

# Lichtbogenentstehung und Lichtbogendetektion im neuen 42 V Bordnetz für Kraftfahrzeuge

## Projektleiter

Prof. Dr.-Ing.  
Manfred Krüger

## Zeitraum

2003 – 2004

## Wiss. Mitarbeiter

Antonios Katirzidis  
Marco Li Puma  
Christian Sommer

## Kooperation

Rolf Herrmann  
Fa. Hella KGaA  
Lippstadt  
Ulrich Stich  
Fa. Hella KGaA  
Lippstadt

## Förderung

Bundesministerium für  
Bildung und Forschung:  
Anwendungsorientierte  
Forschung und Entwick-  
lung an Fachhoch-  
schulen (aFuE)

## Kontakt

Prof. Dr. Ing.  
Manfred Krüger  
Fachbereich  
Informations- und  
Elektrotechnik  
Fachhochschule  
Dortmund  
Sonnenstraße 96  
44139 Dortmund  
Tel.: (0231) 9112-152  
E-Mail:  
manfred.krueger  
@fh-dortmund.de

## Kurzfassung

Bei der Einführung einer Bordnetzspannung größer als 35 V können sich bei Wackelkontakten oder Isolationsproblemen Lichtbögen auch im Gleichstromnetz eines Kraftfahrzeugs bilden, die von sich aus nicht schnell verlöschen. Aufgrund der hohen Temperatur in einem derartigen Lichtbogen (größer 2000 Grad C) kann der Kunststoff, aus dem in der Regel Steckverbinder im Kraftfahrzeug bestehen, schmelzen oder sogar anfangen zu brennen mit der Folge eines möglichen Fahrzeugbrandes. Dieses stellt eine sehr gefährliche Situation für die Insassen und der anderen Verkehrsteilnehmer dar und muss unter allen Umständen vermieden werden.

Die sicherste Möglichkeit ist die Erkennung eines Lichtbogens im Bordnetz in Verbindung mit einer intelligenten Abschaltestrategie der betroffenen Leitungsstränge.

Daher ist die Aufgabe dieses Forschungsprojekts die Erkennung von Lichtbögen am Gleichspannungs-Bordnetz eines Kraftfahrzeugs mit höheren Bordnetzspannungen.

Dazu wurde zunächst eine geeignete Energiequelle, bestehend aus einem Fahrzeuggenerator (geregelt auf 42 V und angetrieben von einem Elektromotor) und einer 36 V Batterie (Prototyp) aufgebaut. Zur Erzeugung der Lichtbögen war die Konzeptionierung, Konstruktion, Aufbau, Inbetriebnahme und Test einer präzise gesteuerten Verfahreineinrichtung mit hoher Geschwindigkeit und großen Kräften erforderlich. Besonders die Erzeugung von parallelen Lichtbögen (Batterie-Kurzschluss) stellt hohe Anforderungen an die Sicherheitseinrichtungen, damit das Gerät gefahrlos betrieben werden kann.

Im Zuge der Auswertung der so reproduzierbar erzeugten Lichtbögen konnte festgestellt werden, dass die hier auftretenden Lichtbögen ein elektromagnetisches Spektrum in Form eines weißen Rauschens im Frequenzbereich 100 Hz bis 100 kHz (und darüber hinaus) erzeugen.

Im weiteren Verlauf war es dann möglich, eine Auswertestrategie zu definieren, die trotz der auf einem Kraftfahrzeugbordnetz in der Praxis vielfältig vorhandenen zusätzlichen Störsignale eine sichere Erkennung der Lichtbögen ermöglicht.

Für eine mögliche Umsetzung in ein Kraftfahrzeug musste dann eine elektronische Lösung gefunden werden, die auf der einen Seite die besonderen

elektrischen und elektronischen Umgebungsbedingungen in einem Kraftfahrzeug berücksichtigt, auf der anderen Seite aber auch für eine spätere Serieneinbindung kostenoptimal ist. Dieses konnte durch eine neuartige Kombination eines Mikrocontrollers mit einem sog. Switched-Capacitor-Filter (SCF) erreicht werden. Der sich daraus ergebende Hardware- und Softwareaufwand ist relativ gering. Ein schaltungstechnischer Aufbau (Prototyp) wurde erstellt und an dem aufgebauten Bordnetzsimulator mit der Lichtbogen-Erzeugungseinheit ausführlich getestet.

Um diesen Test zu intensivieren fand eine Erweiterung durch ein beispielhaftes Test-Bordnetz, bestehend aus diversen Lasten für 42 V (Motoren, Heizeinrichtungen, DC-DC-Wandler, Beleuchtungseinrichtungen) statt.

Als Ergebnis ist festzuhalten:

Der elektronische Prototyp, in den die gefundenen Auswertestrategie implementiert worden ist, funktioniert auch bei unterschiedlichen Bordnetzsituationen und Lichtbogeneinstellungen sehr gut. Damit ist das Ziel, das auch für den industriellen Projektpartner (Fa. HELLA KGaA, Lippstadt) sehr wichtig ist, erreicht worden.

Das gefundene neuartige Auswerteverfahren basiert auf dem Prinzip eines gesteuerten Bandfilters, mit dem ein definierter Frequenzbereich schnell periodisch abgetastet werden kann und möglicherweise vorhandene Spektralanteile festgestellt werden. Die Unterscheidung, ob ein breitbandiges Rauschen (Lichtbogen) oder ein periodischer Störer (z.B. PWM) vorliegt, kann durch einen Vergleich von mehreren Durchläufen und einer einfachen Softwareauswertung festgestellt werden. Außerdem ist ein adaptives Verhalten an verschiedene Situationen realisierbar.

Für dieses Verfahren ist inzwischen vom deutschen Patentamt eine Patenterteilung erfolgt (Pat. Nr. 103 59 532, "Verfahren und Vorrichtung zur Erkennung einer breitbandigen Rauschquelle in einem Gleichspannungs-Verteilnetz"). Die internationale Anmeldung ist in Bearbeitung.

## 1 Einleitende Bemerkungen

Die derzeitige Situation auf dem Gebiet der Kraftfahrzeuge bezogen auf den Kraftstoffverbrauch ist gekennzeichnet von der Diskussion über die Umweltverträglichkeit zukünftiger Fahrzeuggenerationen. Die Hauptproblematik

liegt dabei in der Aufgabenstellung, den Ausstoß des Treibhausgases CO<sub>2</sub> zukünftig weiter zu reduzieren. So ist vorgesehen, im Jahre 2008 einen durchschnittlichen Wert von 140 g CO<sub>2</sub>-Ausstoß pro gefahrenen Kilometer zu erreichen. Nach Planungen der Europäischen Automobilindustrie (ACEA) soll dieser Wert dann bis zum Jahre 2012 auf 120 g/Km weiter gesenkt werden.

Um diese Senkung des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes zu erreichen, sind verschiedenen Maßnahmen denkbar. Zum einen sind das Verbesserungen im Antriebssystem (Verbesserung der Wirkungsgrade der Motoren), zum anderen aber auch neuartige Antriebe, wie z.B. der Hybridantrieb. Für beide gilt, eine weitere Reduktion des Schadstoffausstoßes ist nur möglich, wenn wichtige Aggregate im Fahrzeug, die heute permanent vom Motor angetrieben werden, zukünftig nur im Bedarfsfall aktiviert werden, wie z.B. der Hilfsantrieb für die Servolenkung oder Hydraulik- bzw. Kühlwasserpumpen. Derartige Antriebe werden elektrisch sein und in ihrer Aktivierungsphase erhebliche elektrische Spitzen-Energien benötigen.

Mit den heute in den Fahrzeugen vorliegenden Energiesystemen auf 14 Volt Basis (Generator, Batterie, Starter) ist das nicht möglich oder nur mit erheblichen Verlustleistungen realisierbar, da der bis jetzt für die in Fahrzeugen verwendeter Klauenpolgenerator einen sehr kleinen Wirkungsgrad aufweist (ca. 30 bis 40 %).

