

Powered over POF Sensors (PoPS)

Prof. Dr. Peter Urbanek

Fakultät Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
Technische Hochschule Nürnberg

Zusammenfassung:

Jeder elektronische Sensor in einer automatisierten Umgebung benötigt eine Stromversorgung und eine Kommunikationsverbindung, um seine Daten an einen Leitrechner weiter zu geben. Diese triviale Eigenschaft bereitet genau dann Probleme, wenn der Sensor Daten in einer anderen physikalischen Umgebung als die des Steuerrechners erfassen soll. Z.B. in der Nähe von starken Elektromotoren, Stromleitungen und an allen Stellen, die durch Blitz gefährdet sind. Windkraftträder sind nur ein Beispiel hierfür. Auch in explosionsgefährdeter Atmosphäre sind elektronische Sensoren wegen des möglichen Funkenschlags nur mit großem Aufwand einsetzbar oder ganz verboten.

Die Idee zur Lösung dieses Problems basiert auf dem Einsatz einer Polymer Optischen Faser (POF), über die in Form von Licht sowohl die Energie zur Versorgung des Sensors bereitgestellt wird, als auch die Kommunikation erfolgt. Dazu werden zwei Komponenten benötigt: Die optische Energieübertragung und ein Energy Harvester für die zu versorgende Low Power Elektronik, da die ankommende Energiemenge sehr niedrig ist.

Das Ziel ist es, elektronische Sensoren in einem vollständig gekapselten Gehäuse unterbringen, in das nur eine POF und keine stromführende Kupferleitung führt.

Bisherige Lösungen basieren auf der Kombination eines Lasers in Verbindung mit einer Glasfaser. Doch diese Lösung ist nicht nur sehr teuer, sondern auch schwierig in der Montage. Um Größenordnungen billiger und einfach zu montieren wäre eine Kombination aus LED und POF. Die erreichten Ergebnisse zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, die Kombination Glasfaser und Laser durch LED und POF zu ersetzen. Für den industriellen Einsatz ist der vorliegende Aufbau jedoch nicht geeignet. 90% des Lichts sind als Verlust zu beklagen, nur 10% werden wirklich eingekoppelt. Dieses Verhältnis ist umzukehren. Deshalb soll in einem weiteren Projekt eine TH-eigene LED entwickelt werden, die so klein ist und das Licht so fokussiert, dass sie in eine 1 mm POF 90% des Lichts eingekoppelt.

1. Projektdaten

Fördersumme	35.400 Euro
Laufzeit	Januar 2014 bis Dezember 2014
Fakultät	Elektrotechnik Feinwerktechnik Informationstechnik
Projektleitung	Prof. Dr. Peter Urbanek
Kontaktdaten	E-Mail: Peter.UrbaneK@th-nuernberg.de

2. Ausgangslage

Der Einsatz elektronischer Komponenten hat weltweit Produkte aus den unterschiedlichsten Bereichen verbessert und vor allem verbilligt. Seit kurzem sind 32 bit Mikrocontroller für 45 cent erhältlich. Somit besteht eine extrem preiswerte Methode, eine definierte Funktionalität durch eine elektronische Realisierung zu verbilligen. Der andere Grund für den Siegeszug der Mikrocontroller liegt in der enormen Integrationsdichte standardisierter Funktionen, wie z.B. die Umwandlung analoger Spannungen in digitale Werte oder der Anschluss an das Internet ohne zusätzliche Bauelemente [urb07].

Leider bleibt der Einsatz solcher auf Mikrocontrollern basierter Elektronik einigen Anwendungsgebieten verschlossen, da die Elektronik wegen gewisser äußerer Bedingungen über die Stromversorgungskabel zerstört werden würde, bzw. ihrerseits für die Umgebung schädlich wäre. Vier wesentliche Faktoren definieren den Ausschluss von Elektronik in Geräten:

- Auftreten starker magnetischer Felder, die induzierte Ströme produzieren würden, z.B. Starkstromleitungen, Elektromotoren und große medizinische Scanner (MRT, CT, ...)
- Einsatz in Strukturen, die eine hohe Blitzschlagrate haben (Windkraftwerke, Antennen, Flugzeuge o.Ä.). Hier könnten die Magnetfelder wiederum elektrische Leitungen zerstören.
- Vermeidung von Funken in stark explosionsgefährdeten Bereichen (z.B. Kerosin-Tanks)
- Überbrückung von hohen Spannungsdifferenzen, z.B. in der HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung), wie sie in den nächsten Jahren für die regenerativen Energien verstärkt eingesetzt werden wird.

