Messung geringster Fotoströme – ein Meßprinzip mit hoher Dynamik und ohne Meßbereichsumschaltung

Carsten Blankenhagen

1. Problembeschreibung

Um lichttechnische Größen meßtechnisch zu erfassen, werden in der gesamten Lichttechnik Sensoren bzw. Wandler eingesetzt, welche das auftreffende Licht in einen Strom bzw. eine Spannung umwandeln, deren Größe in unmittelbarem Zusammenhang mit der einfallenden Bestrahlungsstärke steht. Diese Ströme werden in der Fachsprache auch als Fotoströme bezeichnet und sind meist sehr klein. Sie überstreichen in der Praxis einen Bereich von einigen Milliampere bis hinunter in den Picoamperebereich und können sogar in den Femtoamperebereich hineinreichen. Als anschaulicher Vergleich hierzu seien die menschlichen Gehirnströme erwähnt, welche im Mikroamperebereich angesiedelt sind. Dieser hohe Dynamikbereich der Fotoströme resultiert aus der hohen Dynamik der zu messenden lichttechnischen Größen, welche fünf und mehr Zehnerpotenzen umfassen kann. So beträgt die Beleuchtungsstärke bei Nacht im Freien nur wenige lux, wogegen bei grellem Sonnenschein Werte weit über 100000 lux auftreten können.

2. Zwei grundsätzliche Meßmethoden

Zur Messung dieser lichttechnischen Werte bzw. der erzeugten Fotoströme kommen in der Schaltungstechnik zwei grundsätzliche Verfahren in Frage. Zum einen können die Ströme direkt linear gemessen werden, d.h. sie werden in einen Verstärker eingespeist, welcher sie entsprechend verstärkt und beispielsweise in eine proportionale Ausgangsspannung umwandelt. Das zweite Verfahren beruht auf dem Integrationsprinzip, bei welchem die Fotoströme über eine gewisse Zeit aufintegriert werden, wobei bei fester Meßzeit die Höhe der Integratorausgangsspannung ein Maß für die Größe des mittleren fließenden Fotostromes ist.

Der Vorteil des linearen Meßverfahrens liegt zunächst in der Echtzeitfähigkeit eines solchen Meßsystems. Aufgrund der eingangs erwähnten Dynamik ist jedoch eine Meßbereichsumschaltung erforderlich, welche einige Probleme bereitet. Diese liegen im Wesentlichen in der elektrischen Ausführung der Umschaltkontakte. Werden diese mechanisch realisiert (z. B. Reed-Relais), so tritt aufgrund der unvermeidlichen Oxydation im Laufe weniger Jahre ein Übergangswiderstand auf, welcher das Meßergebnis ganz erheblich beeinflussen kann. Beauf-

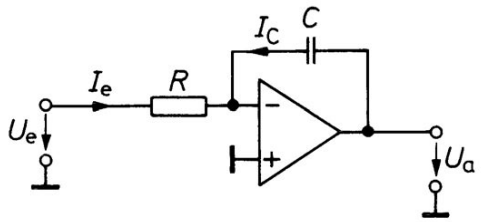
Dipl.-Ing. Carsten Blankenhagen
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Postfach 10 05 65
D-98684 Ilmenau

schlagt man solche Kontakte mit einem ständig fließenden kleinen Formierungsstrom von einigen Mikroampere, so kann der Kontaktübergangswiderstand infolge Kontaktabbrand beim Schalten (Miniaturlichtbogen) auf ungefähr gleichem Niveau gehalten werden. Dies bedeutet aber wegen der notwendigen Trennung von Formierungs- und Fotostrom einen wesentlich erhöhten Schaltungsaufwand. Werden die Kontakte auf elektronische Weise z. B. mit entsprechenden Transfergates realisiert, ergibt sich das Problem der nicht vollständigen ohmschen Trennung der „Umschaltkontakte“, d.h. es bleibt beim Öffnen ein Restwiderstand im Gigaohmbereich, welcher einen geringen Fehlstrom zur Folge hat und damit das Meßergebnis verfälscht.