Daher wurde die Einführung einer neuen Spannungsebene in Kraftfahrzeugen beschlossen, die eine Verdreifachung der heutigen Spannung darstellt, das 42 Volt Bordnetz (Nennspannung). Diese Spannung ist auf der einen Seite hoch genug, um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden, auf der anderen Seite aber gering genug, um nicht in den Bereich der Berührungsvorschriften zu gelangen, die eine erhebliche Veränderung innerhalb eines Fahrzeug-Bordnetzes bewirken würden (Stecker- und Kabelausführungen usw.). Außerdem ist es möglich, Generatoren zu verwenden, deren Wirkungsgrad deutlich höher ist, z.B. 85% - 90 %.

Im Zuge der Realisation erster Strukturelemente dieses neuen Bordnetzes sind jedoch in der jüngsten Vergangenheit einige Probleme und spezielle Aspekte erkannt worden, die unbedingt zuvor gelöst werden müssen, bevor die flächendeckende Einführung in Angriff genommen werden kann. Ein zentrales Problem ist die Tatsache, dass Spannungen im 42 Volt Bereich und darüber in

der Lage sind, stehende Lichtbögen im Falle von Stecker-Wackelkontakten, Kabelbrüchen oder Kurzschlüssen zu bilden. Derartige Lichtbögen sind energiereich genug, einen Fahrzeugbrand zu verursachen, wenn sie nicht unmittelbar nach dem Auftreten erkannt werden und der dazugehörige Energiestrang abgeschaltet wird.

Theoretische Ergebnisse auf diesem Gebiet sind bisher selten, da die Lichtbogenproblematik in der Vergangenheit meist vor dem Hintergrund des Lichtnetzes (Wechselspannung größer / gleich 110 Volt) gesehen worden ist.

Die Erkennung von Lichtbögen und deren sicheres Abschalten ist also ein zentrales Thema bei der Einführung höherer Spannungsebenen in Kraftfahrzeugen und damit auch bei der zukünftigen Reduktion der Abgasmengen zur Erreichung der geforderten Grenzwerte.

Da dieses Thema auch besonders für die Automobil-Zulieferindustrie wichtig ist, wurde das Projekt zusammen mit der Fa. HELLA KGaA in Lippstadt, Abteilung Kraftfahrzeugelektronik-Vorentwicklung, durchgeführt.

## **2 Aktueller technischer Stand zur Erkennung von Lichtbögen zum Beginn des Projektes**

### **2.1 Das Auftreten von Lichtbögen im technischen Umfeld**

Das Auftreten von Lichtbögen im technischen Umfeld ist alltäglich. Jeder elektrische Schaltvorgang am Lichtnetz, bei der Hochspannungsverteilung oder in technischen Antrieben verursacht einen Lichtbogen im Schaltmoment. Diese Lichtbögen sind in ersten Linie von zwei wichtigen technischen Gegebenheiten gekennzeichnet:

- Es liegt ein Betrieb an eine Wechselstromnetz vor. Das heißt, ein sich bildender Lichtbogen im Zuge eines Last-Schaltvorgangs wird beim nächsten Nulldurchgang der Wechselspannungs-Sinusschwingung unterbrochen (d.h. faktisch gelöscht).
- Die effektive Nennspannung beträgt über 230 V (in Europa) bzw. über 110 V (in den USA).
- Die Schaltvorgänge stellen Einzelimpulse dar. In der Regel verlöscht der Lichtbogen schnell. Beim Schalten von Hochspannungsverteilern (Umspannwerke) werden besondere Maßnahmen ergriffen, um die Löschung eines Lichtbogens zu bewirken, die hier jedoch nicht näher erläutert werden sollen.

Ein andere Kategorie stellen Kurzschlüsse dar. Auch hier kann eine Unterscheidung erfolgen:

- Kurzschlüsse, die „nutzbringend“ verwendet werden, wie z.B. das Elektroschweißen.
- Kurzschlüsse, die zerstörend wirken würden (Isolationsbruch). Diese werden in der Regel durch vorgeschaltete Sicherungen abgefangen.

## 2.2 Bekannte Auswertestrategien

Besonders bei hohen Strömen und der relativ geringen Nennspannung von 110 V (USA) können auch Lichtbögen entstehen, die nicht selbstständig verlöschen und durch eine Sicherung auch nicht sofort als solche detektiert werden können. Daher werden in den USA Lichtbogen-Detektoranordnungen beim Lichtnetz verwendet, die dann eingreifen.

Die dort eingesetzten Verfahren basieren in der Regel auf der Erkennung von einer oder zwei Spektrallinien auf dem Wechselspannungsnetz, die charakteristisch sind beim Auftreten derartiger Lichtbögen. Diese Verfahren sind bekannt und basieren meist auf der Verwendung klassischer Bandfilter aus Spulen und Kondensatoren zur Detektion dieser Frequenzen mit nachgeschalteten Gleichrichtern und Pegeldetektoren zur Erzeugung eines Ausschaltesignals.

## 2.3 Die Situation im Kraftfahrzeug

In einem Kraftfahrzeug liegt eine grundlegend andere Situation vor. Der Hauptunterschied liegt in der Tatsache, dass hier ausschließlich Gleichspannungsnetze zum Einsatz kommen. Außerdem ist die Bordnetzspannung relativ gering:

- Das 14 V Bordnetz (Nennspannung) für PKW und LKW in den USA
- Das 28 V Bordnetz (Nennspannung) für LKW und Busse in Europa

Die vorkommenden Lastströme weisen oft erhebliche Werte auf. So kann bei einem Startvorgang ein kurzzeitiger Strom bis 1000 A fließen, im Normalbetrieb sind 100 bis 140 A in Summe möglich. Innerhalb dieser Bordnetze sind bei Schaltvorgängen von höheren Strömen Schaltblitze durchaus möglich und treten auch häufiger auf. Bezüglich möglicher **stehender** Lichtbögen ist folgendes festzustellen:

Beim 14 V Bordnetz ist die Energie in einem Kontaktblitz zu gering, um einen dauerhaften

Lichtbogen auszubilden. Das wurde im Rahmen des Forschungsprojekts nochmals durch entsprechende Untersuchungen bestätigt.

Beim 28 V Bordnetz konnte zwar unter günstigsten Umständen ein kleiner Lichtbogen bei einem Kurzschluss über einige Sekunden erzeugt werden, jedoch erforderte das eine präzise und unveränderte Kontaktsituation, aufgebaut in einem Messlabor, wie sie in einem sich in Betrieb befindlichen Fahrzeug nicht nachbilden lässt.

Als Resultat kann festgestellt werden, dass unter Betrachtung der realen Verhältnisse in einem Kraftfahrzeug bei einem 14 V- oder 28 V-Bordnetz stehende Lichtbögen nicht vorkommen. Mögliche Kontaktblitze während eines Schaltvorgangs sind hier selbstverlöschend.

Eine andere Situation ergibt sich bei Verwendung höherer Bordnetzspannungen, wie z.B. 42 V Nennspannung oder noch höher, wie es bei Hybridfahrzeugen heute schon ist bzw. zukünftig vermehrt der Fall sein wird. Dort sind in einem Fehlerfall durchaus Lichtbögen möglich, die über einen längeren Zeitraum stabil brennen (im Extremfall dauernd, minutenlang) und in dieser Phase erhebliche thermische Energien freisetzen, die ein Fahrzeug in ungünstigen Situationen durchaus in Brand setzen können.

## 3 Theoretische Überlegungen zu einem Bordnetz mit höheren Spannungen in einem Kraftfahrzeug

### 3.1 Das Bordnetz eines Kraftfahrzeuges als kleines Inselnetz

Bei einem Bordnetz im Kraftfahrzeug handelt es sich um ein kleines Inselnetz, das im Wesentlichen aus einem zentralen Generator zur Energieerzeugung, aus einer Batterie zur Energiespeicherung, einem Kabelbaum zur Energieverteilung und aus einer Vielzahl von elektrischen und elektronischen Verbrauchern besteht.

