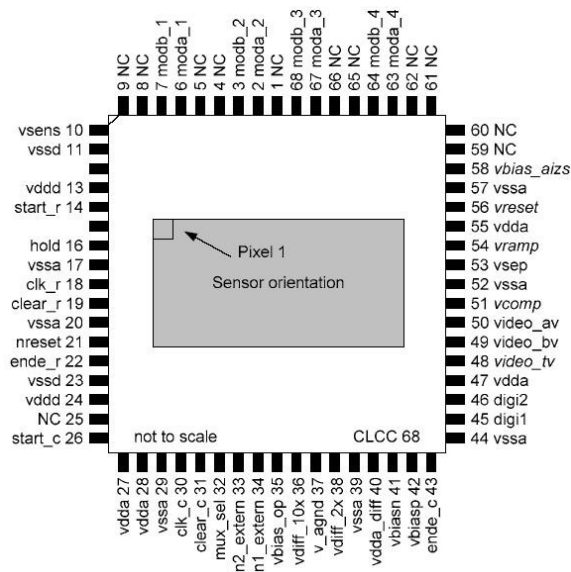


Abbildung 85: PMD-Gehäuse, Pinbelegung

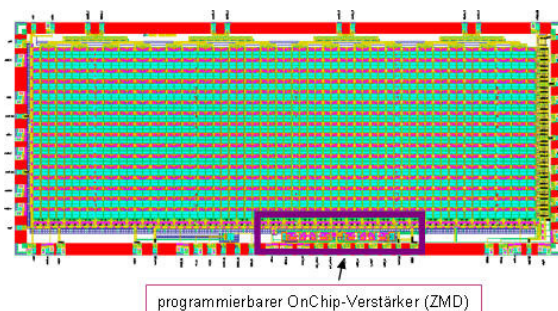


Abbildung 84: PMD-Chip

Tabelle 31: Spezifizierung der On-Chip-Verstärker

Anforderung	Realisierung
Differenzverstärkung auf Single-ended Ausgang: 1...40	Instrumentationsverstärker mit $v=1$ (fest) und $v=5,13,26,36$ einstellbar über 2 Bit (2 Pins)
Einschwingzeit bis max. 800ns	< 400ns typisch für $v=1,5,13,26$ , bei Corners der Technologie/Umgebung bis 800ns
Last nach Pad ca. 40pF	entworfen mit Lasten 20...60pF
Stromaufnahme: n.d.	Stromaufnahme derzeit ca. 15mA (ständig 2 Ausgangsstufen aktiv)
Gleichtaktunterdrückung: n.d.	44-60dB zw. 0,5 bis 4,5 V, typisch
Ausgangsrauschen: n.d.	<1mV für alle v, typisch

Die ZMD beteiligte sich im Rahmen der On-Chip-Verstärker Entwicklung, die von der ZMD ausgeführt wurde, an der PMD-Spezifizierung. Temic und A.D.C. brachten die Systemanforderungen ein und die S-TEC setzte die Spezifikation um.

#### 2.1.4.2 AP 3.8 PMD-Chipsteuerung

Die Ansteuerung des Chips [Schwa01] sollte hardwarenah durch einen programmierbaren Baustein erfolgen. Für die PMD-Kamera wurde das SPARTAN II FPGA von Xilinx verwendet. Dieses FPGA wird bereits bei vielen Anwendungen im Automobil genutzt, z.B. in Fahrerinformationssystemen wie der GPS-Navigation oder Fahrerassistenzsystemen. Aufgabe des FPGAs ist im Wesentlichen die Messablaufsteuerung, die Datenerfassung und die Kommunikation der Daten[Mur04] zum Messrechner.