Bestehen dennoch zwingende Gründe für den Einsatz von Elektronik in solchen Gebieten, dann muss diese komplett geschirmt und über Licht versorgt werden.

Deshalb hat die Art der Versorgung von Elektronik über Licht in den letzten Jahren immer mehr Bedeutung gewonnen. Alle bisherigen kommerziellen Systeme arbeiten mit Glasfasern als Übertragungsmedium und Infrarot-Laserdioden als Lichtquelle. Vor allem die aufwendigen Koppelstellen bedingen, dass solche Systeme im Preisbereich um 1000 US\$ liegen. Der Bedarf hierfür ist vorhanden und wurde gerade im Bereich der chemischen Industrie [URB13] ausführlich diskutiert.

3. Ziele des Forschungsprojekts

Ziel dieses Vorfeldprojekts war die elektrische Versorgung von Low-Power-Sensoren über das Licht einer LED, das durch eine Polymer Optische Faser (POF) zugeführt wird. Dazu werden zwei Komponenten benötigt: Die optische Energieübertragung und ein Energy Harvester für die zu versorgende Low Power Elektronik, da die ankommende Energiemenge sehr niedrig ist. Damit lassen sich z.B. elektronische Sensoren in einem vollständig gekapselten Gehäuse unterbringen, in das nur eine POF und keine stromführende Kupferleitung führt. Der enorme Vorteil dieses Aufbaus liegt darin, dass die POF nicht durch elektromagnetische Felder beeinflusst werden kann. Somit ist es möglich, diese Sensoren dort einzusetzen, wo bisher ein Einsatz undenkbar war, z.B. in der Nähe von starken Elektromotoren, Stromleitungen und an allen Stellen, die durch Blitz gefährdet sind. Windkrafträder sind nur ein Beispiel hierfür. Auch in explosionsgefährdeter Atmosphäre ist Elektronik wegen des möglichen Funkenschlags nur mit großem Aufwand einsetzbar oder ganz verboten.

Bisher muss für Messungen in solcher Umgebung die Elektronik in hermetisch abgeschlossenen Gehäusen untergebracht werden. Die Kabelzuführung, falls überhaupt erlaubt, muss komplett gegen die Umgebung isoliert werden. Befindet sich die zu messende Größe in einer eigenen Atmosphäre oder unter Druck, so sind Durchführungen entsprechend aufwendig und teuer. Als einziger Ausweg wäre die Versorgung der Elektronik über eine Batterie theoretisch denkbar. In der Praxis scheidet diese Lösung jedoch aus, da das Wechseln der Batterie in einem abgeschlossenen System augenscheinlich problematisch ist.

In dem vorliegenden Projekt wurde eine grundlegende, technische Lösung für diese Problemfälle erarbeitet. Es ist gelungen, eine Testschaltung aufzubauen, die nur über das Licht einer LED versorgt wird. Als Empfänger dient eine kleine Solarzelle, die die Photonen in Elektronen umwandelt. Durch eine spezielle Low Power Schaltung mit Energy Harvesting Funktion wurde die geringe, am Sensor ankommende Energiemenge über eine gewisse Zeit aufgesammelt und gespeichert. In äquidistanten Zeitabständen wird der „schlafende“ Sensor aktiviert, führt eine Messung durch, übermittelt die Messdaten und legt sich wieder in einen Modus schlafen, in dem er kaum messbar wenig Energie benötigt. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange wie die LED den Sensor mit Energie versorgt.

Zum Nachweis der Funktion der zugrunde liegenden Idee wurde ein Demonstrator aufgebaut, dessen Anwendungsprinzip in explosiven oder entzündlichen Flüssigkeiten, wie z.B. Benzin oder Kerosin denkbar ist, wo sich naturgemäß der Einsatz von Elektronik innerhalb der Flüssigkeit verbietet.

