

Technische Universität Graz – Institut für Elektronik

DIPLOMARBEIT

# Untersuchung der Realisierbarkeit eines „Zero-Energy-Lock“

Thomas Burtscher

Institut für Elektronik  
Technische Universität Graz  
Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Bösch



in Zusammenarbeit mit

**GANTNER Electronic GmbH**

Betreuer: Dipl.-Ing. (FH) Georg Gantner

Begutachter: Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Gunter Winkler

Graz, September 2012

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

\_\_\_\_\_

Datum

\_\_\_\_\_

Unterschrift

## **Abstract**

Diese Arbeit beschreibt den Entwurf der Elektronik eines Schrankeinbauschlusses, welches RFID-Datenträger als Schlüssel nutzt. Das primäre Ziel dieser Arbeit ist die Senkung des notwendigen Energiebedarfs, um eine möglichst hohe Lebensdauer des Energiespeichers und somit des Schrankschlusses zu erreichen. Im ersten Teil der Arbeit wird der bestehende Entwurf analysiert und schaltungstechnische Nachteile in der Ausführung der Elektronik aufgezeigt. Im zweiten Teil wird aus den daraus gewonnenen Erkenntnissen ein Neuentwurf der Elektronik umgesetzt, der auch als Prototyp realisiert wird. Anschließend werden verschiedene Quellen zur Energieversorgung mittels Energy Harvesting untersucht und Möglichkeiten der Umsetzung eines solchen Energy Harvesting Systems aufgezeigt. Weiters wird versucht, den Funktionsumfang des Schrankeinbauschlusses bei gleichbleibendem oder geringerem Energieverbrauch deutlich zu erweitern.

This diploma thesis describes the design and construction of an electronic cabinet lock which utilizes RFID tags as keys. The primary goal of this work is to reduce the necessary energy consumption in order to achieve the longest possible life expectancy. First, the existing design is analyzed and major disadvantages of that circuit are indicated. Consequently, there is a redesign of the electronics as well as the construction of a working prototype. Furthermore, different types of sources for energy harvesting are examined and possible implementations are shown. There is a significantly increase in range of function at the same or lower energy consumption.

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	IV
1 Einleitung.....	1
1.1 Ziel der Arbeit.....	1
1.2 Motivation.....	2
2 Analyse des bestehenden Schlosses.....	3
2.1 Beschreibung GAT LOCK 6010F.....	3
2.1.1 Aufbau und Anwendungszweck.....	3
2.1.2 Derzeitiger Stand der Technik.....	4
2.1.3 Schematischer Ablauf eines Verriegelungszyklus.....	5
2.1.4 Schematischer Ablauf der Firmware.....	7
2.2 Strombedarf der verschiedenen Funktionsblöcke.....	9
2.3 Schaltungstechnische Nachteile des bestehenden Entwurfs.....	13
2.3.1 Spannungsteiler zur Messung der Batteriespannung.....	15
2.3.2 Linearer Spannungsregler.....	15
2.3.3 Selbsthalteschaltung.....	16
2.3.4 RTC-Baustein.....	17
2.3.5 Hubmagnet.....	17
2.4 Zwischenfazit.....	19
3 Entwurf einer stromsparenden Schaltung.....	20
3.1 Beschreibung der einzelnen Funktionsblöcke des Prototyps.....	20
3.1.1 Mikrocontroller.....	21
3.1.2 RFID-Modul.....	22
3.1.3 Funkmodul.....	25
3.1.4 Ansteuerung des Schließmechanismus.....	28
3.2 Möglichkeiten zum Senken des Energiebedarfs.....	29
3.2.1 Firmwaremäßige Optimierungen.....	29
3.2.2 Funkmodul als RTC-Ersatz.....	31
3.2.3 Vergleich unterschiedlicher Schließmechanismen.....	35