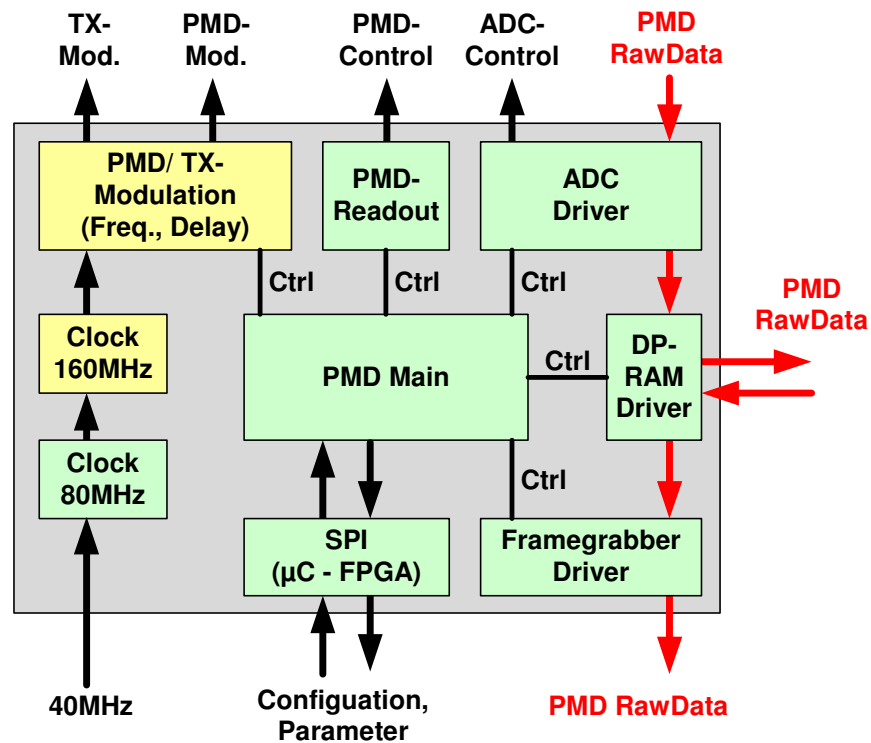


Abbildung 86: Struktur der SW-Module im FPGA

Zu diesem Zweck wurde aus einem externen Taktsignal von 40MHz erst einmal ein interner Takt von 160 MHz generiert. Dies genügt, um eine maximale Modulationsfrequenz von 20 MHz mit einer hinreichend feinen Auflösung durch einen Delay in der Phase verschieben zu können. Dies ist notwendig um mit derselben Auflösung die Korrelationsfunktion abtasten zu können. Die entsprechenden Modulationsfunktionen für den Chip und die Sender werden vom FPGA generiert. Eine weitere Aufgabe des FPGA ist den PMD-Chip auszulesen. Dazu liefert das FPGA sämtliche Steuersignale für das PMD. Außerdem kontrolliert es die externen Analog-Digital-Wandler, die sich auf dem Board befinden, zur



Wandlung der analogen Bilddaten des PMD. Diese Bilddaten, die einzelnen Phasenbilder, werden vom FPGA eingelesen und in einem externen Speicherbaustein zwischengespeichert. Gleichzeitig werden sie von einem anderen SW-Modul zur Versendung an eine Framegrabber-Schnittstelle aufbereitet. Ein zentrales Modul sorgt für die Steuerung aller angesprochenen Teilfunktionen. Über eine integrierte Kommunikationsschnittstelle (SPI) können Steuer-Parameter mit dem System, z.B. über den Controller, ausgetauscht werden. Für die Software-Entwicklung wurde die Xilinx ISE Umgebung genutzt. Die genannten Funktionen wurden simuliert und erfolgreich in der Kamera evaluiert.

### 2.1.5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Projektes wurden IR-Sender entwickelt, die mit 20W Pulsleistung und einem Tastverhältnis von ca. 16% erheblich mehr Leistung boten als alle vergleichbaren Produkte. Gleichzeitig konnte die Tauglichkeit der LED-Technologie für die Anwendung in einer PMD-Kamera erfolgreich demonstriert werden. Mit dem realisierten Konzept lässt sich ein Preis-Leistungsverhältnis erreichen, das im Automobil noch vermarktet werden kann. Es wurde eine Kamera entwickelt, die mit 40m Reichweite bei Verwendung von zwei Sendern unsere Wunschvorstellungen erfüllte. Die Kamera bot eine Auflösung von 64x16 Pixeln bei einem Beobachtungsfeld von 53°x18°. Eine Zykluszeit von 25ms und eine statistische Messgenauigkeit von +/-10cm bestätigten die Anwendbarkeit für die anvisierte S&G-Funktion.

Die Charakterisierung der Kamera deckte allerdings Effekte auf, die in die weitere Entwicklung einfließen müssen. So generiert Fremdlicht beispielsweise in Verbindung mit dem Hardwarekonzept (FPGA) der Kamera ein Scheinziel. Da für die Hardware keine kostengünstigen Alternativen existieren, muss dies bei zukünftigen Hardwarekonzepten und Algorithmen zur Datenauswertung berücksichtigt werden. Das Problem des Fremdlichts wurde noch verschärft durch ein extrem lichtstarkes Objektiv mit der F-Zahl 0,7. Gleichzeitig wurde damit allerdings das Signal dramatisch erhöht. Eine intelligente Rohdatenverarbeitung, insbesondere eine räumliche und zeitliche Filterung, hatte erheblichen Anteil an der Steigerung der Gesamtempfindlichkeit des Systems. Mit den Ergebnissen der Charakterisierung kann die Leistungsfähigkeit der PMD-Kamera in zukünftigen Applikationen abgeschätzt werden.

Sender und Kamera wurden zusammen mit den Softwarepaketen zur 3D-Bildverarbeitung von DaimlerChrysler, der Situationsanalyse und der S&G-Regelung von A.D.C, der Steuerung von Motor und Bremse von DaimlerChrysler, in einen Versuchsträger integriert. Wahlweise wurde auch ein S&G-Regler von DaimlerChrysler zur Erprobung des Kraftstoffeinsparpotentials integriert. Nach einer Optimierungsphase im Labor mit aufgezeichneten Fahrscenen und auf der Straße konnte das System erfolgreich demonstriert werden. Es können alle relevanten Ziele wie z.B. LKW, PKW, Motorradfahrer, Fahrradfahrer und Fußgänger detektiert werden. Auch die Straße konnte versuchsweise beobachtet und ihr Neigungswinkel, d.h. auch der Nickwinkel des Fahrzeugs, ermittelt werden. Eine Herausforderung war die Reaktion des Systems auf stehende Hindernisse, die situationsabhängig nach einer Fahrerbestätigung durch einen S&G-Knopf vom System übernommen werden konnte.