Jeder Schaltvorgang auf diesem Bordnetz führt auf Grund der elektrischen Grundgesetze zur Ausbildung von elektrischen und magnetischen Feldern, die sich gegebenenfalls auf dem Bordnetz oder drahtlos ausbreiten können. Da im praktischen Betrieb ständig eine große Zahl von elektrischen und elektronischen Verbrauchern ein- bzw. abgeschaltet werden, hat man es im Allgemeinen auf einem Bordnetz innerhalb eines Kraftfahrzeuges mit einer erheblichen Störbelastung zu tun.

Diese Störlastung kann nun in einem Fehlerfall von einem kleinen zusätzlichen Störsignal überlagert werden, das von einem stehenden Lichtbogen herrührt.

Wie bereits in der Einleitung dargestellt ist es ein Ziel des Forschungsprojekts, diese zusätzlichen Signale zu erkennen und durch eine kraftfahrzeugtaugliche Auswertung zu detektieren.

### 3.2 Periodische und aperiodische Störsignale auf dem Bordnetz

Das Bordnetz eines Kraftfahrzeuges ist gekennzeichnet von einer Vielzahl von elektrischen Störungen, die zum einen direkt über Leitungen übertragen werden, zum anderen aber auch durch Einstrahlung über die Luft. Dieses Themengebiet wird im Allgemeinen mit der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) bezeichnet und verursacht besonders in Kraftfahrzeugen in der Praxis erhebliche Probleme. Daher ist zu erwarten, dass die im Zuge des Forschungsprojekts zu definierende Auswertestrategie mit der im Kraftfahrzeug vorkommenden EMV-Situation sicher umgehen können muss.

Hauptsächlich sind periodische- und aperiodische Vorgänge auf dem Bordnetz zu unterscheiden.

Auch bei Bordnetzen mit höheren Spannungsebenen wird in der Praxis mit den Fehlersituationen zu rechnen sein, wie sie auch beim 14 V oder 28 V Bordnetzen vorkommen:

- harte Kurzschlüsse mit Absicherung
- harte Kurzschlüsse ohne Absicherung (z.B. beim Unfall)
- schleichende Kurzschlüsse
- Leitungsunterbrechungen (serielle Unterbrechungen)
- Unterbrechungen in den Steckerkörben (Steckkontakten)
- Fehler in der Aktuatorik

Zusätzlich muss beachtet werden, dass bei Spannungen oberhalb von ca. 35 V eine Stromunterbrechung unter Verwendung einer Sicherung zum derzeitigen Zeitpunkt aufgrund fehlender Sicherungselemente noch nicht sicher möglich ist.

Eine einfache Schmelzsicherung birgt hier die Gefahr, dass sich beim ihrem Auslösen ein stehender Lichtbogen bildet, der dann eine potentielle Brandstelle darstellt, obwohl als

auslösende Fehlersituation nur eine relativ harmlose Überlastung auf Seiten eines Aktuators vorgelegen hat.

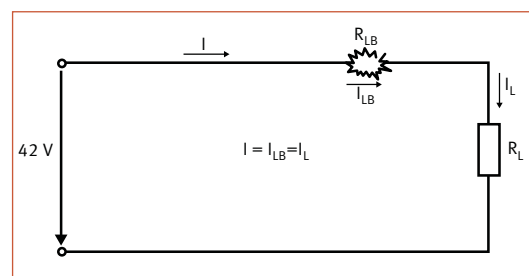
Es sind für dieses Umfeld (Einsatz von Schmelzsicherungen) bei höheren Bordnetzspannungen noch Weiterentwicklungen seitens der Industrie erforderlich. Das wird im Folgenden hier nicht weiter betrachtet.

## 4 Lichtbögen bei Bordnetzen mit höheren Spannungen

Bei den Lichtbögen sind zwei verschiedene Formen zu unterscheiden, den seriellen Lichtbogen und den parallelen Lichtbogen

### 4.1 Der serielle Lichtbogen

Wenn der Lichtbogen LB in Reihe zur Last RL auftritt, wie in Bild 6.1 dargestellt, dann spricht man von einem seriellen Lichtbogen.



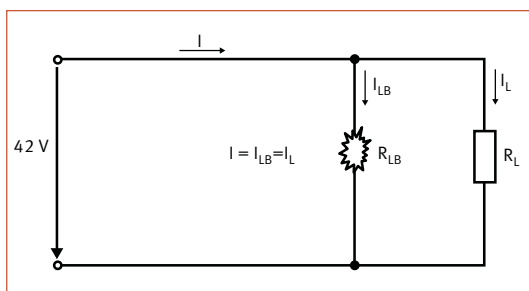
Serielle Lichtbögen können z. B. durch verschiedenen Situationen hervorgerufen werden:

- Kabelbruch
- Wackelkontakt in einem Steckerkorb
- Unterbrechungen in einem Aktuator
- Beim Ziehen oder Zusammenfügen einer Steckverbindung oder Sicherung

Sie sind nicht so energiereich wie parallele Lichtbögen, aber darin liegt auch die Gefahr dieser Lichtbogenart, denn der Strom im Lastkreis steigt nicht, wie im normalen Kurzschlussfall sonst üblich, stark an, sondern er wird durch den zusätzlichen Widerstand  $R_{LB}$  des Lichtbogens sogar noch verringert. Und auch wenn der serielle Lichtbogen nicht sehr energiereich ist, so reicht er aus, um unter Umständen zum Fahrzeugbrand zu führen.

Eine herkömmliche Sicherung löst hier im Lichtbogenfall nicht aus, da der hierzu nötige Schwellenwert des Stromes nicht erreicht wird. Aus Sicht einer elektronischen Steuerung ist

ein serieller Lichtbogen im Aktuatorzweig daher zunächst keine Störung.



#### 4.2 Der parallele Lichtbogen

Das Bild zeigt, dass der Lichtbogen in diesem Fall in einem parallelen Zweig zur Last bzw. zur Batterie auftritt. Entstehen können solche Lichtbögen durch Schäden an der Isolierung der die Last mit Strom versorgenden Leitung.

Das Hauptaugenmerk beim parallelen Lichtbogen richtet sich auf die hohe Leistungsdichte und die somit hohe Brandgefahr. Überall da, wo ein solcher Lichtbogen auftritt, ist mit starken Schäden durch den Lichtbogen zu rechnen. Dies ist auch ein Grund, weshalb es wichtig ist, Vorsichtsmaßnahmen zu treffen, wenn derartige Lichtbögen im Labor untersucht werden sollen.

Zudem muss die große Menge an Energie, bis hin zu einigen Kilowatt, bereitgestellt werden. Im Gegensatz zum seriellen Lichtbogen erhöht sich hier zwar der Strom, d. h. dieser könnte eventuell den Schwellenwert für den maximalen Strom überschreiten und somit theoretisch eine Sicherung auslösen, allerdings sind die herkömmlichen Sicherungselemente hierfür meist zu träge. Der starke Anstieg des Stromes würde bereits vor Auslösen einer Sicherung erhebliche Schäden anrichten.

Die Lösung wäre eine schnelle Lichtbogendetektion und Abschaltung.

Dieser parallele Lichtbogen ist als sehr kritisch einzustufen, da im Extremfall die Bordnetzatterie auch komplett kurzgeschlossen werden kann und somit Ströme bis über 1000 A auftreten können, was die Batterie sehr schnell überhitzt.

Derartige Situationen sind sehr sicherheitskritisch und können im Extremfall sogar zur Explosion der Batterie führen (Knallgasbildung). Diese Überlegungen sind bei der Definition der Lichtbogeneinheit (LIBO) mit berücksichtigt worden.

#### 4.3 Erste Versuche zu Lichtbögen im Vorfeld des Projektes

Im Vorfeld des Forschungsprojekts wurde zunächst eine Einrichtung geschaffen, mit der eine prinzipielle Untersuchung hinsichtlich des Erzeugens von Lichtbögen möglich war.