Zur Demonstration wird der Anwendungsfall simuliert, bei dem Kerosin aus einem Flugzeugtank in einen anderen umgepumpt wird. Zur besseren Beobachtbarkeit simulieren zwei Säulen aus Plexiglas die beiden Tanks. Zur Demonstration wird Wasser von einer in die andere Säule gepumpt, wobei der Power over POF Sensor (PoPS) in dieser Applikation den Füllstand erfasst.

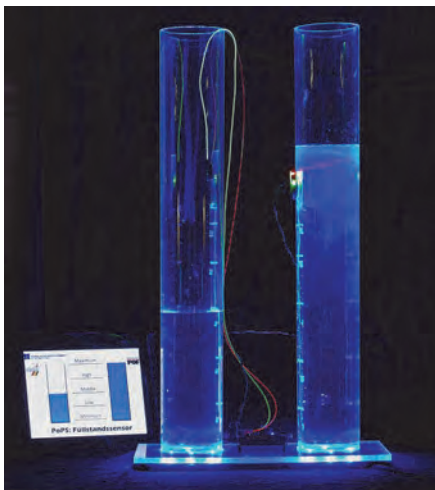


Bild 1: Aufbau des Demonstrators [Bild: Lauri Trillitzdch & Oliver Kussinger, Agentur „Die Cowboys“]

Bild 1 zeigt den Testaufbau mit den beiden Säulen. Die Beleuchtung und Betrachtung im Dunklen dient nur der besseren Sichtbarkeit, da durchsichtiges Wasser in einer durchsichtigen Plexiglassäule schlecht erkennbar wäre.

Das Kernstück des Demonstrators, der Sensor zur Füllstandserkennung, befindet sich in der rechten Säule. In Bild 2 ist er mit der Leiterplatte zu erkennen.

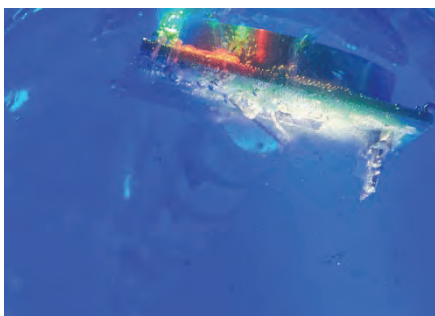


Bild 2: Elektronik des Sensors [Bild: Lauri Trillitzdch & Oliver Kussinger, Agentur „Die Cowboys“]

Zur optischen Energieversorgung wurden im Demonstrator zwei Varianten getestet. In der linken Säule erfolgt die Versorgung über eine POF. Die rote LED versorgt die Schaltung, die grüne LED dient zur Kommunikation. In der rechten Säule wird die rote LED ohne POF eingesetzt. Ihr Licht durchleuchtet die Plexiglassäule und trifft dort direkt auf den Empfänger. Dies ermöglicht eine einfache Montage. Sender und Empfänger werden elegant über zwei Magneten miteinander verbunden. Es sind keine Schrauben, Winkel oder andere Befestigungsbohrungen nötig. Bild 3 zeigt die Details.

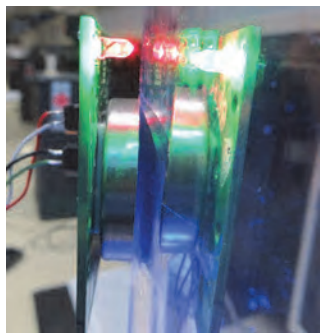


Bild 3: Direkte Versorgung ohne POF [Bild: Holger Lenkowski, TH-Nürnberg]

Deutlich zu sehen ist das aus der LED austretende Licht, das direkt auf den Empfänger des Sensors fällt. Die Versorgung funktioniert so gut, dass auch die kleine Luftstrecke zur und von der Plexiglasröhre überbrückt werden kann, was sich technisch gesehen in erhöhter Dämpfung beschreiben lässt. In der Praxis der chemischen Anlagentechnik würde an die Stelle von Plexiglas ab einem bestimmten Druck Quarzglas in die üblichen Stahlrohre eingebaut werden.

Der Demonstrator ermöglicht einen direkten Vergleich mit existierenden Standardlösungen zur Füllstandsüberwachung, z.B. über Ultraschall.