Auf der Basis der im Projekt gesammelten Erfahrungen sehen wir das Potential des PMD noch deutlich steigerungsfähig. Im Rahmen eines Serienprojektes könnten die Sender durch einen kundenspezifischen Aufbau der LED-Packages eine effizientere Szenenausleuchtung liefern. Mikrolinsen und ein

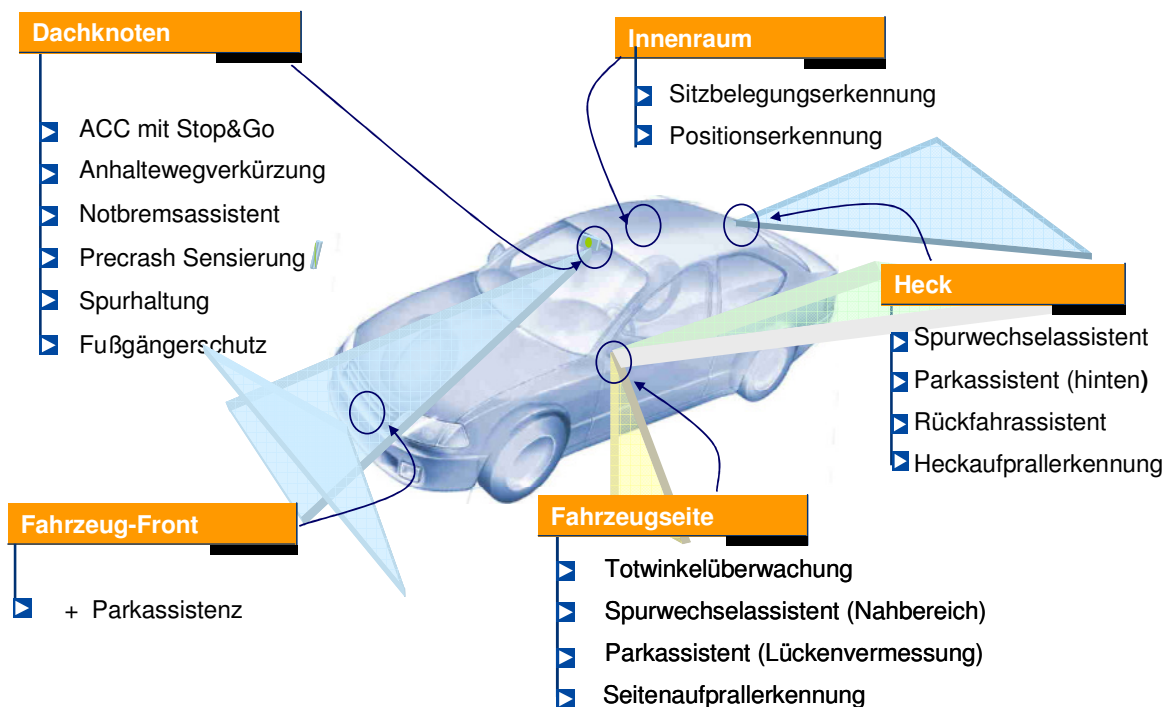
effizienterer Pixelaufbau (Modulationskontrast und Füllfaktor) könnten die Empfindlichkeit noch einmal deutlich steigern. Die Integration analoger Komponenten auf den Chip zum Aufbau eines rein digital ansteuerbaren PMD-Chips könnte den Rauschpegel reduzieren und damit die Empfindlichkeit weiter steigern. In diesem Zusammenhang könnten auch die On-Chip-Verstärker rausch-optimiert werden. Die Standardisierung des PMD in Form eines digitalen Chips hätte immense Vorteile für Anwendungen auf unterschiedlichen Gebieten. Die Charakterisierung würde standardisiert und die Systemtechnik deutlich vereinfacht. Mit dieser Vereinfachung der Systemtechnik ergäbe sich auch eine deutliche Verkürzung der Entwicklungszyklen. Auflösung, Brennweite und Lichtstärke des Objektivs sollten an die Applikation angepasst werden. Dies hat auch Einfluss auf die Reichweite. Zu guter Letzt sehen wir auch noch in der Systemtechnik ein Optimierungspotential, sowohl an der Hardware wie in der Software in den Auswerte- und Korrekturalgorithmen. Insgesamt sollte sich mit den genannten Schritten eine Reichweite von 100m erreichen lassen. Auch eine Verdopplung der Pixelanzahl (in einer Dimension) sollte machbar sein, um eine Auflösung zu erreichen, die von einigen Anwendungen mit Mustererkennung gefordert wird. Für eine Fußgängererkennung wäre dies beispielsweise enorm hilfreich. Der Bauraum ließe sich für eine Serienlösung extrem reduzieren. Abschätzungen zielen auf eine Baugröße von etwa 300cm<sup>3</sup>.

Für die Zukunft wäre eine Design- und Prozessoptimierung wünschenswert, um die Streuung der Pixeleigenschaften in der Matrix so klein wie möglich zu halten.

Das technische Potential des PMD bietet große Verwertungschancen in Komfort- und Sicherheitsfunktionen, im Außen- und Innenraum. Bei Weiterführung der Industrialisierung zusammen mit einem Kunden könnte die PMD-Technologie in ca. 5 Jahren für einen Einsatz im Automobil serienreif sein.

## 2.2 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Derzeit werden konzernweit alle Applikationen geprüft, die für eine PMD-Anwendung in Frage kommen. Die möglichen Einbauorte wurden in Zusammenarbeit mit den OEMs identifiziert. Dabei werden bestimmte Bereiche für den Einbau von Sensoren favorisiert. Bevorzugt werden der Dachknoten und der Frontbereich für vorwärtsgerichtete Sensorik, der Seitenspiegel für die Integration der seitlich gerichteten Sensoren, der Heckbereich für die Rückraumüberwachung und der Dachhimmel (meist der Bereich um den Dachknoten) für die Innenraumüberwachung.



