

Energy Harvesting zur Temperaturmessung an gefährlichen Potentialen

Martin Glunz

3. März 2012

1 Motivation

Für Freigabeuntersuchungen an Geräten der Antriebstechnik (Servoregler, Frequenzumrichter etc.) ist es u.a. notwendig Temperaturen an verschiedenen Bauteilen zu messen. Dabei ist der Prüfling in Betrieb und wird unter wechselnden Umgebungsbedingungen und Belastungen betrieben. Insbesondere in der Leistungselektronik (Endstufen und Netzteile) sind die Temperaturen sehr vieler Bauteile zu vermessen. Ein typischer Aufbau hat dabei 20 ... 50 Messpunkte, die üblicherweise mit Thermoelementen ausgeführt werden. Dabei sind immer einige Thermoelemente, die an gefährlichen Potentialen angelötet werden (z.B. Kühlfahne des Leistungstransistors im Netzteil). Diese Potentiale sind nicht nur mit einer bei Berührung gefährlichen Spannung behaftet, im Betrieb treten hier auch recht steile Schaltflanken mit einer Amplitude von bis zu $600V_{ss}$ auf.

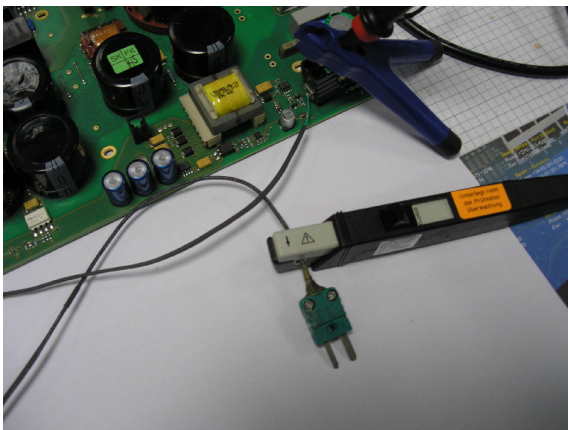


Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Thermoelement

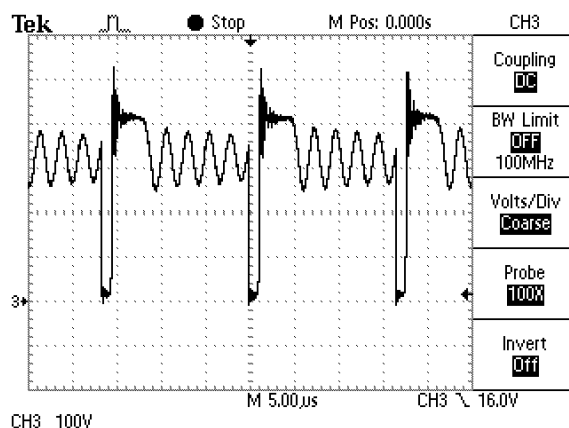


Abbildung 2: Schaltflanken

Im Bild zu sehen ist ein Aufbau mit einem am Drain des Leistungstransistors eines Schaltnetzteils angelöteten Thermoelement. Im Betrieb liegt am Drain eine Spannung von ca. $520V_{ss}$ mit steilen Schaltflanken an.

Viele Standard-Temperaturmessgeräte versagen unter diesen Bedingungen, weil die steilen Schaltflanken die empfindlichen Eingangsstufen der Thermoelementauswertung stört. Die abgelesenen Messwerte sind ungültig, unstabil oder falsch.

In der als Prototyp realisierten Energy-Harvesting-Anwendung wird genau diese störende Energie aus den Schaltflanken geerntet und zur Versorgung einer isolierten und potentialfreien Thermoelementauswertung verwendet. Die Datenübertragung zum Anzeigegerät erfolgt über eine Infrarot-Verbindung (IRDA). Die Datenübertragung ist mehrkanalig ausgelegt, so daß mittels mehrerer Frontends gleichzeitig mehrere Temperaturen im System gemessen werden können. Über eine USB-Schnittstelle können die Daten auch an einen PC übertragen und gespeichert werden.