3.3 Schaltung des Prototyps.....	37
3.4 Firmware des Prototyps.....	43
3.4.1 Programmierwerkzeuge.....	43
3.4.2 Ablauf der Firmware.....	43
3.5 Aufbau einer zentralen Verwaltungsstelle.....	46
3.5.1 Schaltungstechnische Ausführung.....	46
3.5.2 Ablauf der Firmware.....	47
3.6 Zwischenfazit.....	51
4 Energy Harvesting.....	52
4.1 Überblick.....	52
4.2 Unterschiedliche Arten der Energiequellen.....	53
4.3 Untersuchung der Eignung verschiedener Quellen.....	54
4.3.1 Nicht geeignete Quellen für die konkrete Aufgabenstellung.....	55
4.3.2 Licht als Energiequelle.....	61
4.3.3 Bewegung als Energiequelle.....	62
4.4 Schematischer Aufbau eines Energy Harvesting – Systems.....	63
4.5 Zwischenfazit.....	66
5 Konzepte zur Spannungsversorgung.....	67
5.1 Details der zu versorgenden Schaltung.....	67
5.2 Versorgung mittels Batterie.....	68
5.2.1 Reiner Batteriebetrieb.....	68
5.2.2 Versorgung über DC/DC-Wandler.....	73
5.2.3 Mischformen.....	76
5.3 Verschiedene Speicherkonzepte.....	78
5.4 Versorgung mittels Solarzellen.....	79
5.4.1 Verwendete Solarzelle.....	79
5.4.2 Laden einer Kondensatorbank.....	80
5.4.3 Laden eines Akkus mit Hilfe eines Lade-ICs.....	83

5.5 Versorgung mittels Generator und Akku.....	87
5.5.1 Verwendeter Generator.....	88
5.5.2 Direkte Spannungsversorgung.....	90
5.5.3 Laden einer Kondensatorbank.....	91
5.5.4 Laden des Akkus mit Generator.....	94
5.5.5 Versorgung mittels Generator und DC/DC-Wandler.....	96
5.6 Zwischenfazit.....	97
6 Zusammenfassung und Ausblick.....	98
Literaturverzeichnis.....	i

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Schrankwand mit eingebautem Schloss.....	3
Abbildung 2.2:	Ablaufdiagramm eines Verriegelungszyklus.....	6
Abbildung 2.3:	Ablaufdiagramm eines Firmwarezyklus.....	8
Abbildung 2.4:	Schematische Darstellung des Messaufbaus.....	10
Abbildung 2.5:	Stromverlauf eines Schließzyklus beim GAT LOCK 6010F.....	11
Abbildung 2.6:	Schaltplan des GAT LOCK 6010F.....	14
Abbildung 3.1:	Funktionsblöcke des Prototyps der neuen Schlosselektronik.....	20
Abbildung 3.2:	Schaltplan des RFID-Moduls RM510.....	24
Abbildung 3.3:	Schaltplan des Funkmoduls WM800.....	27
Abbildung 3.4:	Brückenschaltung des Prototypenboards.....	29
Abbildung 3.5:	Energieverbrauch bei verschiedenen Übertragungsgeschwindigkeiten...30	
Abbildung 3.6:	Vergleich des Energiebedarfs der Schließmechanismen.....	36
Abbildung 3.7:	Schaltplan des entwickelten Eval-Boards, Seite 1.....	39
Abbildung 3.8:	Schaltplan des entwickelten Eval-Boards, Seite 2.....	40
Abbildung 3.9:	Schaltplan des entwickelten Eval-Boards, Seite 3.....	41
Abbildung 3.10:	Firmwareablauf der neuen Schlosselektronik.....	44
Abbildung 3.11:	Schematischer Aufbau der zentralen Verwaltungsstelle.....	47
Abbildung 3.12:	Firmwareablauf der zentralen Verwaltungsstelle.....	49
Abbildung 4.1:	Leistungsdichten von Energiequellen für Energy Harvesting.....	54
Abbildung 4.2:	Schematische Darstellung eines Energy Harvesting Systems.....	64
Abbildung 5.1:	Übersicht der zulässigen Versorgungsspannungen.....	68
Abbildung 5.2:	Stromverlauf bei Batterieversorgung ohne Wandler.....	70
Abbildung 5.3:	Kapazitätsverlauf der Lithiumbatterie SL-2770.....	71
Abbildung 5.4:	Stromverlauf bei Batterieversorgung mit Wandler.....	74
Abbildung 5.5:	Standardbeschaltung des Wandlers LTC3440.....	75
Abbildung 5.6:	Auszug des Datenblatts der verwendeten Solarzelle.....	80
Abbildung 5.7:	Spannungsverlauf an der Kondensatorbank.....	81
Abbildung 5.8:	Standardbeschaltung des Lade-IC BQ25504.....	85

Abbildung 5.9: Verlauf des Wirkungsgrads über die Eingangsspannung.....	86
Abbildung 5.10: Abbildung der Taschenlampe Marke AMPER LED.....	89
Abbildung 5.11: Spannungsverlauf am Generator bei Betätigung.....	90
Abbildung 5.12: Spannungsverlauf an der Kondensatorbank.....	93



# **1 Einleitung**

## **1.1 Ziel der Arbeit**

Das Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf eines elektronischen Schranksschlusses, dessen Hauptaugenmerk auf einem möglichst geringen Energieverbrauch liegt. Es soll dabei die Lebensdauer des austauschbaren Energiespeichers signifikant erhöht oder komplett auf einen austauschbaren Energiespeicher verzichtet werden.