**Abbildung 87: Mögliche Einsatzbereiche für eine PMD-Kamera im Fahrzeug**

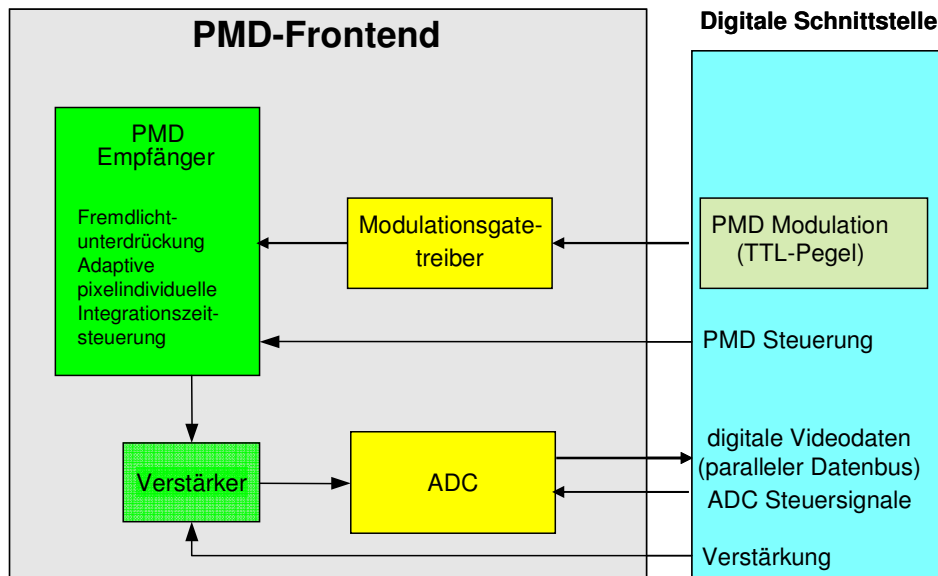
Das größte Potential an integrierbaren Funktionen weist die Fahrzeugfront auf. Durch die Kombination von Bild- und Entfernungsdaten kann das PMD sämtliche Funktionen unterstützen. Die Komfortfunktionen zur Längs- und Querführung des Fahrzeugs kommen ebenso in Betracht wie Sicherheitsfunktionen. Dabei ist es wahrscheinlich, dass insbesondere die Spurhaltung und der Bremsassistent schrittweise in mehreren Ausbaustufen umgesetzt werden. Hinzu kommt die Parkassistent, die allerdings an der Fahrzeugfront angebracht sein sollte, um eine vollständige Sicht ohne Abdeckung zu gewährleisten. Auf der Fahrzeugseite gehört vor allem die Totwinkelüberwachung zu den geprüften Themen, die Einparkassistent, z.B. in Form einer Parklückenvermessung, eine Beobachtung des sich von hinten nähernden Verkehrs zur Unterstützung bei Spurwechselvorgängen und die Erkennung eines Seitenaufpralles. Auch im Heckbereich ließen sich wichtige Funktionen mit einem PMD-System abbilden. Denkbar sind eine Heckaufprallerkennung, ein Rückfahrassistent, eine Parkhilfe und ein Spurwechsel-

assistent, der den rückwärtigen Verkehrsbereich etwas weiter überwachen müsste als vergleichsweise ein Totwinkelsensor. Neben den Außenraumthemen spielen vor allem für die passive Sicherheit die Innenraumthemen eine große Rolle, wie z.B. die Erkennung der Sitzbelegung oder der Position der Insassen. Bei den Sicherheitsthemen ist zu berücksichtigen, dass die Vermarktung stark von der Gesetzeslage abhängig ist. Das PMD gewinnt Vorteile, in dem Maße, wie die Ansprüche an die Sicherheit steigen. Auch im Innenraum werden Komfortthemen wie Einklemmschutz oder Diebstahlschutz weiter verfolgt.

Dies sind im Wesentlichen alle Funktionen, die sich mit einem PMD realisieren ließen. Für die Querregelungsfunktionen reicht allerdings die derzeit angebotene Auflösung noch nicht, um mit einer Grauwertkamera konkurrenzfähig zu sein. Dabei ist das PMD ausbaufähig und bietet darüber hinaus die Möglichkeit, auch Berandungen der Fahrbahn, wie z.B. Randsteine, Abhänge, Begrünungen o.ä., mit zu detektieren. Zur Erhöhung der Sicherheit, z.B. bei einer Fußgängererkennung oder der Spurerkennung, wäre eine Fusion mit einer 2D-Kamera vorteilhaft. Diese Fusion kann in einem Sensor stattfinden, der einen PMD- und einen Kamerachip enthält. Sie kann aber auch auf einem einzigen Chip realisiert werden, der sowohl 2D, wie auch 3D-Pixel aufweist. Ein weiterer Schritt in diese Richtung ist die kontinuierliche Miniaturisierung der PMD-Pixel zur Steigerung der lateralen Auflösung. Mit einem möglichen Verzicht auf eine 2D-Kamera steigt das Vermarktungspotential deutlich an. Die im Projekt gesammelten Erfahrungen sind die Grundlage für Konzeptentwicklungen und Machbarkeitsanalysen in weiteren Anwendungen.

