Messung geringer Bestrahlungsstärken - eine Systementwicklung mit hoher Dynamik und Genauigkeit aber ohne Meßbereichsumschaltung

Dipl.-Ing. Carsten Blankenhagen
Technische Universität Ilmenau
Fakultät Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
PF 10 05 65
98684 Ilmenau

Der vorliegende Beitrag wurde im Rahmen des Projektes „FASIVAL“ von folgenden Industriepartnern unterstützt und gefördert:
BMW AG (München)
DaimlerChrysler AG (Stuttgart)
Robert Bosch GmbH (Schwieberdingen)

1. Einleitung

In der ersten Hälfte dieses Jahres wurde an der TU Ilmenau im Fachgebiet Lichttechnik im Rahmen einer Diplomarbeit ein kombiniertes Meßgerät zur Erfassung von Leuchtdichten in zwei Bewertungsfeldern und Beleuchtungsstärken entwickelt. Hintergrund dieser Entwicklung war ein Drittmittelprojekt zur Schaffung eines Fahrersichtweitenmeßsystems, welches speziell bei schlechter Sicht und Nebelsituationen eine Sichtweitenmessung ermöglicht.

Daher hatte dieses Meßsystem die Aufgabe, die Meßwerte in den relevanten Bereichen zu erfassen und einem Rechner zur Verfügung zu stellen, welcher dann die Auswertung und Berechnung der Sichtweite übernimmt. Die folgende Abbildung soll die prinzipielle Anordnung veranschaulichen:

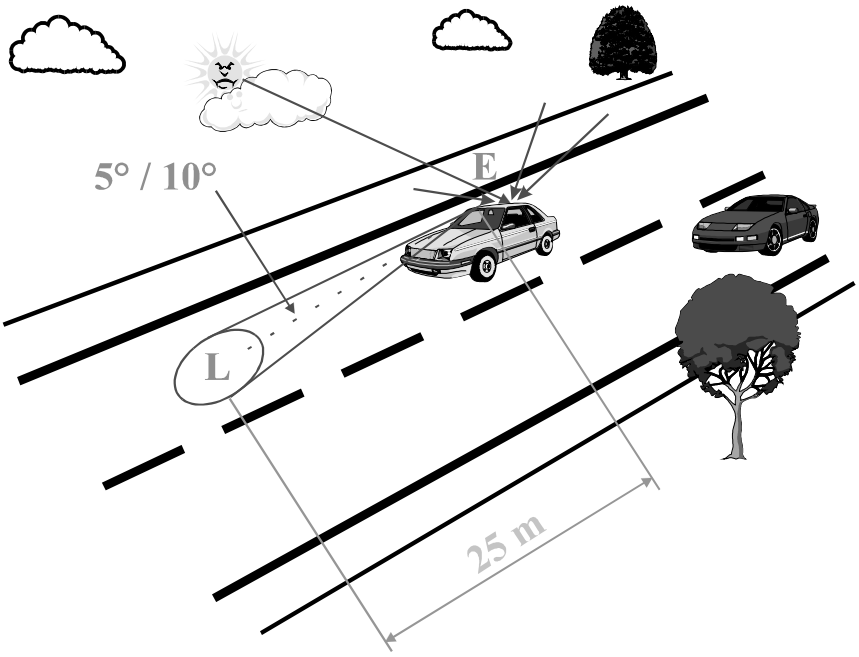

Bild 1 Anordnung der Sensoren des kombinierten Meßsystems

2. Anforderungen und Meßprinzip

Durch die Auswertung der bisherigen Ergebnisse des Drittmittelprojektes ergaben sich für das Meßsystem folgende Anforderungen:

Leuchtdichte:	0,1 ... 1000 cd/m^2	(Bewertungsfeld 5° und 10°)
horizontale Beleuchtungsstärke:	0,1 ... 10000 lx	
Echtzeitfähigkeit:	nicht gefordert, aber max. 5 sek. je Datensatz	
Meßfehler:	möglichst ≤ 5%	(Linearitätsfehler)