Wie bereits angedeutet wurde, besteht die Möglichkeit, Fotoströme auch mittels Integrationsmeßverfahren zu erfassen. Der wesentliche Nachteil dieser Variante besteht in der Nicht-Echtzeitfähigkeit eines solchen Meßsystems aufgrund der erforderlichen Integrationszeit. Jedoch ermöglicht gerade die Variation dieser Zeit den kompletten Wegfall der Meßbereichsumschaltung. Die zur Integration verfügbare Zeitspanne bestimmt dabei im Wesentlichen den überstreichbaren Dynamikbereich, welcher aber sechs Zehnerpotenzen und mehr umfassen kann. Die so umgangenen Probleme der Meßbereichsumschaltung durch variable Meßzeiten werden wie bereits erwähnt durch die Nicht-Echtzeitfähigkeit erkauft, jedoch teilweise (bei großen Fotoströmen und entsprechend geringen Integrationszeiten) auch wieder kompensiert. Erwähnenswert ist sicher auch noch die nicht ganz unproblematische Messung der Integrationszeiten.

3. Grundlagen des Integrationsmeßprinzips

Ein solches Integrationsmeßsystem wurde an der TU Ilmenau im Fachgebiet Lichttechnik im Rahmen einer Diplomarbeit und eines Drittmittelprojektes entwickelt. Bevor das Funktionsprinzip des Meßsystems näher erläutert wird, sei nochmal die Wirkungsweise eines einfachen Integrators dargestellt (Bild 1).



$$U_a = \frac{1}{C}\int_0^t \left[I_c(t)\cdot dt + Q_0 \right]$$

Bild 1: Der einfache Integrator

Er besteht im Prinzip aus einem Operationsverstärker, dessen Ausgang über einen Kondensator (Integrationskondensator) auf den invertierenden Eingang zurückgekoppelt ist. Es ist darauf zu achten, daß der Operationsverstärker einen möglichst geringen Eingangsfehlerstrom (BIAS) besitzt und der Kondensator nur sehr geringe Leckströme aufweist (KP-, MKP- oder Styroflex-Typen verwenden). Je länger ein Strom (vorzeichenbehaftet) in den Eingang eines solchen Integrators hineinfließt, desto höher steigt dessen Ausgangsspannung (vorzeichenbe-

haftet) bis hin zur Sättigungsgrenze (durch Betriebsspannung festgelegt) an. Diese Ausgangsspannung kann nach obenstehender Gleichung in Abhängigkeit von der Kapazität und der Integrationszeit berechnet werden, wobei Q_0 die Ladung darstellt, welche sich bei Meßbeginn bereits auf dem Kondensator befindet (sie kann auch Null sein).

4. Funktionsweise des Meßsystems

Die bereits angesprochene Meßgeräteentwicklung basiert auf solch einfachen Integratoren, welche im Single-Slope-Verfahren betrieben werden. Dabei kamen zwei identische Meßzweige zum Einsatz, da zur Erfüllung der Meßaufgabe gleichzeitig Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke erfaßt werden sollten. Bild 2 zeigt das Funktionsschema:

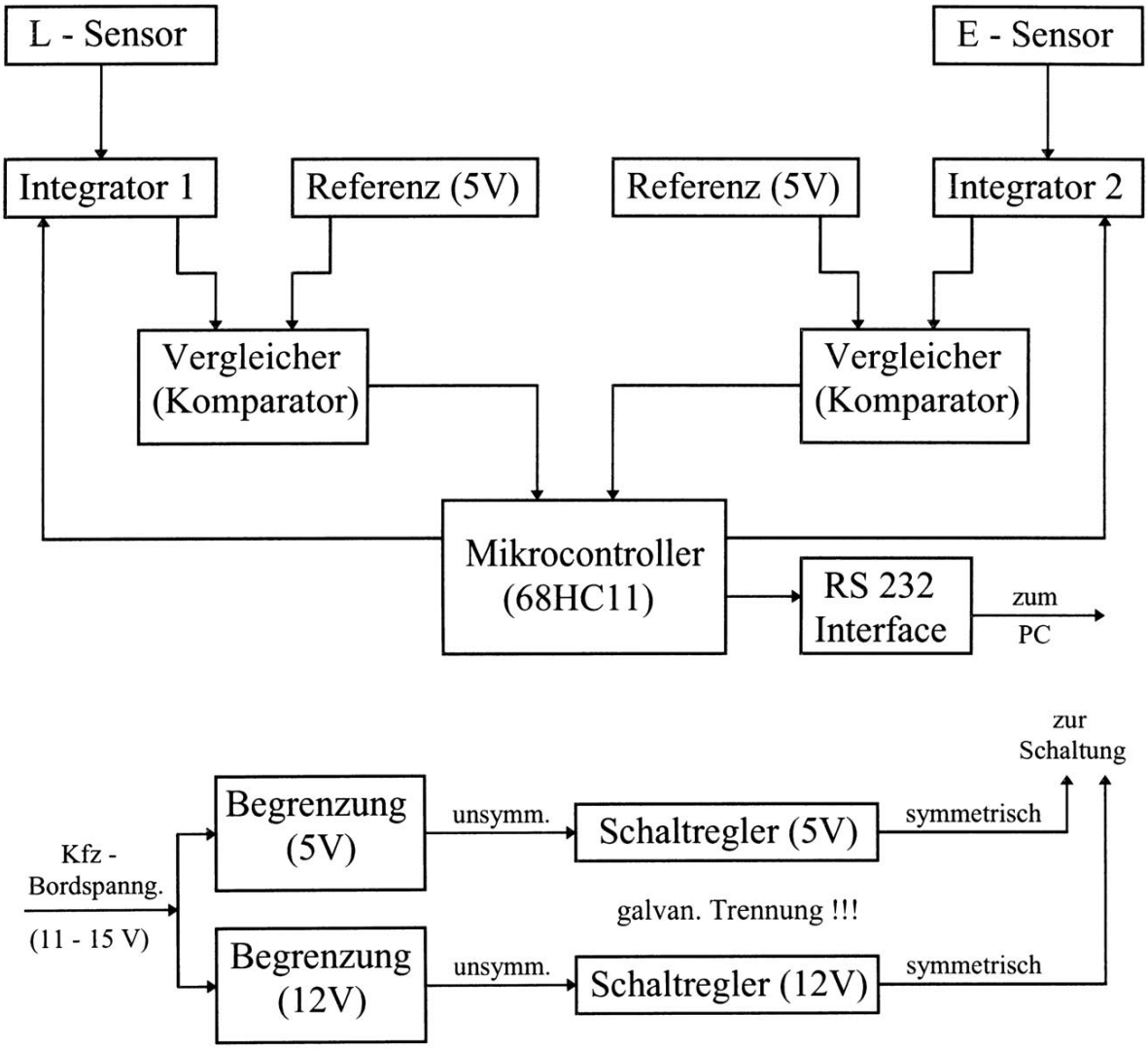


Bild 2: Funktionsstruktur des zweikanaligen Meßsystems

Um die Funktionsweise der Schaltung zu verstehen, geht man im oberen Schaltungsteil zunächst vom entladenen Zustand der beiden Integratoren aus. Diese

werden vom Mikrocontroller zu einem bestimmten Zeitpunkt (Messung-Start) gleichzeitig freigegeben und laden ihre Integrationskondensatoren entsprechend dem am Eingang fließenden Fotostrom auf. Durch die Integration wird bei schwankenden Fotoströmen eine Mittelwertbildung realisiert, so daß dann der mittlere fließende Strom wirksam ist. Der Ausgangspegel der beiden Integratoren gelangt gemeinsam mit dem Spannungspegel einer hochtemperaturstabilen Referenzquelle (5 Volt) auf einen Vergleicher (Trigger), welcher bei Gleichheit beider Spannungen eine LOW-HIGH-Flanke generiert und diese an den Mikrocontroller weiterleitet. Dieser detektiert die Flanke (Messung-Ende), ermittelt die Integrationszeit zwischen Messung-Start und Messung-Ende und leitet das Ergebnis über eine serielle Schnittstelle an einen PC zur Datenauswertung weiter. Da ein einfacher Vergleicher nicht über definierte Flankensteilheiten verfügt, wurden die implementierten Trigger in der praktischen Schaltung als Schmitt-Trigger realisiert. Es wird also der schwierig meßbare, weil sehr kleine Fotostrom in eine Zeit umgewandelt, welche zum fließenden Fotostrom umgekehrt proportional ist und mittels Mikrocontroller wiederum sehr genau gemessen werden kann. Nachdem der Controller beide Integratoren (Integrationskondensatoren entladen) zurückgesetzt hat, kann die nächste Messung erfolgen.

Dieses Verfahren birgt einige wesentliche Vorteile in sich:

- Das dem Fotostrom anhaftende Rauschen ist ein stochastisches Signal und wird bei der Integration weitgehend eliminiert.
- Durch variable Integrationszeiten (konkret: max. 5 sek) ist ein extrem großer Dynamikbereich überstreichbar und es ist dazu keine Meßbereichsumschaltung erforderlich.
- Da der Controller die Integrationszeit als eine Anzahl Zeitscheibchen konstanter Größe abspeichert, steigt die digitale Auflösung des Gerätes bei kleiner werdenden Fotoströmen. Signaldifferenzen sind deshalb gerade bei kleinen Strömen genauer erfaßbar als bei großen (konkret schwankt die Auflösung zwischen 10 ... 23 Bit).