Dazu soll, neben dem Erstellen eines möglichst energiesparenden Schaltungsentwurfs der Schrankelektronik, auch die Möglichkeit der Anwendung von Energy Harvesting zur Energiegewinnung direkt am Schloss untersucht werden. Anschließend sollen die verschiedenen Konzepte miteinander verglichen und ein Prototyp erstellt werden.

Außerdem ist die Vernetzung des Schlosses zu einer zentralen Verwaltungsstelle mittels Funk gewünscht. Dies dient vor allem der Erweiterung des Funktionsumfangs des bisherigen batteriebetriebenen Schranksschlusses. Es soll daher die Möglichkeit der Einbindung einer Funkschnittstelle untersucht werden.

## **1.2 Motivation**

In der heutigen Zeit sollte es selbstverständlich sein, sich Gedanken zu möglichen Energieeinsparungen zu machen. Mit dieser Arbeit und den daraus resultierenden Ergebnissen zur Verbesserung des Schrankschlosses ist es nicht nur möglich den Energieverbrauch zu senken, sondern auch die Umweltbelastung auf ein Minimum zu reduzieren. Dies geschieht vor allem durch die Vermeidung der Entstehung von Sondermüll in Form von Altbatterien.

Neben den Umweltaspekten stellt auch die Anwendung der neuesten Technologien des Energy Harvestings ein wichtiger Punkt dar. Ebenso ist es interessant zu sehen, dass bei geringerem Energieeinsatz eine Erweiterung des Funktionsumfangs des Schlosses möglich ist.

## 2 Analyse des bestehenden Schlosses

### 2.1 Beschreibung GAT LOCK 6010F

In diesem Abschnitt soll der Aufbau und die Funktionsweise des bestehenden batteriebetriebenen Schlosses des Typs GAT LOCK 6010F beschrieben werden. Ebenso soll das System analysiert werden und die möglichen Energieeinsparpotentiale aufgezeigt werden.

#### 2.1.1 Aufbau und Anwendungszweck

Das Schrankschloss GAT LOCK 6010F ist ein Schrankeinbauschloss und findet vorzugsweise Anwendung in Umkleideschränken, Wertfächern sowie Aktenschränken. Eine typische Anwendung eines solchen Schlosses ist im folgenden Bild dargestellt.

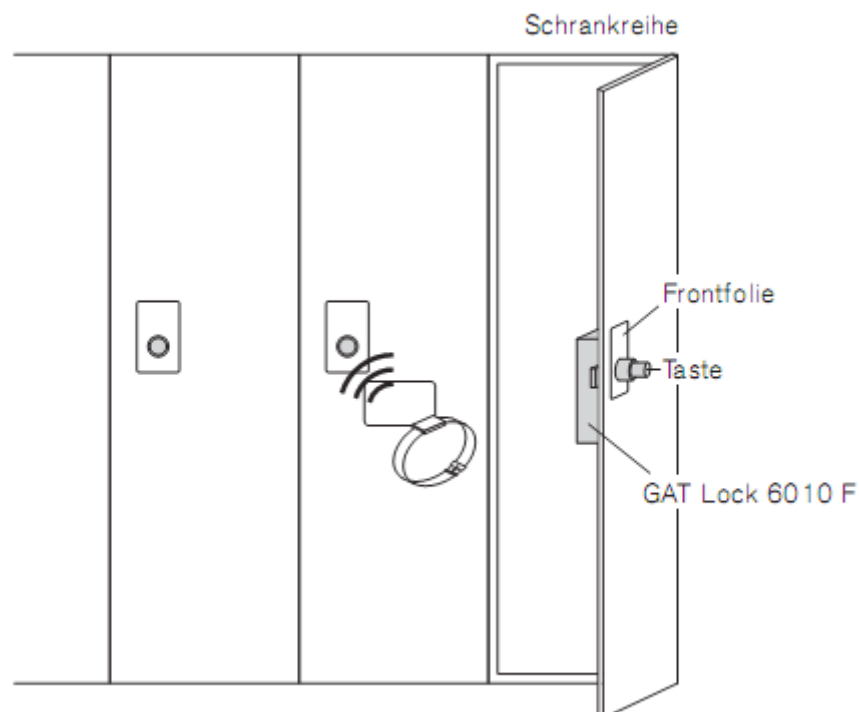


Abbildung 2.1: Schrankwand mit eingebautem Schloss [GAT01, S. 2]

Wie bereits auf dem Bild zu sehen ist, dient als Schlüssel ein RFID-Datenträger, der beliebig ausgebildet sein kann. Am weitesten verbreitet sind vor allem die Ausführung als Armband oder als Karte im Scheckkartenformat. Die Bedienung des Schlosses erfolgt durch Drücken der Taste mittels Datenträger.