Um die Quelle der geernteten Energie zu verdeutlichen, wurde eine Kupferfolie von ca. $6cm \times 3cm$ Fläche am Thermoelementstecker angeschlossen und der Ableitstrom gemessen. Der Ableitstrom fließt durch die Kapazität, die die Kupferfolie zur Umgebung bildet. Im Oszilloskopbild ist der Strom auf Kanal 4 mit einer

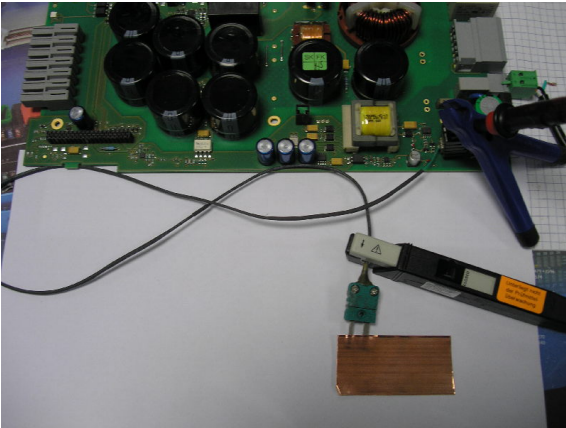


Abbildung 3: Ableitstrom durch Kupferfläche

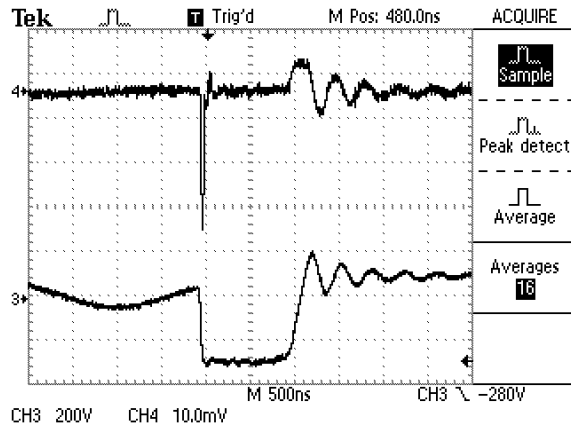


Abbildung 4: Schaltflanke und Ableitstrom

Skalierung von $\frac{50mA}{div}$ zu sehen. Man sieht, daß in der steilen Einschaltflanke ein sehr kurzer Strom von ca. $150mA$ und während der Ausschaltflanke ein Strom von ca. $50mA_{ss}$ fließt. Der Stromfluß hält nur sehr kurze Zeit an, wiederholt sich aber mit der Schaltfrequenz des Netzteils.

2 Bestandteile des Systems

Das System besteht aus einem Sender (Energy-Harvesting und Temperaturmessung) und einem Empfänger (mit Display und USB). Ein Empfänger kann die Messwerte mehrerer Sender empfangen.

Der Sender enthält folgende wesentliche Bauteile:

- Entstörung und Auskopplung der Energie mit einer Ringkern-Gleichtaktdrossel ($2 \times 4.7mH$) mit Hilfswicklung
- **LT3588-1** als Gleichrichter und Spannungsregler
- **EFM32TG222** als zentrale Steuereinheit
- Thermoelementauswertung 1 mit **LT1025** und einem Zero-Drift-OpAmp
- Thermoelementauswertung 2 mit **LTC2484**
- IRDA-Transceiver zur Datenübertragung
- Step-Up-Converter zur optionalen Energieversorgung aus einem Solarzellenmodul

Die Auskopplung der Energie aus dem Thermoelement geschieht mittels einer Gleichtakt-Entstördrossel, auf die eine zusätzliche Hilfswicklung aufgebracht wurde. Aufgrund der am Messpunkt anliegenden Schaltflanken fließt durch die Zuleitung des Thermoelementes ein Strom in die durch den Sender als Ganzes gebildete Kapazität. Dieser Strom induziert in der Hilfswicklung der Gleichtaktdrossel eine Spannung, die vom **LTC3588-1** gleichgerichtet wird und zur Versorgung des Senders mit Energie verwendet wird. Optional ist noch ein kleiner Aufwärtswandler vorgesehen, der den Speicherkondensator aus der von einer Solarzelle gelieferten Energie aufladen kann, somit kann der Sender bei ausreichender Beleuchtung auch aus dieser Quelle versorgt werden.

Es wurden zwei unterschiedliche Arten der Thermoelementauswertung aufgebaut, um die Vor- und Nachteile der beiden Schaltungsvarianten testen zu können. Die Thermoelementauswertung 1 nutzt den **LT1025** zur Kaltstellenkompensation und verstärkt die Thermospannung mit einem Zero-Drift-OpAmp um ein Signal mit einer Skalierung von $\frac{10mV}{^{\circ}C}$ zu erhalten, das von dem integrierten ADC des **EFM32TG222** gemessen wird. Die Variante 2 nutzt den hochempfindlichen Delta-Sigma-Wandler **LTC2484** und dessen integrierten Temperatursensor zur direkten Messung der Thermospannung. Dieser Wandler wird vom Microcontroller über digitale Signale (SPI) ausgelesen.