Die erreichten Ergebnisse zeigen, dass es prinzipiell möglich ist, die Kombination Glasfaser und Laser durch LED und POF zu ersetzen. Für den industriellen Einsatz ist der vorliegende Aufbau jedoch nicht geeignet. 90% des Lichts sind als Verlust zu beklagen, nur 10% werden wirklich eingekoppelt. Dieses Verhältnis ist umzukehren. Deshalb soll in einem weiteren Projekt eine TH-eigene LED entwickelt werden, die so klein ist und das Licht so fokussiert, dass sie in eine 1 mm POF 90% des Lichts eingekoppelt. Zudem wäre es sinnvoll, Daten und Energieversorgung über dieselbe Faser zu leiten. Durch die dann notwendigen Splitter steigt die Dämpfung, so dass die vorliegende Elektronik nicht mehr versorgt werden könnte. Deshalb muss auch hier weiter optimiert werden. Kombiniert mit einer realen industriellen Anwendung könnte das die Basis für einen weiteren Forschungsantrag sein.

4. Herangehensweise und Forschungsergebnisse

Von dieser Ausgangssituation ausgehend wäre es eine große Innovation, die teure Kombination aus Laser und Glasfaser durch eine billige LED und eine Plastikfaser zu ersetzen. Leider steht dann aber nicht mehr Energie in der Größenordnung 100mW zur Verfügung, sondern weniger als 1mW! Deshalb muss die zu versorgende Elektronik zwingend als Low Power Design ausgeführt werden. Dieser Herausforderung will sich dieses Projekt in der Form stellen, dass die prinzipielle Machbarkeit nachgewiesen wird.

Ein Demonstrator soll dies visualisieren. Als theoretischer Hintergrund soll ein System dienen, das mit eigener Atmosphäre und unter Druck arbeitet. In der Praxis könnte das ein Kerosintank in einem Flugzeug sein. Bei Bedarf besteht die Möglichkeit, das Kerosin von einem Flügel in den anderen zu pumpen, um in Notfällen eine Gewichtsverlagerung zu erreichen. Dieser praxisnahe Fall kann im Labor aus Kosten- und Sicherheitsgründen nur simuliert werden. Ziel ist der Aufbau eines Simulators aus den folgenden Bestandteilen.

Zwei Plexiglassäulen simulieren die beiden Tanks, das Kerosin wird durch Wasser ersetzt. Eine Pumpe sorgt für das Umfüllen von einem Tank in den anderen. Ein Mikrocontroller nimmt einen Sollwert entgegen und steuert die Pumpe. Er liest die Werte des Füllstandssensors ein und stoppt den Umfüllvorgang, wenn der Zielwert erreicht ist. Dieser Teil ist für die wissenschaftliche Arbeit unwesentlich und wird deshalb nicht vertieft.

Ein wesentliches Ziel steckt in der Bewertung der Wirksamkeit der Kombination LED/POF. Es soll mit einer Standard-LED gearbeitet werden. Das Hauptproblem besteht darin, dass der PN-Übergang einer LED um Faktoren größer ist als der eines Lasers. Deshalb ist es mit diesen LEDs unmöglich, einen stark gebündelten Strahl zu erzeugen, wie man es von jedem Laserpointer kennt. Da der Bau einer eigenen LED den Umfang dieses Projekts sprengen würde, wurde eine Standard-LED mit geringem Öffnungswinkel gewählt. Auch hier gibt es schon mechanisch vorgefertigte Lösungen zum Einkoppeln des Lichts in die Faser.

Als Empfänger wird eine Spezialanfertigung einer Solarzelle gewählt. Diese ist hochempfindlich, besteht aus mehreren kaskadierten Zellen und liefert eine Ausgangsspannung im Voltbereich, so dass sie als Eingang für den Energy Harvester bestens geeignet ist. Ziel ist es, diese Strecke auf Effizienz zu prüfen und eine Aussage zu treffen, an welcher Stelle wie viel Optimierungspotenzial steckt. Dabei wurde darauf verzichtet, die Sendeleistung der LED in den Wattbereich zu erhöhen, da dieser Fall mit Blick auf weitere Forschung unbrauchbar ist. In industriell verwertbaren Anwendungen muss die LED letztlich in einem kleinen Plastikgehäuse untergebracht werden, das nicht annähernd in der Lage ist, mehr als einige Milliwatt Wärmeleistung abzuführen. Deshalb ist es das Ziel, mit einer 20 mA LED auszukommen.