Es handelt sich dabei um eine kleine Verfahrenseinrichtung auf Basis eines einfachen mechanischen Aufbaues, mit der Lichtbögen qualitativ erzeugt werden können (siehe Abb. 3).



Abb. 3: Der mechanische Aufbau einer einfachen Lichtbogen-Erzeugungseinheit

Aufgrund der Tatsache, dass mit diesem System nur kleine Verlustleistungen sicher beherrscht werden können, ist diese Messeinrichtung nur für serielle Lichtbögen bei kleinen Strömen einsetzbar. Die Steuerung erfolgt unter Verwendung einer Ansteuerelektronik und einer Steuerung von einem PC aus unter Verwendung von LABVIEW.

Abbildung 4 zeigt ein Beispiel eines stehenden seriellen Lichtbogens unter Verwendung von Relais-Kontakten (Silber-Zinn Oxid), der mit diesem Gerät erzeugt worden ist.

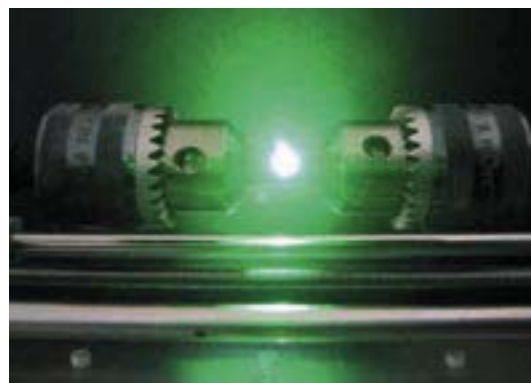


Abb. 4: Stehender serieller Lichtbogen bei 42 V



Diese ersten Versuche haben gezeigt, dass bei einer Bordnetzspannung von 42 V ein stehender Lichtbogen möglich ist. Die minimalen Ströme, die zum Zünden notwendig waren, lagen im Bereich von 4 A - 5 A im Normalbetrieb. Bei brennenden Lichtbogen reduzierte sich dann der Strom auf minimal 2 A.

Im Forschungsprojekt sind nun zunächst Einrichtungen geschaffen worden, die eine ausreichende elektrische Leistung bereitstellen konnten, um hohe bis sehr hohe Ströme auf der 42 V Ebene zu erzeugen.

Darüber hinaus war die Erstellung einer Einrichtung erforderlich, die nicht nur serielle, sondern auch parallele Lichtbögen sicher erzeugen kann und über längere Zeiträume bezüglich der Verlustleistung sicher beherrscht.

Neben der Forderung nach einer sehr hohen Verfahrensgeschwindigkeit waren erhebliche Sicherheitsvorkehrungen erforderlich und zusätzlich die Bereitstellung einer großen mechanischen Antriebskraft, um auch verschweißte Kontakte bei parallele Lichtbögen sicher zu trennen.

## 5 Simulationseinheit für ein Bordnetz mit höheren Spannungen (BORLATOR)

### 5.1 Anforderungen an den Bordnetzsimulator

Folgende Anforderungen wurden an den Bordnetzsimulator gestellt:

- Erzeugung eines ausreichend hohen Stromes zur Simulation von besonderen Vorfällen im Bordnetz
- Primäranschluss am 400 V Drehstrom-Lichtnetz
- möglichst realitätsnaher Betrieb (Verwendung eines 28 V / 85 A Kraftfahrzeug-Generators)
- Verschiedene Anschlussmöglichkeiten für labortechnische Untersuchungen
- Verwendung einer 36 V Batterie (42 V Ladeschlussspannung)
- Mobiler Aufbau

### 5.2 Der technische Aufbau des Bordnetzsimulators

Aus diesen Anforderungen ist folgendes technisches Konzept umgesetzt worden:

- Stabile Rahmenkonstruktion aus Aluminium-Profilen, mit Rollen und Bremsen

- Holz-Arbeitsplatte für Messaufbauten als obere Abdeckung. Auf dieser Platte können Messeräte platziert und Aufbauten getätigt werden.
- 3-Phasen Frequenzumrichter für den Betrieb einer Synchronmaschine, 3 KW. Dieser Umrichter mit seinen Bedienelementen sind in einem Schaltschrank seitlich angebracht.
- Synchronmotor, 3 KW, angetrieben vom Frequenz-Umrichter
- 28 V, 85 A Generator aus einem Bus (isoliert aufgebaut), der vom Synchronmotor angetrieben wird.
- 36 V Prototypen-Batterie der Fa. Hoppecke / Sauerland. Diese Batterie beinhaltet einen neuartigen technischen Aufbau und liefert selbst bei Kälte (-25 Grad C) eine Startleistung größer 6 KW..
- 10 Ohm Hochlast-Regelwiderstand (32 A, 1500 W) um Lasten zu simulieren und Ströme zu begrenzen.
- neuentwickelter 42 V Generatorregler, justierbar. Der vorhandene Regler für 28 V (Bus) musste durch eine Neuentwicklung ersetzt werden, die die Regelung auf 42 V erlaubt. Dieser Regler wurde im Zuge einer Studienarbeit aufgebaut und verwendet zur Steuerung des Erregerfeldes des Generators moderne MOS-Power Transistoren, die für das 42 V Bordnetz entwickelt worden sind.
- Bedienpanel mit Messgeräten und Drehzahlmesser. Um eine schnelle Kontrolle über die gerade vorherrschenden elektrischen Daten im Betrieb zu haben, wurde auf der Arbeitsplatte eine kleine Konsole befestigt, in der sich ein Drehzahlmesser, ein Volt- und Amperemeter befinden. Außerdem kann hier die elektrische Leistung über Hochlast-Kontaktpole entnommen werden.

Abbildung 5 zeigt die elektrische Verkabelung, Abbildung 6 den technischen Aufbau des Borlators.

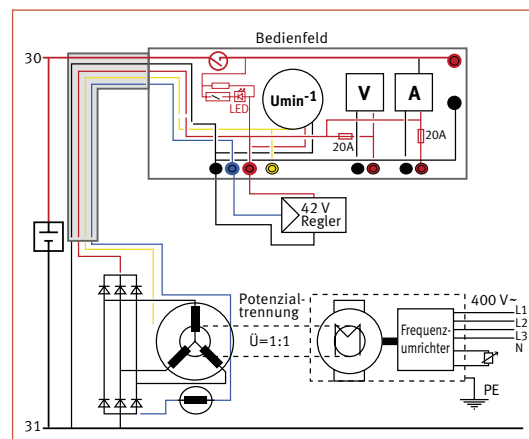


Abb. 5: Elektrischer Aufbau des Bordnetzsimulators (Borlator)



Abb. 6: Der Bordnetzsimulator

### 5.3 Der Betrieb des Bordnetzsimulators

Aufgrund der Tatsache, dass als Primärenergie eine Leistung von max. 3 KW zur Verfügung steht, kann unter Berücksichtigung der mechanischen und elektrischen Verluste davon ausgegangen werden, dass die dauernd abgebbare Leistung im Bereich von ca. 1500 W liegt.

Messungen am vorliegenden Borlator haben gezeigt, dass ein dauernder Maximalstrom von 40 A bei 42 V erreicht wird. Das ist ausreichend, um eine realistische Bordnetznachbildung bereitzustellen. Höhere Ströme (wie z.B. beim parallelen Lichtbogen) werden dann kurzzeitig von der verwendeten Batterie bereitgestellt.

## 6 Die Lichtbogen-Erzeugungseinheit (LIBO-Einheit)

### 6.1 Anforderungen an die Lichtbogen-Erzeugungseinheit

Wie bereits dargestellt, sind die ersten Lichtbögen mit einer kleinen, einfach aufgebauten Einheit gezündet worden. Diese Einheit war nur für serielle Lichtbögen geeignet. Im Folgenden wird nun ein Lichtbogen-Erzeugungssystem beschrieben, das in der Lage ist, parallele Lichtbögen zu erzeugen, auch wenn dabei eine voll geladene 36 V Batterie niederohmig kurzgeschlossen wird.