Bei den kalkulierten Businessmodellen wurden, um die Fahrzeugfront gleichmäßig auszuleuchten, zumeist zwei Sender in Verbindung mit einer Kamera betrachtet. Mit der Entwicklung der LED-Sender konnte gezeigt werden, dass auch mit einer relativ günstigen Technologie PMD-taugliche Beleuchtungsquellen produziert werden können. Das ist eine Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Vermarktung, da das PMD, wie schon gezeigt, eine große Beleuchtungsstärke verlangt und die LED-Technologie die weitaus günstigste Kosten/Leistungsbilanz bietet.

Der nächste Schritt zur Serieneinführung wäre aus unserer Sicht die Entwicklung eines rein digital ansteuerbaren „PMD-Frontend-Moduls“, möglichst auf einem Chip, zumindest aber in einem Package. Dieses PMD-Modul sollte von einer Systemumgebung ähnlich wie bei einer Grauwertkamera angesteuert werden können. Eine analoge HF-Ansteuerung dürfte nicht mehr nötig sein, da sie in den Chip integriert wäre. Die Systemtechnik würde stark vereinfacht, entsprechende Entwicklungszeiten für die Vermarktung verkürzt. Die analoge Systemtechnik wäre größtenteils auf den Chip beschränkt. Entsprechend sollten sich systematische Fehler minimieren lassen, da das Frontendmodul nur ein einziges Mal zu entwickeln wäre und nicht mit jedem System wieder neu zu optimieren ist. Darüberhinaus sollten sich die systematischen Fehler auch reproduzierbarer verhalten. Sie sollten von System zu System vergleichbar sein, was die Charakterisierung erheblich vereinfacht. Letzten Endes ergäbe sich ein Kostenvorteil, der die Vermarktung deutlich vereinfachen würde. Dieses PMD-Modul wäre dann auch universell anwendbar, d.h. für viele Funktionen in unterschiedlichen Bereichen auch außerhalb des Automobils nutzbar. Das wäre ein wesentlicher Schritt zur Schaffung eines „PMD-Modulbaukastens“.



**Abbildung 88: Aufbau eines digitalen PMD**

**Die grünen Module sind bereits integriert, die gelben sollten integriert werden und die Modulationsgenerierung(braun) ist optional integrierbar**

Gleichzeitig sollte sich über die Miniaturisierung des analogen Signalpfades eine Reduzierung des Rauschpegels einstellen und damit auch eine technische Verbesserung erzielen lassen. Eine Ausschöpfung aller zur Verfügung stehenden Optionen wird notwendig werden, da das PMD im Vergleich mit anderen (IR-)Sensoren relativ unempfindlich ist und für eine zukünftige Vermarktung langfristig wahrscheinlich auch ACC-Funktionalitäten erfüllt werden müssen.

Plant man ein Jahr für die Modulentwicklung des PMD, ca. drei Jahre für die Sensorentwicklung und ein weiteres Jahr für die Evaluierung von Sicherheitsfunktionen, so kann in etwa fünf Jahren mit dem Start einer Produktion gerechnet werden. Komfortsysteme könnten auch schon etwas früher in Serie gehen.

Zur aktiven Vermarktung werden Studien und Vorentwicklungsprojekte bei diversen Kunden unterstützt oder komplett durchgeführt. Hierzu werden auch der Demonstrator und die aufgebauten Kameras mit einbezogen. Weiter wird mit den Kunden ein aktiver Dialog über Einführungsszenarios der PMD-Technologie geführt.

### 2.3 Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Die folgende Tabelle bietet einen Überblick über die bekannt gewordenen Arbeiten zu 3D-Kameras und entsprechende Produkte [Fritz04], [Lang05]:

<b>Firma</b> Land	Auflösung	Reichweite	Prinzip
<b>Canesta</b> USA	64 x 64	mittel	Phasenmessender CMOS-Sensor, Prinzip sehr ähnlich mit PMD
<b>IEE</b> Luxemburg	160 x 120	mittel	Phasenmessender CMOS-Sensor
<b>3DV</b> Israel	Beliebig (PAL)	0,5 - 7 m	Laufzeitkamera, kurze (ns) Laserpulse, deren Verzögerung über einen schnell schaltbaren Bildverstärker gemessen wird
<b>3D-IP</b> Deutschland	VGA	mittel	Stereokamera mit neuem Auswertungsprinzip
<b>Swiss Federal Institute of Technology</b> Schweiz	32 x 32	groß	SPAD: „Single Photo Avalanche Dioden“ – Array  Die Technologie ist neu und lässt sich bisher noch nicht einschätzen
<b>SiemensVDO</b> Deutschland	64 x 8	25 m	Laufzeitkamera, kurze (ns) Laserpulse, deren Verzögerung über einen schnell schaltbaren CMOS-Sensor gemessen wird, wird derzeit noch im Rahmen des Förderprojektes „UseRCams“ entwickelt
<b>PMD-TEC</b> Deutschland  „MSM-PMD“	16 x 4	Wie Photo-gate-PMD	PMD auf Schottkydioden-Basis [Schwa01], [Gro02]

**Tabelle 32: Übersicht über Konkurrenzprodukte**

Die stärkste Konkurrenz für das PMD dürften aus heutiger Sicht die Canesta-Kamera und die IEE-Kamera darstellen. Das Produkt von 3DV ist für den Highend-Bereich, 3D-IP bietet eine verbesserte Stereokamera mit den prinzipinhärenten Eigenschaften und die SPAD-Technologie ist noch zu neu um sie einzuschätzen. Der Sensor von SiemensVDO [Depa98] wird erst noch entwickelt.