Ein weiteres, wesentliches Ziel ist der Aufbau und die Bewertung eines geeigneten Energy Harvesters. Er muss in der Lage sein, so viel Energie zu sammeln, dass der Mikrocontroller des Sensors in der Lage ist, den Füllstand über Schalter zu erkennen und nach außen zu kommunizieren. Hierzu sollen mehrere Lösungen aufgebaut und Messungen durchgeführt werden, um auch hier das Optimierungspotenzial auszuloten.

Die Versorgungsstrecke wurde mit einer Sender-LED aufgebaut, die mit 20 mA direkt vom Mikrocontroller gespeist wird. Zur Übertragung wurde eine 1 mm POF mit schwarzer Ummantelung verwendet, um Einflüsse von Seitenlicht zu vermeiden. In Bild 1 wurde der schwarze Mantel für die Aufnahme extra entfernt, damit die Speisung sichtbar wird. Der Empfänger besteht aus winzigen parallel geschalteten Solarzellen, die bei bester Ausrichtung eine Spannung von über 4 V liefern.

Zur Kommunikation über Licht wird eine grüne LED gewählt, da die POF im grünen Bereich des Lichts eine besonders gute Dämpfung aufweist. Käufliche integrierte Sender arbeiten mit 1 mA LED Strom, so dass Sender, Empfänger und die POF als Gesamtsystem mit grünem Licht arbeiten müssen. Bild 4 zeigt die verwendeten Komponenten.

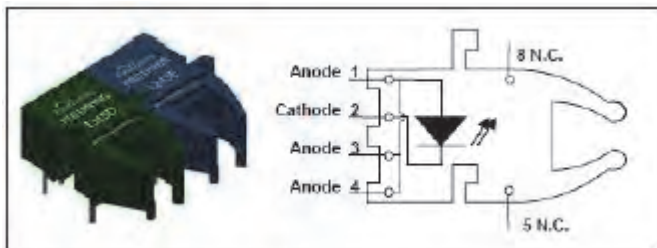


Bild 4: Firecomm Sender und Empfänger [KL14]

Der Hauptaufwand steckt in der Realisierung des Sensors. Bild 5 zeigt den Sensor als Blockschaltbild.

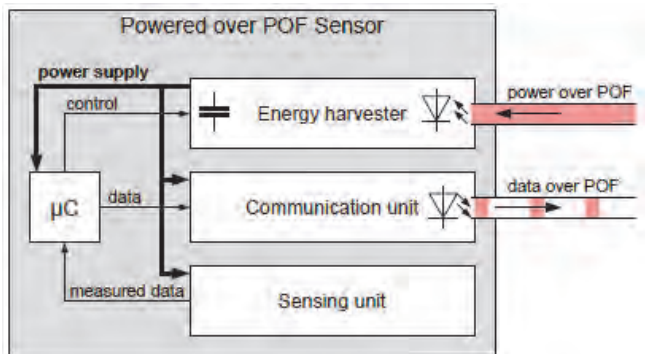


Bild 5: Blockschaltbild des PoPS [EN14]

Ein Mikrocontroller steuert alle Komponenten. Der Energy Harvester nimmt die übertragene Energie auf, sobald sie vom Empfänger bereitgestellt wird. Bild 6 zeigt den Aufbau schematisch.

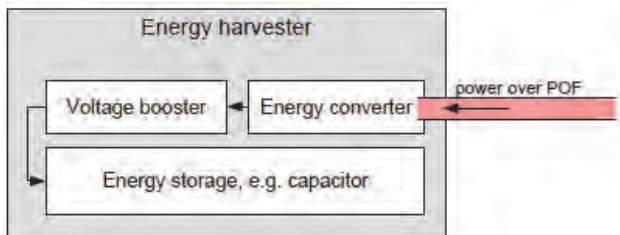


Bild 6: Blockschaltbild des PoPS Energy Harvesters [EN14]

Die Kommunikationseinheit überträgt die Daten zum Auswertegerät. Hier wurde eine optische Übertragung gewählt, siehe Bild 7. Je nach Bedarf wäre hier auch eine Funkübertragung möglich, wenn z.B. der eingangs erwähnte Fall dicker Wände zur Abgrenzung unterschiedlicher Druckverhältnisse oder Atmosphären gegeben wäre.