Noch einige Bemerkungen zur Stromversorgung des Meßsystems: Die gesamte Schaltung wurde für einen Betriebsspannungsbereich von 11 ... 15 Volt (Kfz-Bordnetz) ausgelegt. Der Analogteil der Schaltung arbeitet mit 12 Volt, ist aber gegen Spannungsabsenkungen bis ca. 10 Volt unempfindlich, da die Integratorausgangspegel bis zum Schalten der Trigger maximal 5 Volt betragen müssen. Der Digitalteil hingegen arbeitet mit einer Betriebsspannung von 5 Volt. Beide Spannungen werden zunächst begrenzt und stabilisiert. Anschließend gelangen sie auf spezielle integrierte Schaltregler, welche zum einen die benötigte symmetrische Spannung erzeugen und zum anderen die komplette galvanische Entkopplung des gesamten Meßsystems vom Kfz-Bordnetz realisieren. Störende Masseschleifen über die serielle Schnittstelle zum PC und über dessen Stromversorgung aus dem Bordnetz sind somit ausgeschlossen.

5. Struktur der Betriebssoftware

Im nachfolgenden Bild 3 wird der Ablauf der Steuerungssoftware (Assemblerteil) in vereinfachter Form gezeigt:

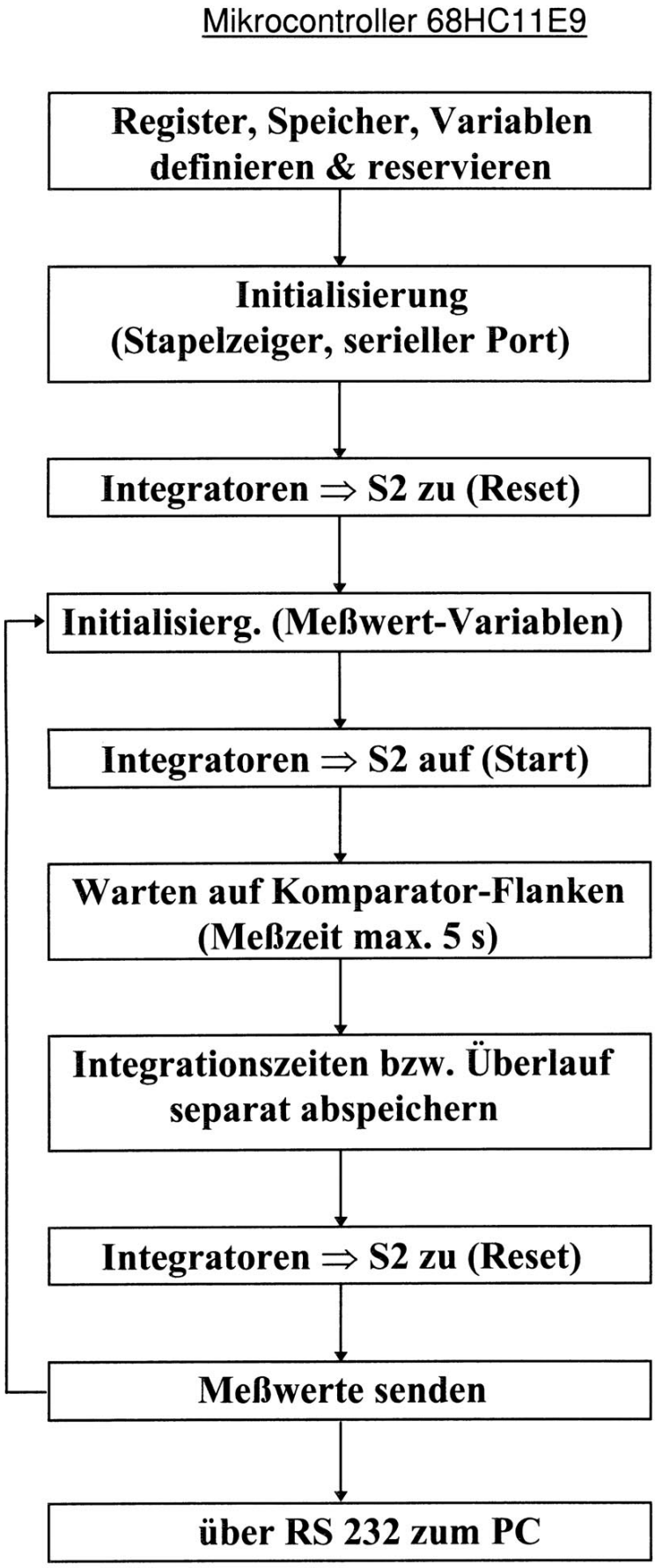


Bild 3: Vereinfachte Struktur der Betriebssoftware (Assemblerteil)