## 2.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse

Die Ergebnisse wurden im Statusmeeting am 28.07.2005 der Öffentlichkeit vorgestellt. Danach fanden zahlreiche Präsentationen bei Kunden statt. Präsentationen und Vorträge wurden generell genutzt, um die Ergebnisse der Temic und der A.D.C. gemeinsam vorzustellen. Hierunter fallen folgende öffentliche Auftritte:

1. C. Lang, Handout\_v1, Vortrag BMBF-Messestand, Hannover Messe, April 2003
2. Friedrich Zywitza: „Umfeldsensorik: ein innovativer Sensor für Fahrerassistenzsysteme - Photonic Mixing Device (PMD)“, IIR-Fachkonferenz „Innovative Fahrerassistenzsysteme“, 14./15. Oktober, 2003, Nürtingen
3. Friedrich Zywitza: „Photonic Mixing Device PMD - eine 3D-Kamera für Fahrerassistenzsysteme“, TÜV Konferenz „Sensorik in Sicherheits- und Assistenzsystemen“, 10./11. Februar 2004, Köln
4. Friedrich Zywitza: „Photonic Mixing Device (PMD) - A New Sensor for Occupant Safety Systems“, CTI-Fachkonferenz „La securite dans l'automobile“, 16./17. November, 2004, Paris, Frankreich
5. F. Zywitza, Dr. J. Massen, M. Brunn, C. Lang: „3D-SIAM: 3D Sensor Technology for Forward Looking Safety Systems in Automobile“, mstnews No. 6/04, Dezember 2004
6. F. Zywitza, Dr. J. Massen, M. Brunn, C. Lang, T. Görnig: „One-to-Three-dimensional Ranging for Future Automotive Safety Systems“, 1<sup>st</sup> Range Imaging Research Day, 8./9. September, 2005, ETH Zürich, Schweiz
7. Friedrich Zywitza: „Precrash Insassen- und Fußgänger-Schutzsysteme mit 3D-Bildaufnahmen und Lasersensorik“, CTI-Fachkonferenz „Sensorik für Kfz-Sicherheitssysteme“, 21./22. November 2005, Stuttgart
8. Joachim Massen, „Optische Sensorik in Fahrerassistenzsystemen“, Industrietag AIW der DPG-Frühjahrstagung in Regensburg, 2004

## 2.5 Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Beitrag von Fahrerassistenzsystemen zur Sicherheit.....	9
Abbildung 2: Arbeits- und Zeitplan zu Beginn des Projektes.....	13
Abbildung 3: Arbeits- und Zeitplan zu Beginn des Projektes.....	13
Abbildung 4: Arbeits- und Zeitplan nach Restrukturierung und Verlängerung .....	17
Abbildung 5: Mastermeilensteine nach Restrukturierung und Verlängerung .....	18
Abbildung 6: Projektverlauf, kritischer Pfad.....	18
Abbildung 7: Kooperationsmatrix:.....	24
Abbildung 8: Definition der Variablen zur Beschreibung der Winkelverteilung am Fahrzeug: .....	26
Abbildung 9: Theoretische vertikale Strahlstärkenverteilung.....	27
Abbildung 10: Berechnungen zur Augensicherheit.....	28
Abbildung 11: Fresnelstrukturen zur Strahlaufweitung .....	29
Abbildung 12: Winkelverteilung der LED-Abstrahlung .....	30
Abbildung 13: Gemessene horizontale Winkelverteilung der Bestrahlungsstärke nach Überlagerung durch Fresnelstrukturen .....	31
Abbildung 14: Zeichnung des Aufbaus der Senderoptik .....	31
Abbildung 15: Senderoptik .....	32
Abbildung 16: Abstrahlcharakteristik der Sender mit Fresnelplatten und Zylinderlinsen.....	32
Abbildung 17: Module der Senderelektronik.....	34
Abbildung 18: LED (Front) Platine und Steuerplatine auf der Rückseite.....	35
Abbildung 19: Gemessene optische Signalform der Sender.....	36
Abbildung 20: Optische Ausgangsleistung der LED bei hoher Belastung.....	40
Abbildung 21: Vergleich der Belastungsmessungen im Burstbetrieb mit den Angaben zum Pulsbetrieb der Datenblätter .....	41
Abbildung 22: Messablauf .....	43
Abbildung 23: Timing der Datenerfassung und Verarbeitung .....	44
Abbildung 24: Filterkurven für ausgewählte opt. Filter .....	47
Abbildung 25: Prinzipieller Aufbau der Empfangsoptik.....	48
Abbildung 26: Auflösung des Objektivs (MTF) .....	48
Abbildung 27: Queraberration .....	48
Abbildung 28: Querschnitt des Senders, Konstruktionszeichnung.....	49