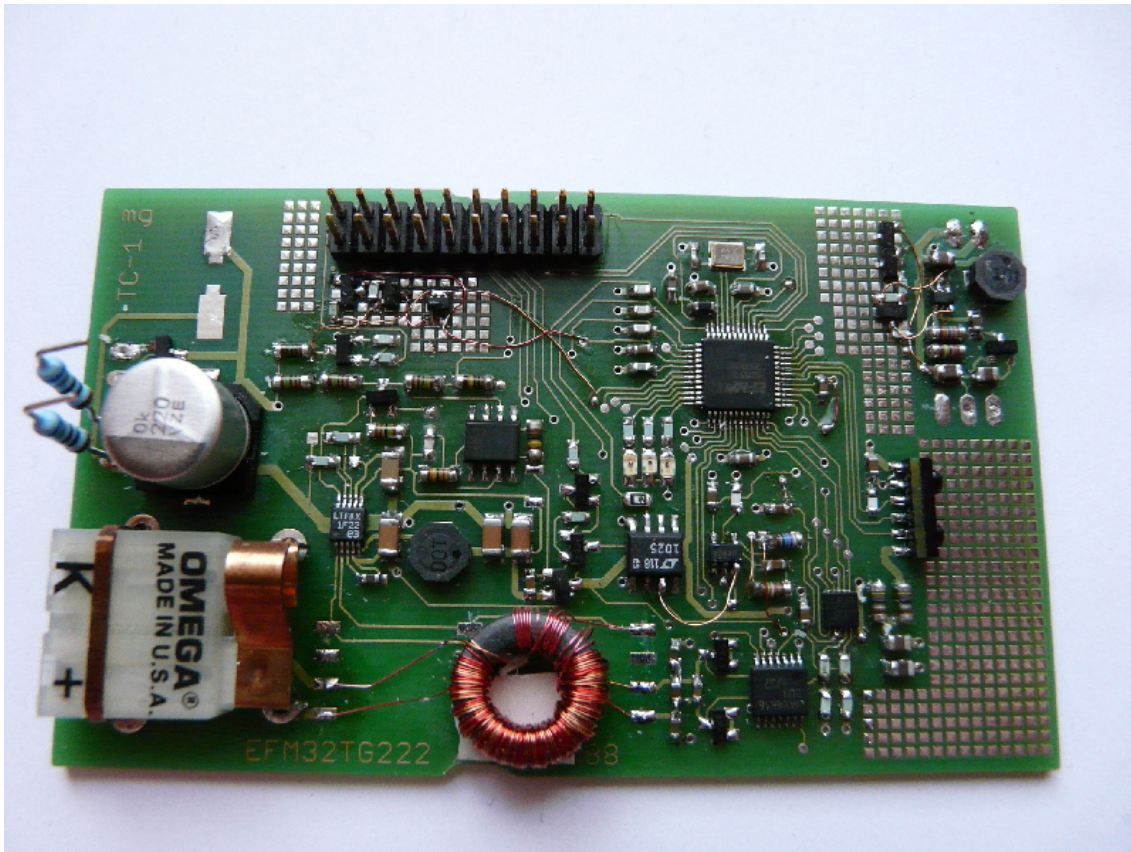


Abbildung 5: Bild des Prototypen

3 Funktion des Systems

3.1 Speicherkondensator laden

Sobald über die Thermoelementleitung ein durch den Prüfling verursachter Strom fließt, wird diese Energie verwendet, um einen Speicherkondensator (C3 bzw. C32) aufzuladen. Der LTC3588-1 (U1) richtet dazu die in der Hilfswicklung der Entstördrossel L1 induzierte Spannung gleich. Ab einer Kondensatorspannung (**VSTOR**) von ca. 5V beginnt der LTC3588-1 zu arbeiten und liefert eine geregelte Ausgangsspannung von 3.3V, die an **VSUP** anliegt.

Optional kann die Schaltung aus aus einem kleinen Solarzellenmodul versorgt werden. Dessen Ausgangsspannung (**VSOL**) liegt am Eingang des Step-Up-Konverters U9 an, der Ausgang lädt ebenfalls den Speicherkondensator bis auf ca. 10V.