Hierbei ist anzumerken, dass die Integrationskondensatoren vor dem Meßbeginn nicht nur entladen werden, sondern auch der Integratoreingang bis zum Start der Messung gegen Masse kurzgeschlossen wird. Diese Maßnahme wirkt der Aufladung der Sperrschichtkapazität des Sensors entgegen, der vor Meßbeginn bereits einem Lichteinfall ausgesetzt sein kann. Ohne Kurzschluß vor der Messung würde seine „Ruheladung“ voll in das Meßergebnis eingehen und es verfälschen. Die Integrationszeiten werden im Mikrocontroller durch einen rotierenden 16-Bit Zähler erfaßt, dessen Überlaufsanzahl („Vorkommastellen“) und Stand beim Ende der Messung („Nachkommastellen“) separat abgespeichert und übertragen werden. Die Flankendetektion im Controller erfolgt dabei durch implementierte Baugruppen entsprechend dem Quarztakt verzögerungsfrei in Echtzeit.

6. Genauigkeit des Meßsystems

Da das verwendete Integrationsmeßprinzip als Single-Slope-Verfahren implementiert wurde, mußte bei der Approximation der Systemübertragungsfunktion, welche das nichtlineare Verhalten des gesamten Meßsystems beschreibt, mit größter Sorgfalt gearbeitet werden. Bereits kleinste Abweichungen führen zu extrem großen Anzeigefehlern der ausgegebenen Meßwerte.

Die nachfolgenden Bilder 4 bis 6 zeigen die Linearitätsfehler des Meßsystems am Beispiel des Beleuchtungsstärkekanals und des Leuchtdichtekanals (5° und 10° Erfassungswinkel). Gemittelt liegen diese Fehlerwerte in einem Bereich zwischen 6 ... 8%.