Abbildung 29: Wärmeersatzschaltbild für den Sender .....	50
Abbildung 30: Temperaturkoeffizient der Wellenlänge.....	51
Abbildung 31: Temperaturkoeffizient der Diodenspannung.....	53
Abbildung 32: Verlustleistung, die von den LEDs abgeführt werden kann .....	56
Abbildung 33: erlaubte Integrationszeiten.....	56
Abbildung 34: Sender mit Zusatzoptik                    und                    ohne Zusatzoptik.....	57
Abbildung 35: Querschnitt des Senders .....	57
Abbildung 36: Konzeption des Aufbaus des Versuchsträgers mit den Hauptkomponenten PMD- Sensorsystem, Referenzmesstechnik und Fahrzeug .....	60
Abbildung 37: Fahrzeugaufbau und Anordnung der Komponenten .....	61
Abbildung 38: Integration des PMD-Systems ins Fahrzeug .....	62
Abbildung 39: Rechnerplattformen im Kofferraum zur Fahrzeugsteuerung .....	62
Abbildung 40: Komponenten des HMI .....	63
Abbildung 41: Sensorsystem im Fahrzeug, Steuersensorik (PMD)(rot) u. Referenzsensorik(blau).....	64
Abbildung 42: Aufnahme von Quelldaten .....	65
Abbildung 43: Wiedereinspeisung von Quelldaten .....	65
Abbildung 44: komplexe Szene mit mehreren unterschiedlichen Verkehrsteilnehmern: Alle Objekte können gut voneinander getrennt detektiert werden. ....	66
Abbildung 45: Allee, viele schlecht reflektierende Ziele: Alle Ziele im relevanten Bereich werden erkannt. ....	66
Abbildung 46: Fußgänger vor dem Fahrzeug auf einer leicht ansteigenden Straße: Sowohl die Fußgänger als auch die Straße werden verlässlich detektiert. ....	67
Abbildung 47: Motorradfahrer werden eindeutig erkannt. Nicht nur der Reflektor sondern der Fahrer und das Motorrad werden detektiert.....	67
Abbildung 48: Die Funktion des Systems ist auch im Tunnel und beim Übergang ins Freie sichergestellt. ....	67
Abbildung 49: 2 Fahrradfahrer können mit guter Auflösung getrennt detektiert werden.....	68
Abbildung 50: typische S&G-Folgesituation: Das System erfasst alle wichtigen Objekte mit guter Auflösung. ....	68
Abbildung 51: In komplexen Szenen wie z.B. Baustellen können auch kompliziertere, ausgedehnte Strukturen erfasst werden .....	68
Abbildung 52: Datenverarbeitung im Fahrzeug .....	70
Abbildung 53: Sammlung der typisch S&G-relevanten Verkehrssituationen.....	72
Abbildung 54: : Entspanntes Fahren im Stau mit S&G-Assistenz .....	77

Abbildung 55: Betriebszustände des S&G-Systems .....	79
Abbildung 56: Ablauf der Steuerung über einen einzigen „S&G-Knopf“ .....	80
Abbildung 57: Bevorzugte Anordnung der S&G-Taste .....	80
Abbildung 58: Darstellung der benötigten Sensor-Reichweite abhängig von Geschwindigkeit und maximaler Verzögerung.....	81
Abbildung 59: Öffnungswinkel der PMD-Kamera.....	82
Abbildung 60 PMD-System-Integration ins Fahrzeug:.....	83
Abbildung 61: Anordnung der Komponenten auf den drei Platinenebenen .....	85
Abbildung 62: Vorder- und Rückansicht des Platinenstapels der PMD-Kamera.....	86
Abbildung 63: Blockschaltbild der Kamera mit Darstellung der internen Kommunikation.....	86
Abbildung 64: Rohdatenverarbeitung .....	88
Abbildung 65: diffus reflektierende, helle Tafel auf der Antriebsschiene der Messstrecke .....	89
Abbildung 66: Messergebnisse zu Empfindlichkeit/Reichweite des Systems bei unterschiedlichen Ausgangskanälen(Verstärkungen: $G_0=1x$ , $G_x=30x$ , Video A/B=1 direkter Ausgang ohne Differenzverstärker) zur Wahl der höchsten Messfrequenz, die über die Genauigkeit des Mehrfrequenzverfahrens entscheidet. ....	90
Abbildung 67: Vergleich der Ausgangskanäle (Verstärkungen) für die favorisierte Messfrequenz.....	91
Abbildung 68: Reichweite auf unterschiedliche Ziele .....	92
Abbildung 69: Vergleich der Rohdaten bei unterschiedlichen Zielen liefert gute Übereinstimmung .....	92
Abbildung 70: Darstellung des systematischen Fehlers.....	93
Abbildung 71: Laboraufbau zur Charakterisierung des Sensorsystems .....	94
Abbildung 72: Ergebnis von Dunkelmessungen (ohne Sender und Hintergrundlicht) .....	94
Abbildung 73: Amplitude und Streuung der Messwerte mit zunehmendem Fremdlicht.....	95
Abbildung 74: Vergleich der korrigierten und nicht korrigierten Amplituden bei steigendem Fremdlicht .....	96
Abbildung 75: Anstieg der Amplituden mit starkem Fremdlicht bei Einsetzen der Fremdlichtunterdrückung (SBI-Schaltung).....	97
Abbildung 76: Referenz-Tafel.....	98
Abbildung 77: Desktop-System, Kamera + ein Sender .....	98
Abbildung 78: Fahrzeug-Demonstrationssystem.....	98
Abbildung 79: S&G-Regelung.....	100
Abbildung 80: Datenfluss in der Situationsanalyse.....	101
Abbildung 81: Darstellung der Fehlreaktionswahrscheinlichkeit mit der Reaktionszeit.....	103