Um das ohne Sicherheitsrisiko zu ermöglichen, sind einige zusätzliche Überlegungen und Einrichtungen erforderlich.

Vor dem bereits beschriebenen Hintergrund ist es offensichtlich, dass eine Bleibatterie nur für sehr kurze Zeit hart kurzgeschlossen werden darf, da sonst die Gefahr einer Explosion

besteht. Das bedeutet, die Lichtbogen-Erzeugungseinheit darf höchstens einige ms einen Kurzschluss zulassen und muss danach sofort die Kontakte wieder auseinanderfahren. Dieses muss auch möglich sein, wenn die Kontakte beim Zusammenfahren durch den extremen Strom ( $> 1000 \text{ A}$ ) etwas verschweißen. Es ist also eine große mechanische Kraft in Verbindung mit einer hohen Verfahrgeschwindigkeit erforderlich.

Zusätzlich ist der Einbau eines elektronischen Notschalters erforderlich, der für den Fall, dass die Abzugskräfte einmal nicht ausreichen sollten, eine zusätzliche Unterbrechung des Hauptstromkreises ermöglicht. Zuletzt sollte das System noch durch den Einbau einer autark arbeitenden Überwachungselektronik gegen Fehlbedienung geschützt werden.

Ein weiterer Punkt ist die möglichst einfache Erstellung und Übertragung von Fahrprofilen, die ohne spezielle Programmierkenntnisse erstellt werden können, so dass später auch von angelegtem Bedienpersonal eine sichere Bedienung möglich ist.

### 6.2 Besonderheiten bei der Erzeugung von parallelen Lichtbögen

Wie bereits erwähnt, ist besonders die labor-technische Untersuchung von parallelen Lichtbögen mit einer Blei-Säure Batterie als Primär-Energiequelle besonders sicherheitskritisch. Es muss in jedem Fall immer gewährleistet sein, dass der zur Zündung erforderliche Kurzschluss nur max. einige ms anliegt, da sonst die Batterie Schaden nimmt bzw. gefährlich wird. Eine Gefährdung des Bedienpersonals muss in jedem Fall ausgeschlossen sein.

Um dieses zu erreichen sind einige technische Einrichtungen bzw. Festlegungen vorgesehen worden.

### 6.3 Der technische Aufbau der Lichtbogen-Erzeugungseinheit

Aus den genannten Punkten heraus ergibt sich folgende Anforderungstabelle an die Lichtbogen-Erzeugungseinheit:

- Stabile Rahmenkonstruktion aus Aluminium-Profilen, fahrbar und feststellbar
- Hoch präzise Schlittenkonstruktion zur mechanischen Bewegung der Elektroden, spielfrei

- Aufnahme der Testelektroden mit einem Durchmesser von 25 mm unter Verwendung von Keramik-Isolatoren um eine ausreichende Festigkeit auch bei hohen Temperaturen zu erreichen. Die Keramik-Isolatoren wurden extra für diese Applikation angefertigt.
- Leichte Wechselbarkeit der Testelektroden
- 2 KW Gleichstrom-Antriebsmotor für die lineare Schlittenbewegung mit einem 16 Bit Positions-Drehmelder (65536 Stufen)
- 8 KW Steuereinheit der Fa. Berger Lahr zur schnellen Bewegung des Schlittens im Kurzzeitbetrieb (4-fach überlastet). Anschluss am 3-Phasigen 400 V Lichtnetz.
- Mechanische Bewegung: 20 mm Weg in 5 ms
- Steuer-PC zur Programmierung und Überwachung der Steuereinheit mit dem Programmiersystem CODESYS
- Zusätzliche speicher-programmierbare Steuerung (SPS) der Fa. Mitsubishi zur autarken Überwachung und Sicherung der Betriebsabläufe mit Notausfunktion
- Kabel gebundene Fernsteuerung des Systems mit Statusanzeigen und Not-Aus Schalter
- Verschiedene Temperaturüberwachungen und -Anzeigen
- Autarker Betrieb der LIBO-Einheit bei gleichen Verfahrrprofilen ohne externen PC ist möglich
- 1200 A / 72 V Hochlast-Sicherheitsschalter aus 40 parallel geschalteten TEMP-FET Transistoren für max. 72 V zum sicheren Freischalten des Hauptstromkreises, gesteuert von der speicher-programmierbaren Steuerung.
- Not-Aus-Schalter an jeder Seite des Systems
- PC zur Programmierung der Berger-Lahr Steuereinheit und Übertragung der Verfahrrprofile
- Einfache Erstellung neuer Verfahrrprofile unter Verwendung einer Tabellenkalkulation (EXCEL- oder OpenOffice-Tabelle)

Es konnte erreicht werden, dass der zu untersuchende Strompfad (Generator, Batterie, Lichtbogenstrecke) masseseitig isoliert ist und somit beim Messen mit Messgeräten, die über ihren



Abb. 7: Technische Ausführung der Lichtbogen-Erzeugungseinheit mit dem Fernbedienungspult

Schutzleiter mit der allgemeinen Erdung verbunden sind, keine Kurzschlüsse auftreten.

## 7 Ergebnisse aus den Messungen

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse exemplarisch dargestellt, die unter Verwendung der oben beschriebenen Testeinrichtungen aufgenommen worden sind. Es handelt sich hier um eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse, da eine ausführliche Präsentation den Rahmen sprengen würde. Alle hier gemachten Angaben sind an einem 42 V Bordnetz entstanden.

### 7.1 Ergebnisse aus den Messungen von seriellen Lichtbögen (Zusammenfassung)

Wie bereits erwähnt, befindet sich bei einem seriellen Lichtbogen der Aktuatorwiderstand in Reihe zum Lichtbogen. Daher ist es relativ einfach und sicher, einen derartigen Lichtbogen auch über einen längeren Zeitraum brennen zu lassen. Zur Stromsensorik eignet sich hier ein kleiner Messwiderstand in Serie zum Lichtbogen, an dem eine dem fließenden Strom proportionale Spannung entnommen wird. Alternativ ist der Einsatz einer Strom-Messzange möglich. In beiden Fällen erhält man ein dem Stromverlauf proportionales Spannungssignal, das dann eingehender untersucht werden kann.



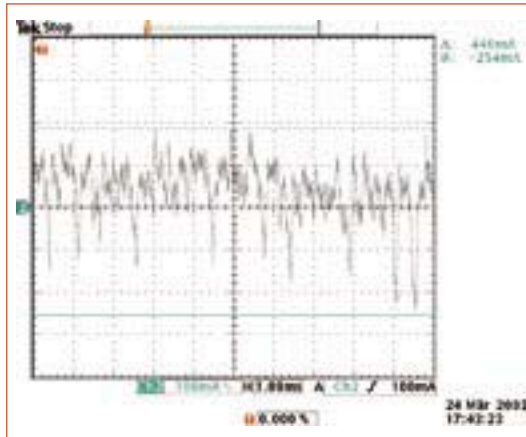


Abb. 8: Typischer Spannungsverlauf bei einem brennenden Lichtbogen (nur Wechselspannungsanteil).

Es ist zu erkennen, dass ein sehr unruhiger Stromverlauf vorliegt. Das war auch nicht anders zu erwarten. Das Bild 7.2 zeigt eine Untersuchung, wie weit sich der Lastwiderstand aus Sicht einer Steuerelektronik bei Vorliegen eines seriellen Lichtbogens verändert.

Es wurden verschiedenen Versuche mit unterschiedlichen Kontaktabständen und Strömen durchgeführt. Als Ergebnis kann festgestellt werden, dass der Lichtbogenstrom bei einem seriellen Lichtbogen in etwa die Hälfte des normalen Aktuatorstromes aufweist.

Für die Erkennung eines Lichtbogens ist das elektrische Spektrum von entscheidender Bedeutung. Das Bild 7.3 zeigt ein typisches Spektrum im Bereich bis 10 kHz bei einem brennenden Lichtbogen.