Um bei der Entwicklung die Probleme der V(λ) und der Kosinusanpassung zu umgehen, wurden für beide Meßkanäle identische Sensoren (Fotodioden) eingesetzt, in welchen die genannten Apassungen bereits integriert waren. Während die Beleuchtungsstärke mit diesen Sensoren direkt gemessen werden kann, mußte für die Leuchtdichtemessung ein spezieller Tubus entwickelt werden (Raumwinkelbegrenzung), welcher durch eine abnehmbare Kappe die Messung in den beiden Bewertungsfeldern gestattet. Dabei wurde vom Leuchtdichtesensor die überflüssige Kosinusanpassung (Streuscheibe) entfernt, was eine Verzehnfachung der Sensorempfindlichkeit bewirkte. Durch lichttechnische Berechnungen und dementsprechende Labor-Messungen mit hochempfindlichen Strom-Spannungswandlern konnte aus den geforderten Leuchtdichte- und Beleuchtungsstärkemeßbereichen der resultierende Dynamikbereich der zu erfassenden Fotoströme ungefähr ermittelt werden.

Meßkanal	resultierender Fotostrombereich
L - Kanal (5° & 10°)	< 115,1 pA ... 69,5 nA
E - Kanal	250,15 pA ... 26,98 µA

Bei diesen Messungen wurde beim L - Kanal der kleinste Fotostrom im 5°-Meßfeld bei 0,1 cd/m^2 und der größte Fotostrom im 10°-Meßfeld bei 1000 cd/m^2 bestimmt, um den gesamten Dynamikbereich über beide Bewertungsfelder hinweg zu erfassen.
Da an das Meßsystem keine direkten Echtzeitforderungen gestellt wurden, sondern lediglich die maximale Meßzeit auf 5 Sekunden je Datensatz begrenzt war, fiel die Wahl auf das Integrations-Meßprinzip, welches mit zwei hochwertigen, geschalteten

Transimpedanzverstärkern realisiert wurde. Die verwendeten Typen wiesen Eingangsfehlerströme von -14,3 fA bzw. -40,3 fA auf und liegen damit weit unter dem kleinsten zu messenden Fotostrom, so daß der von ihnen zu erwartende Fehlereinfluß gering ist. Angesichts der geforderten Genauigkeit schien es gerechtfertigt, das Meßverfahren als Single-Slope-Variante zu implementieren. Bild 2 zeigt schematisch den Aufbau des Meßsystems:

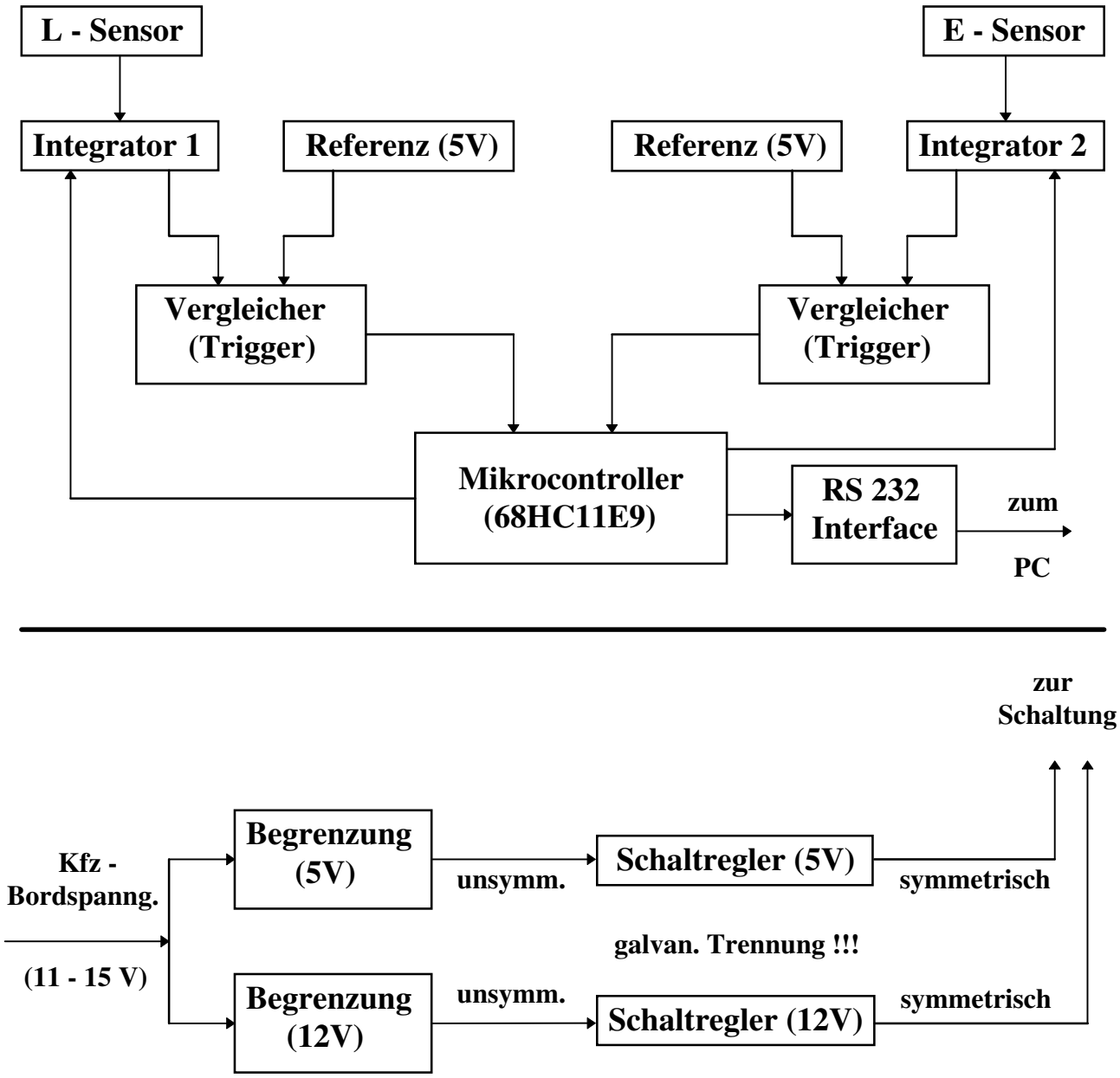

Bild 2 Schematischer Aufbau des Meßsystems (mit Stromversorgung)

Bevor einige Ausführungen zur Funktionsweise folgen, noch ein paar Bemerkungen zur Stromversorgung. Die Speisung der Schaltung wurde Kfz-gerecht für einen Bereich von 11 bis 15 Volt ausgelegt und versorgt den Digitalteil des Meßsystems mit 5 Volt, wogegen

dessen Analogteil mit 12 Volt arbeitet. Da der Analogteil auch noch weit unter 12 Volt sicher funktioniert, ist auch ein Betrieb mit 11 Volt unkritisch. Die Besonderheit der Stromversorgung besteht in den verwendeten Spannungswandlern, welche in integrierter Schaltreglertechnik ausgeführt sind. Diese ermöglichen zum einen die Erzeugung der benötigten symmetrischen Spannung und gewährleisten andererseits die komplette galvanische Entkopplung des gesamten Meßsystems vom Kfz-Bordnetz.
Um die Funktionsweise vom oberen Teil in Bild 2 zu verstehen, geht man zunächst vom entladenen Zustand der Integratoren aus. Nachdem der Mikrocontroller die beiden Integratoren freigegeben hat (Messung - Start), fangen diese an, ihre Integrations-kondensatoren aufzuladen. Schwankt der Fotostrom während der Integrationszeit, so erfolgt durch die Integration eine Mittelwertbildung, es wird also ein mittlerer Strom gemessen. Je nach der Größe des fließenden Fotostromes ist die Zeit länger oder kürzer, die zum Erreichen einer Integrator-Ausgangsspannung von 5 Volt notwendig ist. Ist dies der Fall, werden über die Vergleicher (Trigger) entsprechende Flanken generiert und vom Controller detektiert (Messung - Ende). Dieser speichert dann die ermittelten Integrationszeiten ab und sendet sie nach interner Aufbereitung zur weiteren Verarbeitung über die serielle Schnittstelle an einen PC. Nachdem der Controller die Integratoren zurückgesetzt hat (Kondensatoren entladen), kann die nächste Messung erfolgen.
Es werden also die schwer meßbaren kleinen Fotoströme in eine zu ihnen umgekehrt proportionale Integrationszeit gewandelt, welche mit einem Mikrocontroller wiederum sehr genau meßbar ist. Dabei erfolgt die Messung beider Kanäle durch den Controller gleichzeitig, d.h. nach einer maximalen Meßzeit von 5 Sekunden stehen im PC die Werte für Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke zur Verfügung. Das angewendete Integrations-Verfahren birgt einige wesentliche Vorteile in sich:

- Durch die Integration wird das Fotostromrauschen weitgehend eliminiert.
- Da die Integrationszeit mittels Mikrocontroller über große Dynamikbereiche hinweg erfaßt werden kann, ist eine Meßbereichsumschaltung nicht notwendig.
- Die Integrationszeit wird im Mikrocontroller als eine Anzahl Zeitscheibchen konstanter Größe gespeichert. Das bedeutet, bei kleiner werdendem Fotostrom steigt die Auflösung, d.h. Signaldifferenzen sind genauer erfaßbar, als bei größeren Eingangssignalen.

3. Vereinfachte Struktur der Betriebsoftware

Bild 3 zeigt den wesentlichen Programmablauf im Mikrocontroller und im PC. Weitere Parameter (außer Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke), welche die Sichtweite beeinflussen, sind der Richtigkeit und Vollständigkeit halber im Schema enthalten, jedoch nicht Gegenstand dieses Berichtes.

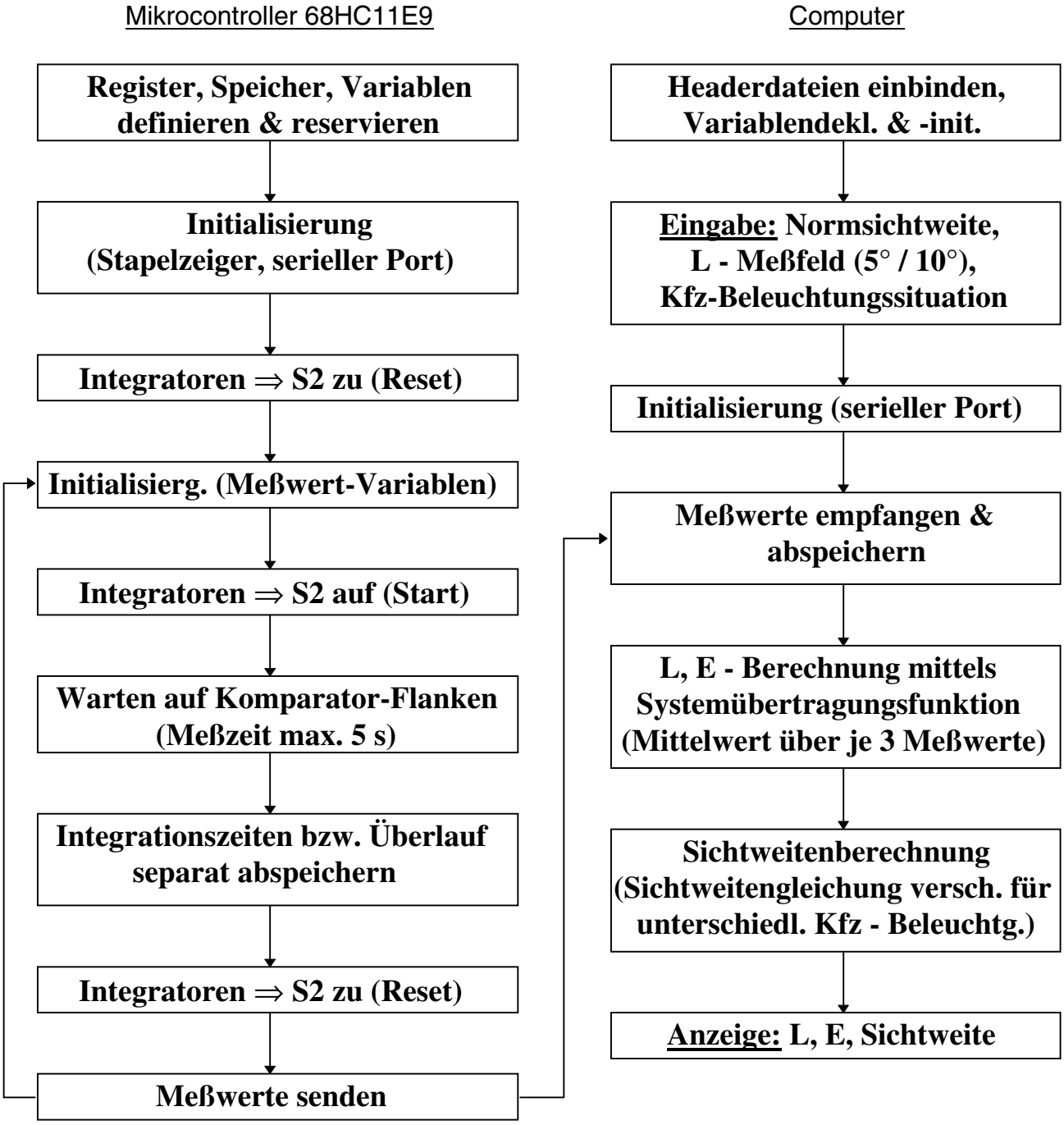

Bild 3 Struktur der Betriebssoftware (vereinfacht)

4. Erreichte Ergebnisse und Genauigkeit des Meßsystems

Kriterien	Anforderungen	errreichte Ergebnisse
Leuchtdichte	0,1 ... 1000 cd/m^2	0,1 ... 3000 cd/m^2
Beleuchtungsstärke	0,1 ... 10000 lx	0,1 ... 20000 lx
max. Meßzeit	5 sek.	5 sek.
Meßfehler (Linearität)	mögl. ≤ 5 %	≈ 6 ... 8 %