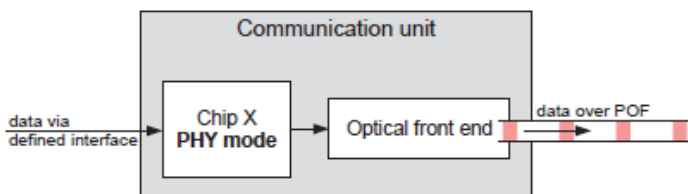


Bild 7: Blockschaltbild der Kommunikationseinheit des PoPS [EN14]

Die Abfrage der Schalter, die letztlich den Füllstand anzeigen, ist trivial. Der Mikrocontroller wacht in äquidistanten Zeiträumen auf, misst und überträgt das Messergebnis zur Basisstation. Bild 8 zeigt den Energieverbrauch des Sensors.

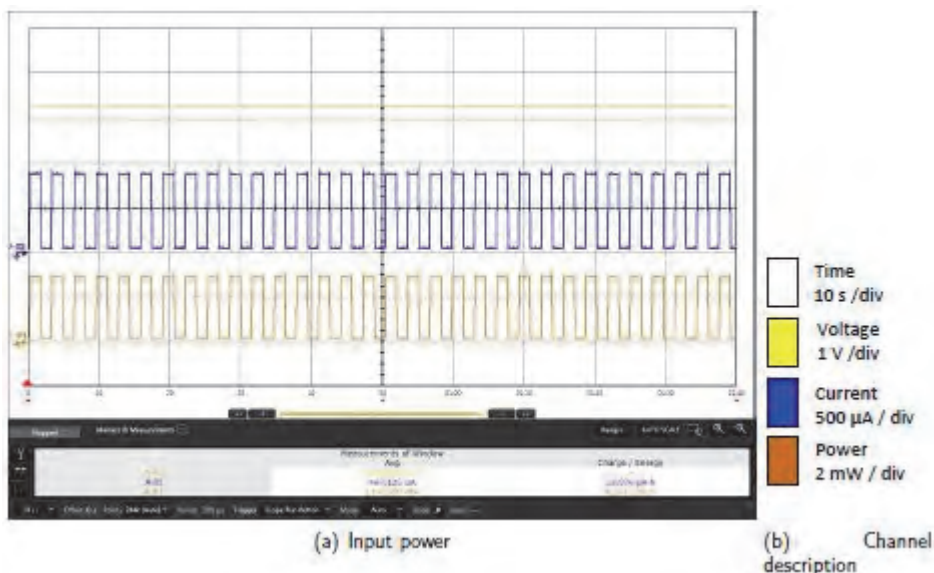


Bild 8: Energieverbrauch des PoPS [KL14]

Der Mikrocontroller wurde in einen stromsparenden Modus versetzt, in dem er auch während der Berechnungen weniger als 1 mA benötigt. Im Schlafmodus sind es wenige Mikroampere. Für den Test wurde die Sende-LED des Sensors mit einem Impuls-/Pausenverhältnis von 50% und einer Periodendauer von 3,1 s betrieben.

Über die optische Übertragungsstrecke wurde immerhin so viel Energie zur Verfügung gestellt, dass der Sensor 467,125 µA bei 3,3 V (1,54 mW) erhält. Der Bedarf der Sensorelektronik wurde gemessen. In der aktiven Phase der LED beträgt er 880 µA und in der passiven Phase nur 50 µA. Rechnet man den Verbrauch der LED

aus dem Gesamtverbrauch heraus, so ergibt sich, dass der Mikrocontroller ungefähr 50 μA braucht und der Transmitter 830 μA .

Bild 9 zeigt die praktische Realisierung des Sensors.