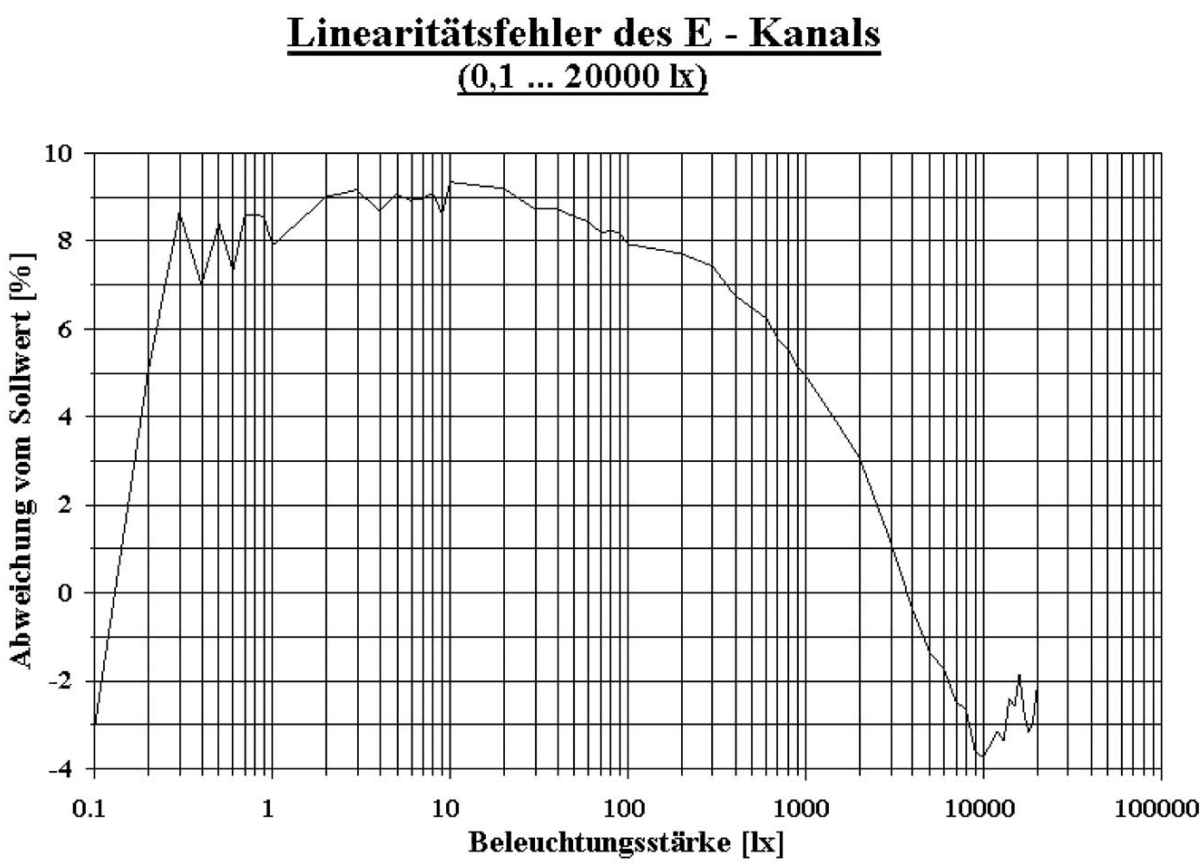


Bild 4: Linearitätsfehler des Beleuchtungsstärkekanals

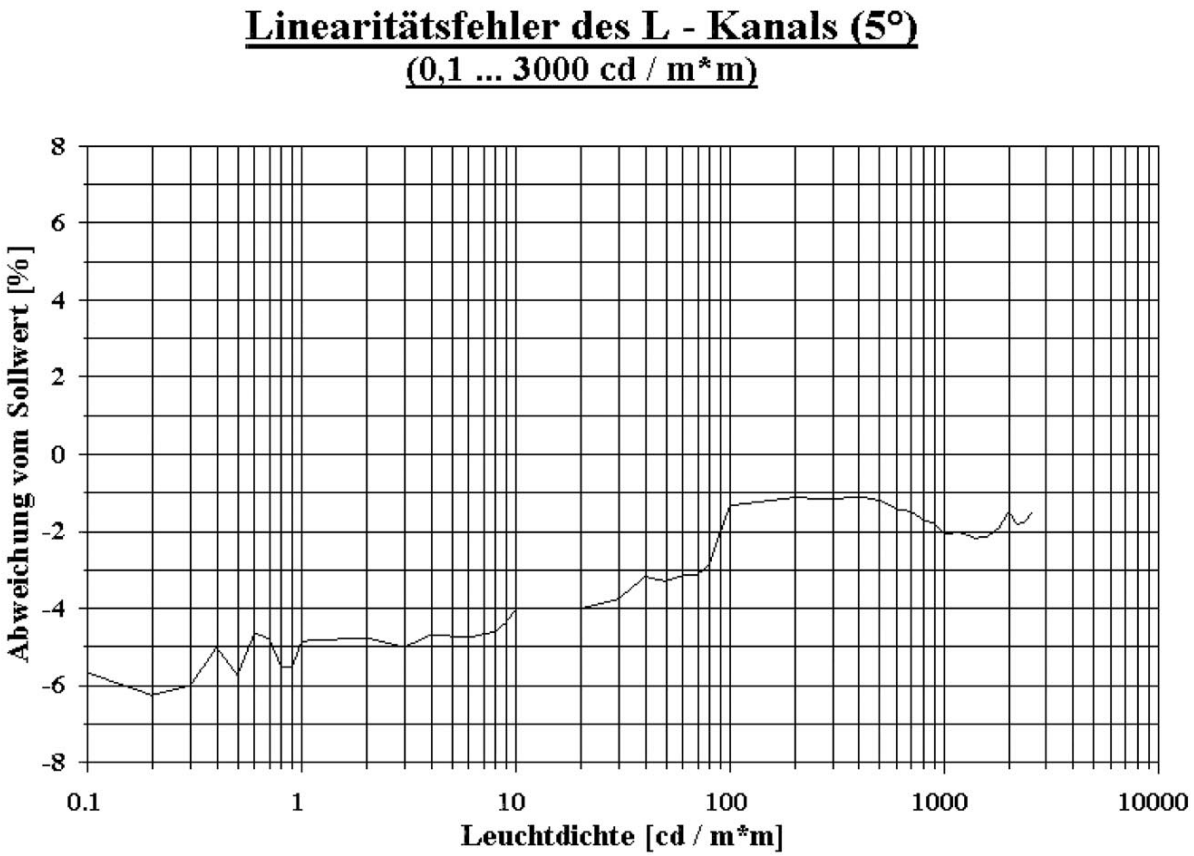


Bild 5: Linearitätsfehler des Leuchtdichtekanals (5°)