3.2 Start

Sobald die Spannung am Speicherkondensator ca. 9V überschreitet, wird mittels des Komparators U2 die Stromversorgung des Senders über Q1 eingeschaltet. Die vom LTC3588-1 gelieferte Spannung liegt nun auch an **VMCU** an. Durch diese gegenüber der Anlaufspannung des LTC3588-1 erhöhte Schaltschwelle wird sichergestellt, daß genügend Energie gespeichert ist und daß die Spannung hoch genug zum Betrieb des LT1025 ist. Über das Signal **PGOOD** und T3 wird der Komparator gesperrt bzw. abgeschaltet, falls die Ausgangsspannung des LTC3588 zu niedrig ist.

3.3 Messung 1

Der Microcontroller startet die Messung mit der Thermoelementauswertung 1, indem der Analogschalter U6 mittels **SELIAD** die Thermospannung auf den invertierenden Eingang von U7 schaltet. Des weiteren wird die Spannungsversorgung für den LT1025 über **ENCJ** und für den Verstärker über **VOPA** eingeschaltet. Der LT1025 wird direkt aus der am Speicherkondensator anliegenden Spannung versorgt. Am nichtinvertierenden Eingang liegt die vom LT1025 (U5) gelieferte Spannung zur Kaltstellenkompensation. Der OpAmp U7 verstärkt die Thermospannung auf $\frac{10mV}{\text{°C}}$, dieses Signal **ADTC** liegt an einem Eingang des A/D-Wandlers des EFM32TG222 an. Nach einer Einschwingzeit von ca. $100ms \dots 200ms$ startet der Microcontroller die Wandlung. Danach wird die Versorgung wieder abgeschaltet.

3.4 Daten senden 1

Der IRDA-Transceiver wird eingeschaltet und der EFM32TG222 aktiviert den externen Quarzoszillator (um die Baudrate für die Datenübertragung mit hinreichen hoher Genauigkeit zu erzeugen). Nachdem der Oszillator angeschwungen ist, werden die gemessenen Daten (Temperatur am Prüfling, Umgebungstemperatur, Spannung am Speicherkondensator und Kanalnr.) sowie eine Prüfsumme über IRDA gesendet.

3.5 Warten mit niedrigstem Energiebedarf

Um ein möglichst effizientes Nachladen des Speicherkondensators zu erreichen, schaltet der Mikrocontroller jetzt alle Einheiten ab und geht für einige 100ms in den Zustand EM2. Dabei wird der Stromverbrauch des Senders auf wenige μA reduziert. Danach wird eine neue Temperaturmessung gestartet.

Falls der Energiebedarf der Temperaturmessung und der Datenübertragung die gespeicherte Energiemenge vollständig aufgebraucht haben sollte, wird über den Komparator die Versorgung komplett unterbrochen, um eine noch effizientere Aufladung des Kondensators zu ermöglichen, da jetzt nur noch der extrem geringe Leerlaufstrom des LTC3588 fließt.

3.6 Messung 2

Der Microcontroller startet die Messung mit der Thermoelementauswertung 2, indem der Analogschalter U6 die Thermospannung auf den Eingang des LTC2484 (U4) schaltet. Die Versorgung des Wandlers (**VADC**) wird eingeschaltet. Des weiteren wird über das Signal **ENLDO** der LDO U10 aktiviert, der für die Zeit der Wandlung die Stromversorgung übernimmt. Während der LDO eingeschaltet ist, stellt U1 automatisch den Betrieb ein. Dies ist notwendig, da der LTC2484 von dem Schaltregler des LTC3588 während der Wandlung gestört wird und unsaubere Ergebnisse liefert. Nachdem die Thermospannung gemessen wurde, startet der Microcontroller die Messung des im LTC2484 integrierten Temperatursensors. Aus diesen Daten wird dann die Temperatur an der Messstelle berechnet. Nach der Messung wird der LDO und der Wandler wieder abgeschaltet.

3.7 Daten senden 2

Wie bei der vorherigen Wandlung werden jetzt die Daten über IRDA gesendet. Zur Unterscheidung der beiden Messverfahren wird jetzt eine andere Kanalnr. benutzt.