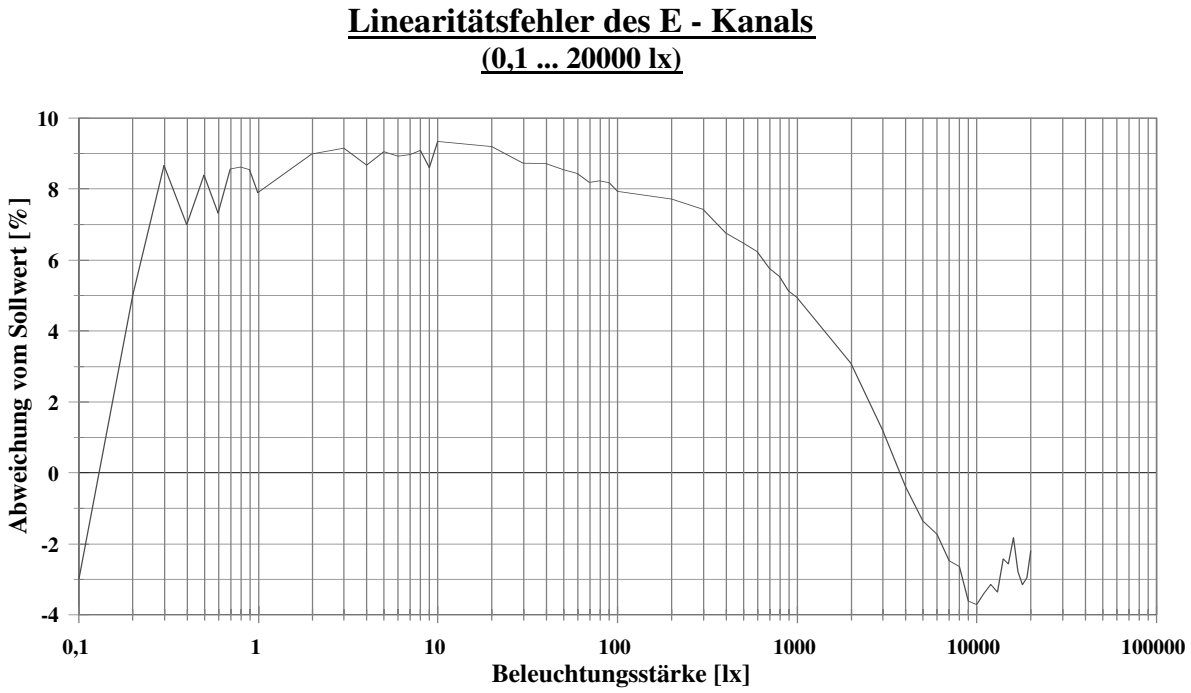

Bild 4 Linearitätsfehler des E - Kanals

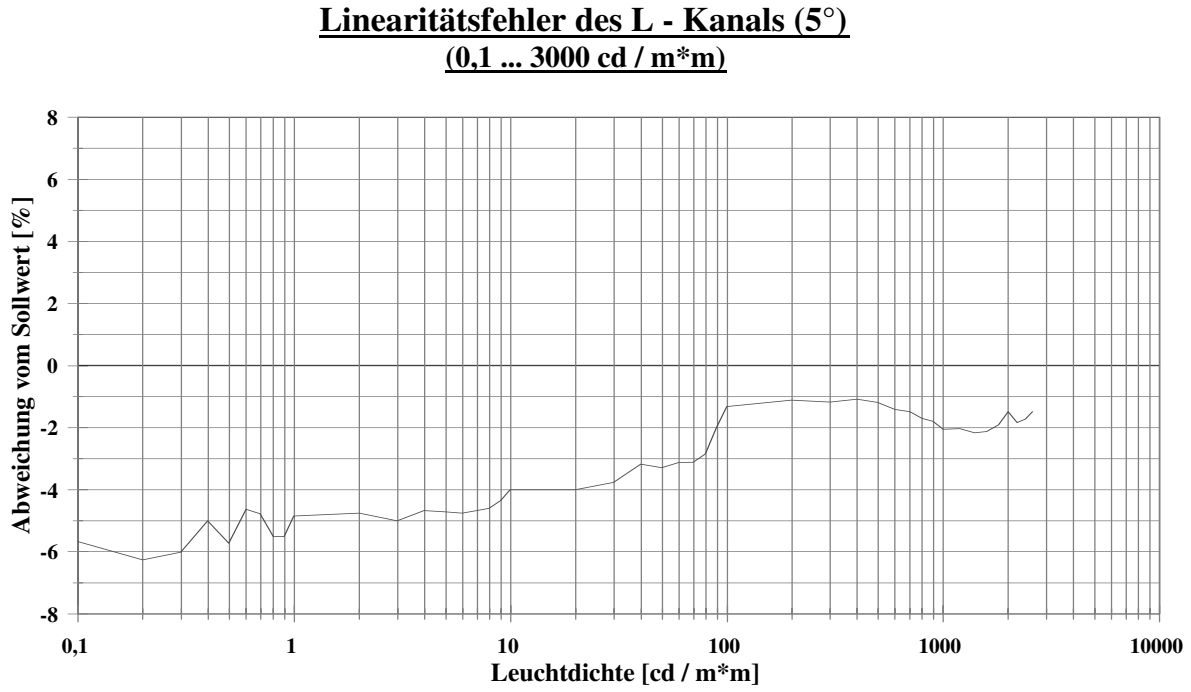

Bild 5 Linearitätsfehler des L - Kanals (5° - Meßfeld)