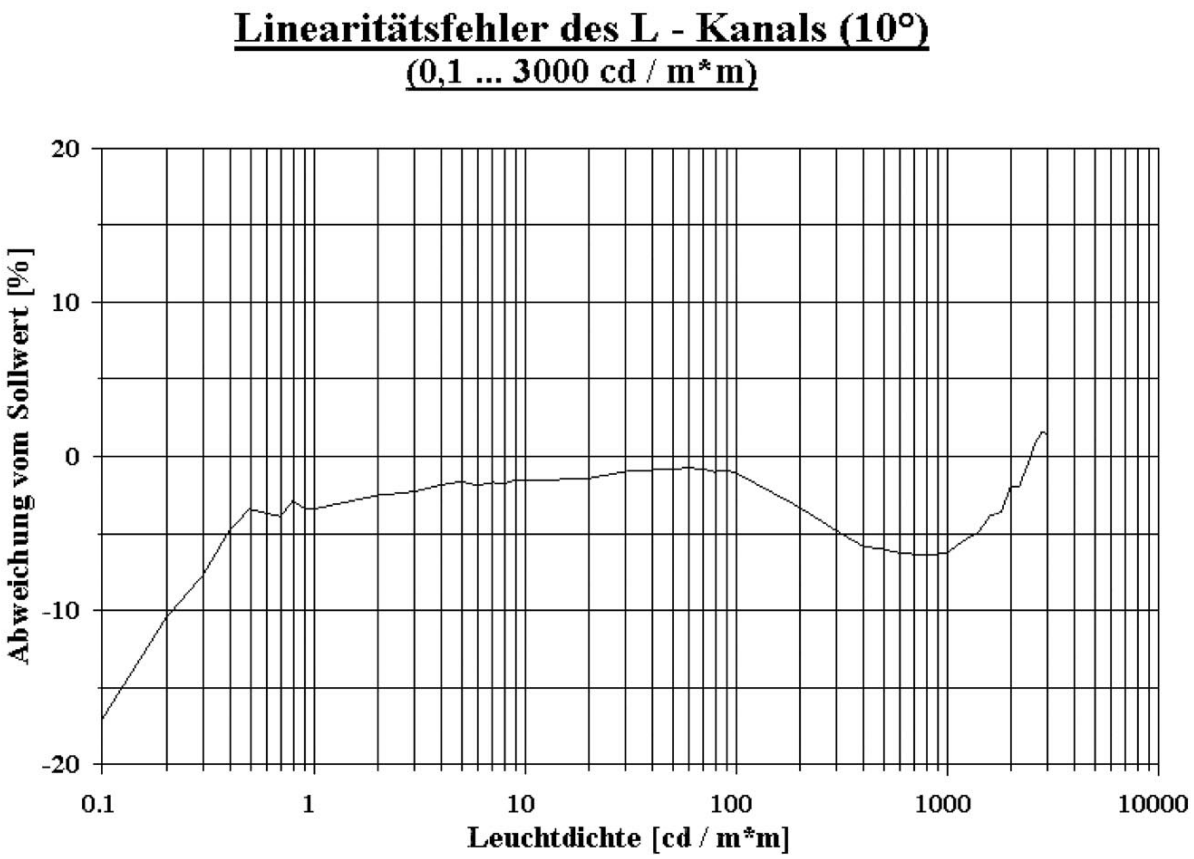


Bild 6: Linearitätsfehler des Leuchtdichtekanals (10°)

7. Ausblick

Die beschriebene Meßgeräteentwicklung hat gezeigt, daß es mit hochempfindlichen Transimpedanzverstärkern (geschaltete Integratoren) gekoppelt mit einem Single-Slope-Meßverfahren bereits möglich ist, genaue Lichtmeßgeräte (Linearitätsfehler 6 ... 8%) mit extrem großen Dynamikbereichen ohne Meßbereichsumschaltung zu bauen. Im konkret entwickelten Gerät liegt ein solcher Bereich beispielsweise für die Beleuchtungsstärke bei 0,1 ... 20000 lux. Wenn mehr Meßzeit als 5 Sekunden zur Verfügung steht, kann dieser Bereich auch noch erheblich aufgeweitet werden. Ein wesentlicher Vorteil liegt auch in der steigenden digitalen Auflösung des Meßsystems (bis auf 23 Bit) bei kleiner werdendem Eingangssignal. Die Grundauflösung am oberen Dynamikbereichsende wurde hierbei auf 10 Bit festgelegt. Da die verwendeten Transimpedanzverstärker Eingangsfehlerströme (BIAS) von -14,3 fA ... -40,4 fA aufwiesen, ist eine Fotostrommessung bereits ab 50 fA denkbar.