Es ist zu erkennen, dass sich hier in erster Näherung ein breitbandiges Rauschen ergibt. Es liegen also keine spezifischen Frequenzen vor, bei deren Auftreten ein Lichtbogen vermutet werden könnte. Dieses Erkenntnis ist von zentraler Bedeutung bei der Konzeptionierung eines Detektionsverfahrens.

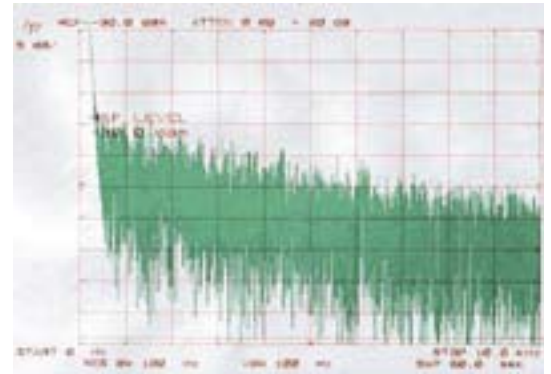


Abb. 9: Typisches Spektrum bei einem brennenden Lichtbogen

Untersuchter Lichtbogen (seriell):

Kontaktwerkstoff:	Silberzinnoxid
Kontaktabstand:	0,6 mm
Laststrom vor Auslösen des Lichtbogens:	5 A
Stromfluss bei brennendem Lichtbogen:	2 A

## 7.2 Ergebnisse aus den Messungen von parallelen Lichtbögen (Zusammenfassung)

Die Untersuchungen eines parallelen Lichtbogens wurden auf eine wesentlich geringere Anzahl von Durchläufen reduziert, da bei jedem Start ein Strom größer 1000 A aufgetreten ist und die Belastung der Batterie erheblich war.

Dennoch ist festzustellen, dass die Stromverläufe und die Spektren in etwa denen aus der Untersuchung der seriellen Lichtbögen entsprach. Allerdings mit einer wesentlich größeren Amplitude.

Als Forderung für eine mögliche Auswertestrategie hat sich im Grunde also nichts verändert bis auf die Tatsache, dass erheblich größere Signalamplituden vorliegen. Eine Auswerteschaltung, die die kleinen Signalamplituden aus den seriellen Lichtbögen sicher erkennen kann, wird auch die Signale eines parallelen Lichtbogens erkennen. Möglicherweise sind Anpassungen bei der Signalverstärkung und dem Bauteileschutz erforderlich.

## 8 Die Definition eines Auswertekonzeptes zur sicheren Erkennung von Lichtbögen im Kraftfahrzeug

### 8.1 Grundsätzliche Anforderungen

Die Grundsatzuntersuchungen haben gezeigt, dass ein brennender Lichtbogen ein breitbandiges Rauschen auf dem Bordnetz erzeugt. Dieses Rauschen muss sicher erkannt werden. Im Allgemeinen existieren mehrere Möglichkeiten einer Erkennung:

- Filterung eines Frequenzbandes mit anschließender Gleichrichtung
- Detektion durch Realisation eines Superheterodyn-Prinzips (Radio)

Dazu existieren bereits Lösungen, die sich im Allgemeinen jedoch fast ausschließlich auf Wechsellspannungsnetze beziehen und deren Parametrierung weitgehend auf diese Netz fest eingestellt worden sind.

Im Kraftfahrzeug herrschen völlig andere Umgebungssituationen, wie bereits oben beschrieben worden ist. Der Hauptunterschied besteht in der Tatsache, dass hier ein Gleichspannungsnetz vorliegt, das in weiten Bereichen schwanken kann.

Zusätzlich ist von der Tatsache auszugehen, dass auch beim 42 V Bordnetz viele Aktuatoren analog geregelt werden müssen.

Die in diesem Zusammenhang typische Lösung ist hier die sog. Puls-Weiten-Modulation (PWM), bei der die Aktuatoren periodisch angesteuert werden und die umgesetzte Leistung durch das Takt-zu-Periodendauerverhältnis bestimmt wird.

Die Summe aller PWM auf einem Bordnetz erzeugt einen weiteren Störnebel, der von dem sich bildenden Rauschen bei Vorliegen eines Lichtbogens sicher unterschieden werden muss.

### 8.2 Das Prinzip des Auswertekonzeptes

Folgende signaltheoretische Aussagen liegen dem Auswertekonzept zu Grunde:

- Ein breitbandiges Rauschen besitzt ein kontinuierlich-breitbandiges elektromagnetisches Spektrum
- Ein periodisches Signal (wie z.B. eine PWM) erzeugt diskrete, schmalbandige Spektralanteile

Das Grundprinzip ist nun folgendes:

Es findet eine periodische Überwachung eines geeigneten Frequenzbereiches statt, in dem diskrete Frequenzen heraus gefiltert werden und deren Signalamplituden im Spektrum analysiert werden.

Die Anzahl dieser Frequenzen ist abhängig von der Komplexität des Bordnetzes, können aber zwischen 10 bis 100 liegen.

Sollte bei zwei oder mehreren Durchläufen (Sweeps) festgestellt werden, dass an den gleichen Frequenzstellen ähnliche Signalamplituden vorliegen, so kann auf eine diskrete Störampplitude, verursacht z.B. durch eine PWM, geschlossen werden. Diese Frequenzen werden dann für die weitere Auswertung ignoriert.

Sollte jedoch erkannt werden, dass in allen Bereichen dazwischen plötzlich eine Anhebung der Signale um einem in etwa konstanten Wert stattfinden, so bedeutet das, dass ein breitbandiges Signal plötzlich erschienen ist, was auf das Vorhandensein eines Lichtbogens hindeutet.

Vor dem Hintergrund des bereits ausgeführten und der Tatsache, dass dieses Auswertekonzept später in ein Kraftfahrzeuge verwendet werden soll, sind folgende Eigenschaften zu fordern:

- schneller Scan möglichst vieler Frequenzen
- Möglichkeit, bekannte Störfrequenzen von vornherein auszublenden
- einfaches und kostensparendes Hardwarekonzept
- Steuerung über einen Mikrocontroller mit Kommunikationsschnittstelle
- möglichst einfach strukturierte Software
- einsetzbar in der besonderen EMC-Umgebung eines Kraftfahrzeuges
- adaptives Verhalten bei plötzlich auftretenden neuen periodischen Signalen
- einfache Grundprogrammierung zur Anpassung an verschiedenen Bordnetzsituationen durch Verwendung einer Band-Ende-Programmierung (End-Of-Line-Programming).

### 8.3 Die Parametrierung des Auswertekonzeptes

Für das oben angegebenen technische Grundkonzept sind im Verlauf des Forschungsprojekts folgende Parameter festgelegt worden:

- abgetasteter Frequenzbereich: 1 KHz bis 10 KHz
- Abtastgeschwindigkeit: 100 ms pro Durchlauf
- Anzahl der Abtastwerte: 16

- Entscheidungskriterium für das Erkennen eines Lichtbogens: > 50 % der Werte zeigen einen erhöhten Signalpegel

Unter Berücksichtigung der hier getroffenen Parameter-Festlegungen wurde das folgende Hardwarekonzept entwickelt, aufgebaut und getestet.

## 9 Umsetzung dieses Konzeptes in eine für Kraftfahrzeuge geeignete Elektronik

### 9.1 Das Hardwarekonzept

Die Umgebungssituation in einem Kraftfahrzeug stellt an eine Elektronik besondere Anforderungen. Diese sind in erster Linie:

- stark schwankendes Bordnetz
- hohe und energiereiche Störimpulse auf den Leitungen
- Eine besonders schwierig zu lösende EMV-Problematik
- starke Temperaturschwankungen
- hohe Anforderungen bezüglich mechanischer Stabilität und Dichtigkeit
- lange Betriebsdauer / Lebensdauer
- geringe Kosten

Vor diesem Hintergrund ist ein Hardwarekonzept entwickelt worden, das allen Anforderungen weitgehend gerecht wird.