3.8 Warten mit niedrigstem Energiebedarf

Wie bei der vorherigen Wandlung findet jetzt eine Nachladephase für den Speicherkondensator bei niedrigstem Energiebedarf statt. Nach der Nachladephase findet die nächste Messung mit der Thermoelementauswertung 1 statt. Es werden also abwechselnd Messwerte der beiden Auswerteverfahren erfaßt und gesendet.

4 Ergebnisse

Der Prototyp wurde mit einem eigens dafür entworfenen Layout aufgebaut. Die Funktionsfähigkeit des Prototypen konnte nachgewiesen werden. In dem typischen Versuchsaufbau (das Thermoelement ist am Drain des Leistungstransistors in einem Schaltnetzteil angelötet) stellte sich heraus, daß mit dieser Methode des Energy-Harvestings ausreichend Energie geerntet werden kann, um eine Auswerteschaltung für Thermoelemente und den Microcontroller zu betreiben.

Die Datenübertragung über IRDA funktioniert zuverlässig und läßt den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Sender mit einem Empfänger zu.

Die Versorgung des Senders aus einer Solarzelle wurde getestet und funktioniert, allerdings steht mittels der Energieernte aus der Entstördrossel bei den typischen Prüflingen genügend Energie zur Verfügung, so daß die Solarzelle nicht benötigt wird.

Der Vergleich der beiden Thermoelementauswertungen hat ergeben, daß mit beiden Schaltungen das Ziel erreicht wird. Die Schaltung mit dem Delta-Sigma-Wandler hat einen etwas höheren Energiebedarf, als Vorteil ist eine etwas bessere Temperatúrauswertung möglich. Die Schaltung mit dem LT1025 und dem Zero-Drift-Verstärker kommt mit weniger Energie aus, mußte aber modifiziert werden, um eine hinreichende Gleichtaktunterdrückung zu erreichen.

Es stellte sich heraus, daß der LTC2484 vom Schaltregler des LTC3588 während der Wandlung der Thermoelementspannung gestört wird, aus diesem Grund wurde ein zusätzlicher Low-Power-LDO (U10) eingebaut, der die Stromversorgung während der Wandlungsphase übernimmt.

Die ursprüngliche Schaltung mit dem LT1025 mußte modifiziert werden, um eine ausreichende Störuneempfindlichkeit zu erreichen.

5 Vergleich der Thermoelementauswertungen

5.1 Auswertung 1

Die Schaltung mit der analogen Kaltstellenkompensation und Verstärkung der Thermospannung auf $\frac{10mV}{^{\circ}C}$ (U5, U7) hat folgende Vor- und Nachteile:

- + Der interne A/D-Wandler des EFM32TG222 kann benutzt werden
- + geringerer Energiebedarf pro Messung
- + die Schaltung ist unempfindlich gegen die Schaltfrequenz des LTC3588
- - der LT1025 benötigt eine höhere Betriebsspannung ($\geq 5V$)
- - der Eingangswiderstand (R21) belastet das Thermoelement und führt evtl. zu Messfehlern
- - der Meßbereich ist auf $0^{\circ}C \dots 250^{\circ}C$ begrenzt

5.2 Auswertung 2

Die Schaltung mit dem Delta-Sigma-Wandler (U4) zur Messung der Thermospannung hat folgende Vor- und Nachteile:

- + größerer Messbereich möglich (begrenzt durch die Eigenschaften des Thermoelementes)
- + kein zusätzlicher Kaltstellentemperaturfühler notwendig
- + geringe Belastung des Thermoelementes durch den Eingangswiderstand

- - Der Wandler wird von der Schaltfrequenz des LTC3588 gestört
- - etwas höherer Energiebedarf pro Messung
- - Abgleich bzw. Kalibrierung des Wandlers notwendig

6 Empfänger

Um die Messwerte zu visualisieren und ggf. an einem PC zu speichern und auszuwerten, wurde ein Empfänger für die mittels IRDA gesendeten Messwerte aufgebaut. Dieser besteht aus einem IRDA-Transceiver, einem Microcontroller mit USB-Schnittstelle und einem LCD. Der Empfänger kann die Messwerte von bis zu 4 Kanälen empfangen und darstellen. Der Prototyp des Senders nutzt zur Unterscheidung der beiden Thermoelementauswertungen 2 Kanäle, es können zur Zeit also 2 Sender gleichzeitig benutzt werden.