Die verwendeten Transimpedanzverstärker sind im Datenblatt mit einem maximalen Eingangsfehlerstrom von 750 fA ausgewiesen, wobei meßtechnisch nur max. 40,4 fA ermittelt wurden (reproduzierbar!!!). Neuere Entwicklungen am Halbleitermarkt haben laut Datenblättern nur noch Eingangsfehlerströme von max. 100 fA. Wenn sich dort die Größenordnung ähnlich wie bei den hier eingesetzten Verstärkern verhält, besteht eine reale Chance, bei der Fotostrommessung in den nächstkleineren, den Attoamperebereich vorzustoßen. Durch das Integrationsverfahren sollten auch in diesen Bereichen den Fotoströmen überlagerte Rauschströme (stochastische Signale) keine Rolle spielen.

Verbesserungen bei der beschriebenen Meßsystementwicklung sind hardwareseitig vor allem in der Temperaturstabilisierung der Sensoren und Transimpedanzverstärker (Peltierkühlung) und dem Einsatz von Triggern mit exakt definierten Flankensteilheiten zu sehen. Auch das Platinendesign ist sehr sorgfältig nach Herstellerempfehlungen vorzunehmen (strikte Trennung von Analog- und Digitalteil), wobei den Meßverstärkereingängen besondere Beachtung zu schenken ist. Softwareseitig ist die genaue Ermittlung (Messung) der nichtlinearen Systemübertragungsfunktion und ihre möglichst exakte mathematische Abbildung (Approximation) für genaue Meßwertanzeigen unumgänglich.

Abschließend zu diesem Beitrag wird im Bild 7 die Hardware des entwickelten Meßsystems gezeigt.

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

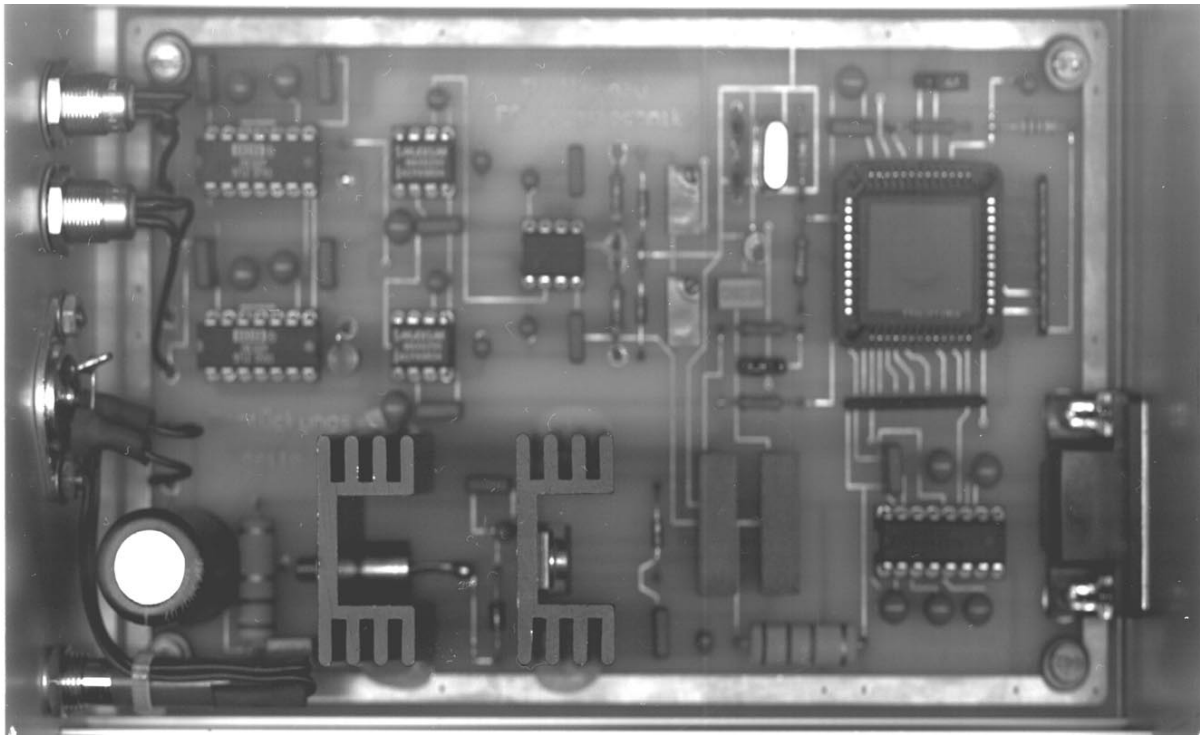


Bild 7: Blick auf die Hardware des entwickelten Meßsystems (ohne Sensoren)