Wie bereits dargestellt, ist es erforderlich, zur Erkennung eines Lichtbogens einen bestimmten Frequenzbereich auf ein eventuell vorhandenes breitbandiges Rauschen zu überprüfen. Dabei ist es von großer Wichtigkeit, periodische Störsignale, sie z.B. von einer PWM herrühren können, als solche zu erkennen und auszublenden.

Zur Lösung dieses Problems ist ein schnell durchstimmbares schmalbandiges Bandfilter erforderlich, das im betrachteten Frequenzbereich eine größere Anzahl von Frequenzen periodisch überprüft und ein ggf. vorhandenes Signal an eine Auswerteschaltung (Gleichrichter / Mikrocontroller) weiterleitet. Folgende Lösungen wären denkbar:

- Klassische Bandfilter auf Basis von Spulen / Kondensatoren scheiden hier aus, da sie zu unflexibel und zu aufwändig sind.
- Filterschaltungen auf Basis eines Überlagerungsdetektors (Superheterodyn, Radio) erfordern ein Zwischenfrequenzfilter und sind damit auch sehr aufwändig.

- Anwendung eines sog. Switched-Capacitor-Filters (SCF), das unter Verwendung einer Injektionsfrequenz (oder ein ganzzahliges Vielfaches davon) eine bestimmte Frequenz aus dem vorliegenden Frequenzgemisch herausfiltert, gleichrichtet und einem Mikrocontroller zuführt. Die Injektionsfrequenz ist durch Verwendung eines geeigneten Zeitgebers im Mikrocontroller leicht und kostensparend zu generieren.

In diesem Projekt ist die dritte Möglichkeit verwirklicht und getestet worden. Der Hardwareaufwand ist gering und besteht als Zusatz zu den in vielen Fällen bereits vorhandenen Mikrocontroller aus dem folgenden Elementen:

- der bereits erwähnten Switched-Capacitor-Filter
- einer Detektionseinrichtung (Gleichrichter oder Pegeldetektor)
- einer Vorverstärkerstufe

Dieser Aufwand ist als gering einzustufen und ist auch unter dem Gesichtspunkt der EMC im Kraftfahrzeug geeignet. Abbildung 10 zeigt ein Blockschaltbild dieser Zusatzanordnung.

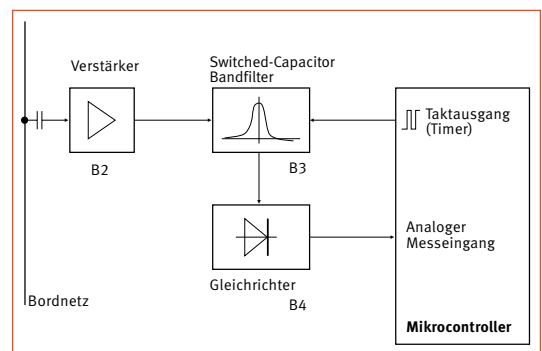


Abb. 10: Das Grundprinzip der Signalauswertung zur Erkennung eines Lichtbogens (Hardware)

### 9.2 Das Softwarekonzept

Natürlich funktioniert die Auswertung in Verbindung mit einer geeigneten Softwarestruktur. Diese Zusatzsoftware muss in den vorhandenen Mikrocontroller integriert werden können. Unter ungünstigen Umständen ist es auch denkbar, dass für diese Zusatzfunktionalität in der Tat ein leistungsfähigerer Mikrocontroller erforderlich werden könnte, als der, der ursprünglich vorgesehen war. Das ist im Einzelfall zu überprüfen.

Die Grundfunktion auf der Softwareseite ist folgende:

Ein brennender Lichtbogen erzeugt ein breitbandiges Rauschen im Bereich von einigen 100 Hz bis ca. 100 kHz.

Alle anderen Störquellen auf einem Kfz.-Bordnetz sind meist periodisch, d.h. sie erzeugen im Frequenzbereich ein Linienspektrum oder Schaltvorgänge, die in der Regel zwar ein kontinuierliches Spektrum erzeugen können, jedoch nicht mit (fast) konstanter Amplitude (s.o.).

Nur ein Lichtbogen erzeugt ein kontinuierliches Spektrum mit nahezu konstanten Spektralanteilen über den betrachteten Frequenzbereich.

Das Ziel ist es, dieses Spektrum von anderen sicher zu unterscheiden.

In fast allen modernen Elektroniken für Kraftfahrzeuge befinden sich Mikrocontroller. Diese sind zwar in der Lage, in einem gewissen Umfang auch signalanalytische Aufgaben zu erfüllen, jedoch reicht ihre Rechenkapazität meist nicht aus, umfangreiche Berechnungen anzustellen. Daher wird hier der Weg beschritten, die Steuerung der Signalanalyse vom Controller durchführen zu lassen, jedoch durch eine analoge Hardware die Signalauswertung zu vereinfachen, wie das Hardwarekonzept gezeigt hat.

Das vom Bordnetz stammende, ggf. verrauschte Signal wird zunächst über Kondensatoren angekoppelt und verstärkt (B1, B2). Danach gelangt es auf eine Bandfilterstufe (B3), deren Mittenfrequenz vom Mikrocontroller (B5) verändert werden kann. Verwendet wird hier ein sog. „Switched Capacitor“-Filter, das seine Mittenfrequenz durch einen Taktausgang vom Mikrocontroller erhält. Damit hat der Mikrocontroller eine ständige Kontrolle und Information darüber, welche Frequenz gerade analysiert wird.

Ein Nachgeschalteter Gleichrichter (B4) oder Pegeldetektor leitet nun eine von der Intensität der ausgefilterten Frequenz abhängiges Signal an einen analogen Eingang des Mikrocontrollers.

Damit kann der Controller feststellen, welches Signal bei einer genau festgelegten Frequenz auf dem Bordnetz vorhanden ist.

Der Mikrocontroller scannt nun den kompletten interessanten Frequenzbereich (z.B. 200 Hz bis 10000 Hz) durch, stellt die Amplituden fest und entscheidet, ob diese Amplituden einen Mindestpegel aufweisen und in etwa konstant groß sind.

Das wäre nur beim Vorhandensein eines stehenden Lichtbogens auf dem Bordnetz der Fall. Damit ist eine Detektion möglich.

Alle anderen Spektralanteile würden eine Amplitude größer als dieser „Grundpegel“ hervorrufen und von der Software im Mikrocontroller leicht als solche erkannt werden können.

Periodische Signale werden durch wiederholte Durchläufe erkannt und können ignoriert werden.

Bei der Realisation der Software werden die zu untersuchenden Frequenzen praktischerweise als Zeitgeber-Initialisierungsdaten im Speicherbereich des Mikrocontrollers als Tabelle fest abgelegt.

Durch Veränderung dieser Tabelle unter Anwendung einer sog. End-Of-Line-Programmierung (EOL), wie sie heute in der Kraftfahrzeugelektronik üblich ist, kann die Auswertestrategie leicht auf verschiedenen Bordnetzsituationen angepasst werden.

Außerdem ist es möglich, periodische Signale durch Vergleich der Ergebnisse verschiedener Durchläufe schnell als solche zu erkennen und zukünftig auszublenden. Damit erhält man ein adaptives Verhalten der Auswerteelektronik. Ein zusätzlicher neuer Störer auf dem Bordnetz, der periodisch arbeitet (also kein breitbandiges Rauschen erzeugt, s.o.) wird so zu keinen Fehlinterpretationen führen.

Das so realisierte Auswertekonzept (Hardware + Software) stellt also eine geeignete Lösung für Kraftfahrzeuge dar. Dieses Konzept wurde als Musteraufbau unter Verwendung eines Mikrocontrollers vom Typ 80C515C in der Programmiersprache „C“ realisiert.

### 9.3 Die Einbindung in ein Kraftfahrzeug

Für die Einbindung in ein Kraftfahrzeug ist zunächst sicher zu stellen, dass die möglichen Rauschsignale auf dem Bordnetz auch die Auswerteschaltung erreichen. Dazu ist eine geeignete Position im Bordnetz zu finden und dann eine Strategie zu entwickeln, wie auf eine Lichtbogen-Situation zu reagieren ist.