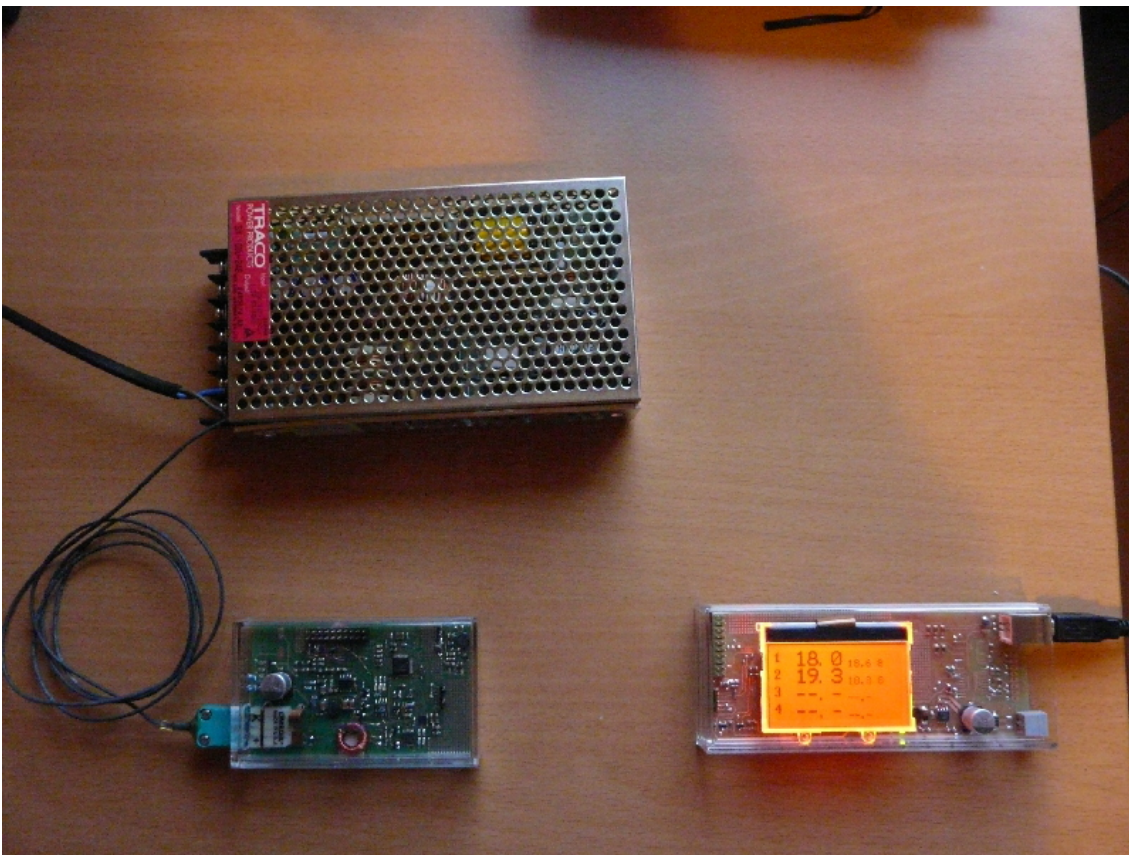


Abbildung 6: Versuchsaufbau mit Sender, Empfänger und Prüfling (Netzteil)

7 Ausblick

Aufgrund der recht hohen Energiemenge, die aus den Schaltflanken eines Prüflings gewonnen werden kann, ist eine optionale Versorgung des Senders aus Solarzellen nicht notwendig. Falls dies doch als sinnvoll angesehen wird, so sollte ein Dünnschicht-Modul verwendet werden, da diese bei geringen Lichtstärken eine bessere Ausbeute erlauben. Das im Prototyp eingesetzte Modul mit kristallinen Solarzellen benötigt eine höhere Lichtstärke, um eine verwertbare Ausgangsspannung zu liefern.

Falls der Delta-Sigma-Wandler verwendet wird, sollte anstelle des LTC3588 eine linear geregelte Spannungsversorgung verwendet werden. Der Energiebedarf für eine Messung ist gering genug, daß auf die recht hohe Einschaltsschwelle von ca. 9V am Speicherkondensator verzichtet werden kann, da die höhere Spannung nur für den LT1025 benötigt wird.

Für den notwendigen Abgleich des Systems kann z.B. während des Abgleichs eine externe Energiequelle (Einspeisung in den Speicherkondensator) und eine bidirektionale Kommunikation über IRDA verwendet werden (im normalen Messbetrieb wird über IRDA nur gesendet). Die Abgleichwerte können dauerhaft im Flash des EFM32TG222 gespeichert werden.