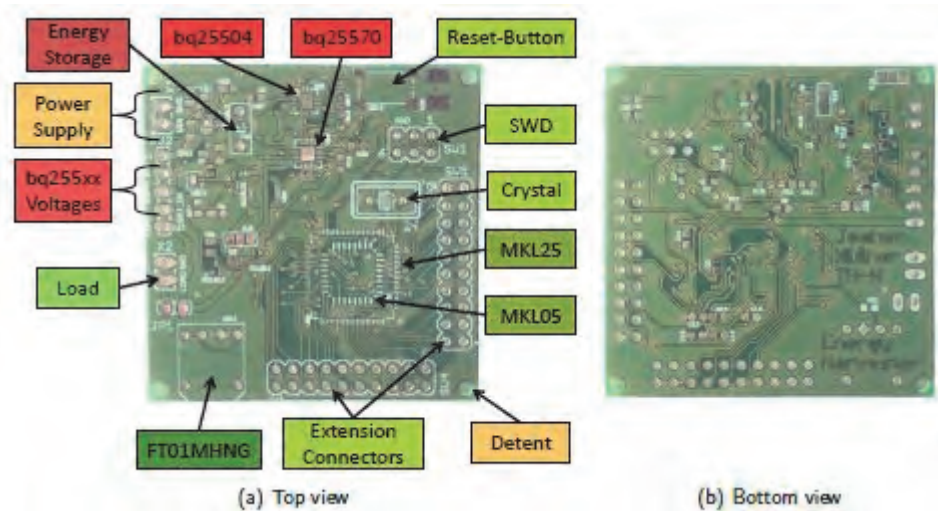


Bild 9: Hardware des Sensors in der endgültigen Realisierung [KL14]

5. Nachhaltigkeit / Verwertung / wissenschaftliche Arbeiten

Der hier als Beispiel vorgestellte Sensor zur Erfassung des Flüssigkeitsstands in einem Behälter zeigt eindrucksvoll die Möglichkeiten, die in dieser Technologie stecken. Die Messergebnisse zeigen dass die Kombination LED/POF als Alternative für die Kombination Laser/Glasfaser für bestimmte Anwendungen zu sehen ist.

Dabei kommt dem Energy Harvester eine entscheidende Rolle zu. Da die zur Verfügung stehende Energie nicht ausreicht, um einen Dauerbetrieb des Sensors zu ermöglichen, muss die Energie gesammelt und zwischengespeichert werden, um in der Mess- und Übertragungsphase über hinreichend Energie zu verfügen.

Als Konsequenz ergeben sich zwei Ansatzpunkte für weitere Forschungsanträge:

Einerseits muss die zu übertragende Energiemenge deutlich erhöht werden. Dazu ist es notwendig, eine passende LED zu entwickeln. Die hier gewonnenen Messungen und Erkenntnisse zeigen Ansatzpunkte, wie die LED aussehen könnte, um deutlich mehr Licht in die Faser einzukoppeln.

Andererseits zeigen die Messungen, dass der Einsatz eines speziell angepassten Energy Harvesters der richtige Ansatz war. Dieser Weg sollte weiter verfolgt werden.

Beide Ansätze, zusammen mit dem Know-how der seit über zehn Jahren andauernden Low-Power-Forschung an der TH Nürnberg sind die Basis zur Forschung an hochempfindlichen Mikrosensoren, die direkt im Zielsystem arbeiten können. Ein Beispiel für einen möglichen, realen, praxistauglichen Sensor wäre die Überwachung des Glysantingehalts der Kühlflüssigkeit in PKWs und LKWs. Während heute noch die Messung des Frostschutzes durch mechanisches Ausspindeln Teil des Inspektionsplans jedes Kfzs ist, könnte ein Frostschutz-PoPS die Frostschutztemperatur vollautomatisch erfassen und Alarm geben, wenn die Gefahr des Einfrierens des Kühlwassers besteht. Dadurch könnte dieses Wartungsintervall erheblich verlängert werden, bei gleichzeitiger Schonung des Geldbeutels und der Umwelt.

Der Frostschutz-PoPS ist nur ein Beispiel. Prinzipiell ist die in diesem Vorfeldprojekt getestete Basistechnologie für alle Sensoren geeignet, die in einem abgeschlossenen System unter eigener Atmosphäre und eigenem Druck arbeiten.

6. Literaturverzeichnis

- [KL14] Jochen Klüher: Optical Energy Harvesting
1. Projektbericht im MAPR Studiengang 2014
- [EN14] Patrick Englert: PoPS – Powered over POF Sensors
1. Projektbericht im MAPR Studiengang 2014
- [URB07] Peter Urbanek: Embedded Systems
HSU Verlag, 2007, ISBN 978-3-9811230-1-2
- [URB13] Peter Urbanek, Joachim Kinkel: New Approaches to the control of preparative chromatographic systems, Vortrag auf der DAISO Konferenz in Frankfurt, 13.09.2013