Dieser Aspekt war nicht Gegenstand dieses Forschungsvorhabens.

Für die Generierung der erforderliche Signale sind folgende Möglichkeiten gegeben:

- Abgriff durch Verwendung eines Kondensators, der nur die elektrischen Wechselanteile passieren lässt, die Gleichanteile sperrt (s.o.).
- Einbau eines Stromshunts, um das Stromrauschen in einem Bordnetzweig zu erfassen
- Verwendung eines sog. SENSE-Ausgangs eines modernen Halbleiterschalters zu Stromanalyse (wurde im Zuge des Forschungsprojekts nicht untersucht)
- Verwendung eines Koppel-Transformators für die Wechselsignale (wurde im Zuge des Forschungsprojekts nicht untersucht)

Mit allen Möglichkeiten ist eine Auskopplung eines Bordnetzrauschens möglich.

### 10 Überprüfung des Auswertekonzeptes

Das hier beschriebenen Auswertekonzept ist an einem Beispiel-Bordnetz auf seine Funktion getestet worden. Dieses Bordnetz besteht aus verschiedenen Lasten, die so verändert worden sind, dass ein Betrieb bei 42 V möglich ist, siehe auch Abbildung 11:

Folgende Komponenten sind testweise vorgesehen:

- Kollektormotor 42 V mit Bremsenrichtung
- Kollektormotor 12 V (3 Stck. in Reihe)
- Lastarray 42 V zur Simulation einer Flächenheizung (siehe Bild 11.4)
- DC-DC Wandler von 42 V auf 14 V und zurück (Prototyp der Fa. HELLA KGaA)
- Kühler-Ventilator 12 V (über eine PWM-Ansteuerung)
- Lampenlasten 12 V (3 Stck. in Reihe)
- Lampenlasten 12 V (über eine PWM-Ansteuerung)
- Relais ( über eine PWM-Ansteuerung)
- Hubmagnete ( über eine PWM-Ansteuerung)
- Kleinlüfter ( über eine PWM-Ansteuerung)
- Verkabelung unter Verwendung diverser Kabellängen und Kabelquerschnitte

Das PWM-Primärsignal wird von einem Labor-Generator bereitgestellt, als Lastschalter dienen MOS-Power Transistoren.

Bei der Überprüfung wurden in verschiedenen Zweigen Lichtbögen erzeugt.

Die entwickelte Lichtbogen-Detektion arbeitet einwandfrei.

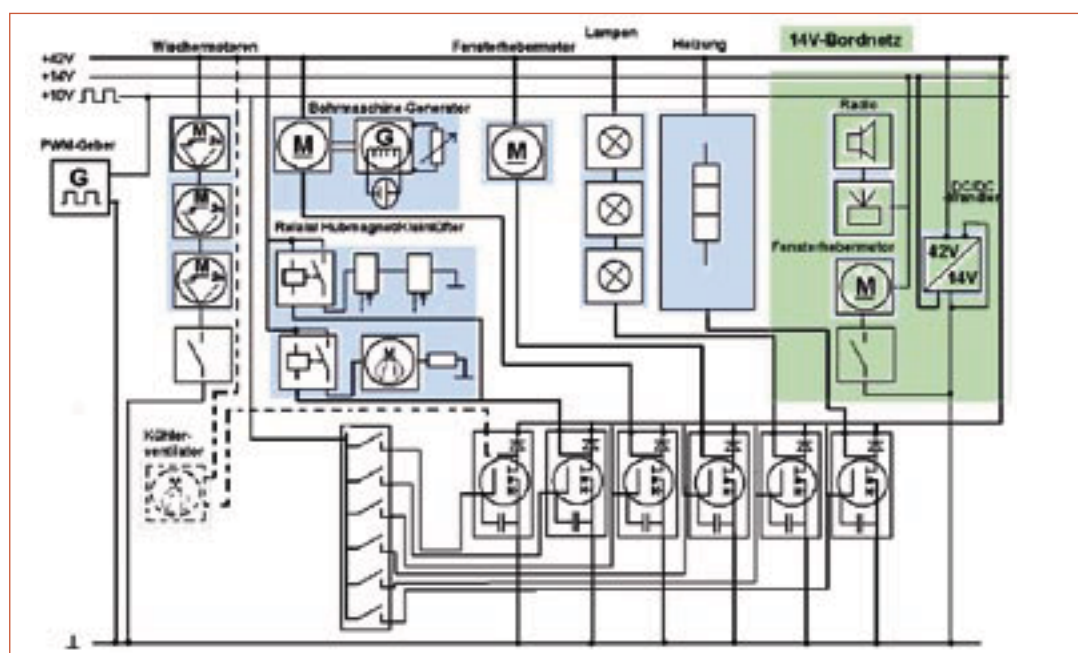


Abb. 11: Erstes Test-Bordnetz zur Überprüfung der Lichtbogenerkennung.



## 11 Zusammenfassung und Ausblick

In dem hier beschriebenen Forschungsprojekt „Lichtbögen im neuen 42 V Bordnetz für Kraftfahrzeuge“ wurde eine sicherheitskritische Situation untersucht, das Auftreten von stehenden Lichtbögen, die im Extremfall einen Fahrzeugbrand verursachen können. Um sich diesem Problemfeld zu nähern, wurde ein Bordnetzsimulator und eine Lichtbogen-Erzeugungseinheit aufgebaut, mit der sogar parallele Lichtbögen an einer Bleibatterie erzeugt werden können.

Nach der signalanalytischen Diagnose von Lichtbögen im diesem technischen Umfeld konnte eine neuartige Auswertestrategie definiert und eine entsprechende kraftfahrzeugtaugliche Auswerteelektronik, entwickelt, aufgebaut, programmiert und getestet werden, die sowohl die seriellen- als auch die parallelen Lichtbögen erkennt.

Für diese Auswertestrategie ist inzwischen ein Patent erteilt worden.

Damit ist das Ziel des Forschungsprojekts, wie es im Antrag definiert worden ist, in vollem Umfang erreicht worden.

Der industrielle Partner des Forschungsprojekts (Fa. HELLA KGaA, Lippstadt) plant den Einsatz des gefundenen Auswertekonzeptes bei Projekten mit höheren Bordnetzspannungen in der Zukunft.

Darüber hinaus sind weitere Untersuchungen erforderlich, die sich nicht nur auf die Spannungsebene 42 V beziehen, sondern auch auf noch höhere Spannungen, wie z.B. 180 V bis 300 V Gleichspannung, wie sie in Hybridfahrzeuge verwendet wird.

Außerdem ist abzusehen, dass sicherheitskritische Funktionen in Kraftfahrzeugen, die in absehbarer Zeit ebenfalls voll elektrisch sein werden (wie z.B. die elektrische Bremse) sichere Energiequellen erforderlich machen.

Die bisher verfügbaren Energiespeicher (elektrochemisch) sind dafür nur begrenzt geeignet, da sie in der Regel keine genaue Detektion ihrer gerade gespeicherten elektrischen Energie erlauben. Außerdem sind sie nicht zyklensfest. Beim Ausfall des Motors ist es aber gerade wichtig zu wissen, dass eine minimale Reserveenergie im Fahrzeug z.B. für die elektrische Bremse oder Lenkung vorhanden ist. Aus unserer Sicht sind für diesen Fall sog. ULTRA-CAPS vorzusehen. Es handelt sich hier um Kondensatoren mit extrem großer Kapazität, deren elektrischer Energiegehalt durch Anwendung des Coulomb'schen Gesetzes leicht bestimmbar ist. Im Zusammenhang mit Bordnetzfehlern (Lichtbögen) liegen noch keine gesicherten Ergebnisse vor.

Inzwischen ist ein weiteres Forschungsprojekt gestartet worden, das sich mit entsprechenden technischen Situationen bei Spannungen bis 200 V (Hybridfahrzeuge) befasst.