Abbildung 82: Begrenzung des relevanten Bereiches zur Beseitigung von Straße oder Brücken .....	104
Abbildung 83: Zustandsdiagramm der Situationsanalyse.....	105
Abbildung 84: PMD-Chip .....	106
Abbildung 85: PMD-Gehäuse, Pinbelegung .....	106
Abbildung 86: Struktur der SW-Module im FPGA .....	107
Abbildung 87: Mögliche Einsatzbereiche für eine PMD-Kamera im Fahrzeug .....	110
Abbildung 88: Aufbau eines digitalen PMD.....	112

## 2.6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mastermeilensteine.....	14
Tabelle 2: Umwidmung von Arbeitspaketen.....	15
Tabelle 3: Sender-Spezifikation.....	25
Tabelle 4: Vergleich der vorhandenen mit der gewünschten, spezifizierten Abstrahlcharakteristik.....	29
Tabelle 5: Technische Rahmendaten, die als Grundlage für die Markterhebung dienten.....	37
Tabelle 6: 2002 verfügbare VCSEL-Elemente.....	37
Tabelle 7: 2002 verfügbare Laserdioden.....	38
Tabelle 8: 2002 verfügbare LEDs.....	38
Tabelle 9: zusammengefasste Ergebnisse der Marktrecherche.....	39
Tabelle 10: Entscheidungsmatrix für die Auswahl der Technologie.....	39
Tabelle 11: Anforderungen an eine PMD-Empfangsoptik für einen Prototyp-Aufbau.....	45
Tabelle 12: Ergebnis der Marktrecherche nach geeigneten Objektiven für die PMD-Kamera.....	46
Tabelle 13: Bestimmung der Durchlassbereiche der Filter auf Basis der Toleranzen.....	47
Tabelle 14: Kriterien für die Bewertung der Sender.....	49
Tabelle 15: Gegenüberstellung: Thermischer Widerstand für die „freie“ und „eingepackte“ LED.....	52
Tabelle 16: Thermische Widerstände für verschiedene Kühlkörper.....	52
Tabelle 17: Thermische Charakterisierung des Senders.....	54
Tabelle 18: Technische Daten des Senders.....	57
Tabelle 19: Anforderungskatalog zur Fahrzeugauswahl.....	58
Tabelle 20: Eigenschaften des Versuchsfahrzeugs.....	58
Tabelle 21: Umbauarbeiten am Versuchsträger.....	59
Tabelle 22: typische Betriebsbedingungen S&G:.....	71
Tabelle 23: Spezifikation des S&G-Systems im Fahrzeug.....	78
Tabelle 24: Sensorspezifikation für S&G und für die Precrash-Sensierung.....	84
Tabelle 25: Zusammengeführte Sensorspezifikation für S&G und Precrash.....	84
Tabelle 26: PMD-Chip- und Systemvarianten die im Laufe des Projektes aufgebaut wurden.....	87
Tabelle 27: Technische Daten der PMD-Kamera:.....	99
Tabelle 28: Aufgaben der Situationsanalyse.....	102
Tabelle 29: typische Aktionen der Situationsanalyse.....	103
Tabelle 30: PMD-Chipspezifikation.....	106

Tabelle 31: Spezifizierung der On-Chip-Verstärker ..... 106  
Tabelle 32: Übersicht über Konkurrenzprodukte ..... 113

## 2.7 Verzeichnis der Abkürzungen

3D SIAM	3D- Sensorik für vorausschauende Sicherheitssysteme im Automobil
A 0..15	16bit Adressleitungen
ACC	adaptive cruise control
A.D.C.	Automotive Distance Control Systems GmbH
ADC	Analog Digital Converter
AIZS	Adaptive Integrationszeitregelung zur Erweiterung der Dynamik
AKF	Autokorrelationsfunktion
AP	Arbeitspaket
CAN	Controller Area Network, Bus-System, 1981 von BOSCH GmbH entwickelt, wird u.a. zur Datenübertragung im Automobil genutzt
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
Ctrl 0..5	6bit Steuerleitungen
D 0..15	16bit parallele Datenübertragung
DC	DaimlerChrysler
DLL	Dynamic Link Library, Dynamische Verknüpfungsbibliothek
DP Memory	Dual Port Memory
DSP	Digitaler Signal Prozessor
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read Only Memory
FPGA	field- programmable gate array, frei programmierbare Gattermatrix
F-Zahl	auch Blendenzahl, Verhältnis Brennweite/Durchmesser, gibt die Lichtstärke eines Objektivs an
HMI	Human Machine Interface, Mensch-Maschine-Interface, Benutzeroberfläche
Int	interrupt
IR	Infrarot
LIDAR	light detection and ranging
LSB	least significant bit
LVDS	Low Voltage Differential Signalling
PIP	PreIntegrationPhase Vormessung
PMD	Photonic Mixer Device (Photomischdetektor)
PMD-TEC	PMD Technologies GmbH, Siegen 2002
RX	Empfänger
S&G	Stop-and-Go
SBI	Suppression of Background Illumination Fremdlichtunterdrückung

SPI	Serial Peripheral Interface
S-TEC	Sensor Technologies GmbH, Siegen 1997, seit 2002 Teil der PMD-TEC
TP	Teilprojekt
TX	Sender
USB	Universal Serial Bus, PC Schnittstelle
ZMD	Zentrum Mikroelektronik Dresden