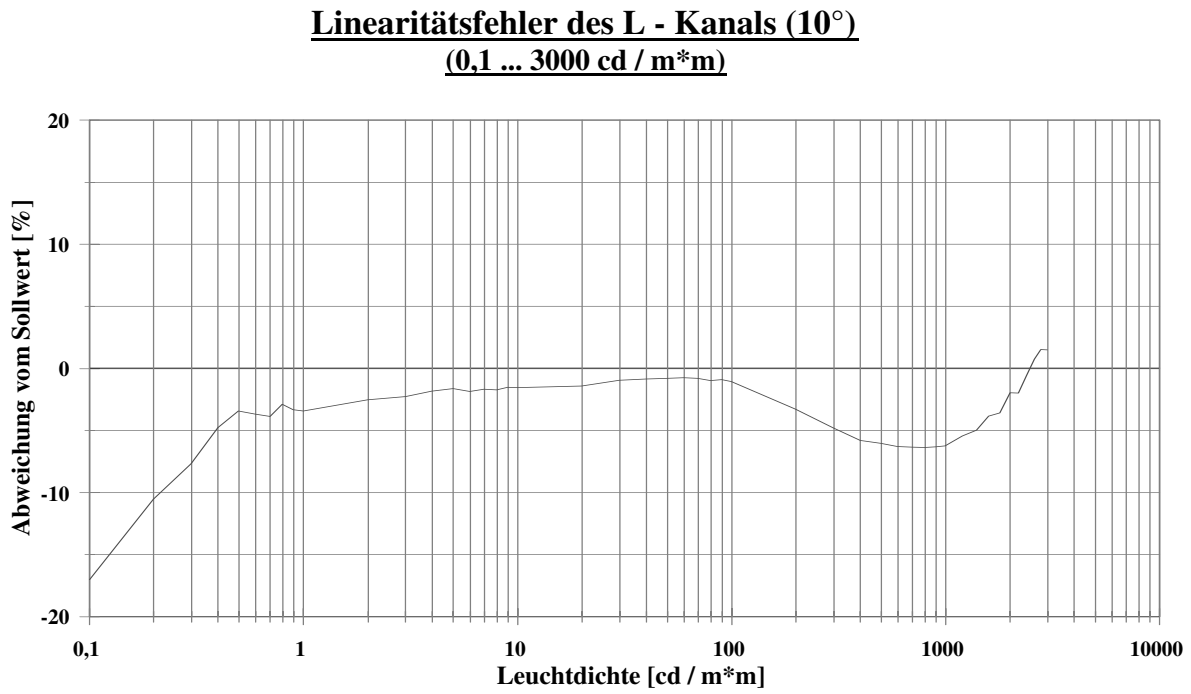

Bild 6 Linearitätsfehler des L - Kanals (10° - Meßfeld)

5. Zusammenfassung

Durch den Einsatz hochempfindlicher Integratoren in Verbindung mit einem Mikrocontroller war es möglich, ein Meßsystem zu entwickeln, welches in der Lage ist, einen Dynamikbereich von 4 bzw. 5 Zehnerpotenzen ohne Meßbereichsumschaltung sicher abzudecken. Würde die Ermittlung der Systemübertragungsfunktionen weitergetrieben bzw. stünde mehr Meßzeit als 5 Sekunden zur Verfügung, könnte dieser Dynamikbereich erheblich aufgeweitet werden. Aufgrund der extrem geringen Eingangsfehlerströme der Integratoren (-14,3 fA bzw. -40,3 fA) sind geringste Fotoströme meßbar, theoretisch beginnt dieser Bereich bei Strömen ab 50 fA. Die dem implementierten Meßprinzip zugrunde liegende schwankende Auflösung (bedingt durch die Zeitscheibchenzählung des Mikrocontrollers) bewegt sich am oberen „Meßbereichsende“ bei mindestens 10 Bit (festgelegte Grundgenauigkeit) und steigt am unteren „Ende“ bis auf 23 Bit an. Kleinste Signaldifferenzen sind deshalb im unteren „Meßbereichsende“ wesentlich genauer erfaßbar als im oberen, wo sie aber auch längst nicht so starken Einfluß ausüben. Wie die Diagramme zu den Linearitätsfehlern belegen (Bild 4 ... Bild 6), ist eine Single-Slope-Implementierung bei Genauigkeitsforderungen von ≈5% gerechtfertigt. Wesentlich höhere Genauigkeiten (Fehler << 1%) lassen sich mit Dual-Slope-Verfahren realisieren.

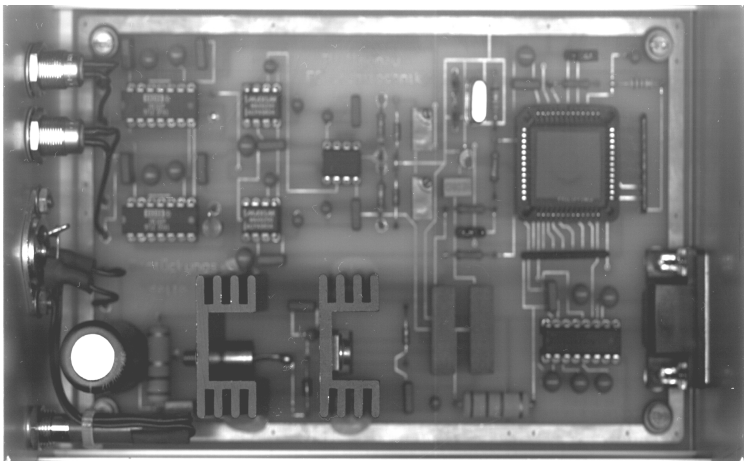

Bild 7 Blick ins Innere des entwickelten Meßsystems

Literatur:

Blankenhagen, C: „Entwicklung und Aufbau eines Fahrersichtweitenmeßsystems einschließlich Implementierung der Betriebssoftware“, Diplomarbeit 1999, TU Ilmenau