Das Kernstück des mechanischen Aufbaus des Schlosses stellt der Schlossriegel sowie die Umlenkung der Taste dar. Wird nun die Taste gedrückt, so wird diese lineare Bewegung auf den Schlossriegel umgelenkt, der wiederum in eine Ausnehmung am Schrank einfährt. Somit wird die Türe verriegelt. Damit dieser Zustand auch nach dem Loslassen der Taste erhalten bleibt, muss der Verschlussriegel in seiner Sperrposition fixiert werden. Da er gegen eine Feder arbeitet, kehrt der Riegel, wenn er nicht fixiert wurde, stets wieder in die Ausgangsposition zurück.

Die Fixierung des Schlossriegels erfolgt hierbei mittels eines elektrischen Hubmagneten, der einen kleinen Verriegelungszapfen bewegt. Der Verriegelungszapfen greift in den Verschlussriegel ein und kann diesen somit in der Sperrposition fixieren. Durch die Ansteuerung des Hubmagneten mit unterschiedlichen Stromrichtungen kann die Bewegung des Verriegelungszapfens in die gewünschte Richtung erfolgen. Damit kann also der Verschlussriegel in der Sperrposition fixiert oder wieder freigegeben werden.

### **2.1.2 Derzeitiger Stand der Technik**

Der derzeitige Stand der Technik sieht es vor, dass derartige elektronische, nicht kabelgebundene Schrankeinbauschlösser nur mittels Batterie versorgt werden. Weiters ist es üblich, dass ein RFID-Datenträger oder ein Zahleneingabefeld als Schlüssel zum Einsatz kommt. Die derzeit gängigen Schließmechanismen basieren meist auf dem Prinzip, dass der eigentliche Verschlussriegel von Hand betätigt wird und lediglich die Bewegung des Verriegelungszapfens elektromechanisch erfolgt. Dies geschieht in der Regel durch einen Hubmagneten oder durch eine Motor-Getriebe-Kombination. Die Realisierung erfolgt meist durch die Ausbildung des Verriegelungszapfens als Zahnstange, die vom Motor angetrieben wird, oder durch einen Exzenter, der von einem Schneckengetriebe bewegt

wird. Der Exzenter wiederum besitzt eine mechanische Verbindung zum Verriegelungszapfen, der dadurch vor und zurück geschoben werden kann. In seltenen Fällen erfolgt die Ausbildung des Verschlusszapfens direkt als Verschlussriegel. Dies hat den Vorteil, dass die Bewegung des Verschlussriegels gänzlich elektromechanisch durchgeführt werden kann und somit keine mechanische Interaktion des Benutzers mit dem eigentlichen Schloss nötig ist. Eine solche Ausführung der Mechanik resultiert jedoch in einem stark erhöhten Energiebedarf beim Ändern der Position des Verschlussriegels.

Weiters ist es derzeit üblich, die Berechtigungen zum Öffnen oder Schließen des Schrankes alleine auf dem Datenträger oder im Schloss selbst zu hinterlegen. Es sind derzeit keine batteriebetriebenen Schrankeinbauschlösser bekannt, deren Zugriffsberechtigungen in Echtzeit und zentral bearbeitet und geändert werden können.

### **2.1.3 Schematischer Ablauf eines Verriegelungszyklus**

In diesem Kapitel wird der zeitliche Ablauf der einzelnen relevanten Schritte anhand eines Ablaufdiagramms dargestellt. Es wird in folgenden Betrachtungen stets von einem offenen Schrank ausgegangen, der abgesperrt werden soll. Folglich wird nur der Schließvorgang betrachtet. Der Öffnungsvorgang eines Schlosses verhält sich jedoch analog dazu und muss deshalb hier nicht gesondert betrachtet werden. Die nun folgenden Abläufe beziehen sich auf Untersuchungen am Schloss des Typs GAT LOCK 6010F der Firma Gantner Electronic GmbH.

Das nachfolgende Diagramm stellt den Ablauf eines Schließzyklus eines Schrankeinbauschlosses dar. Die nötige Interaktion des Benutzers mit dem Schloss soll schematisch dargestellt und verdeutlicht werden.

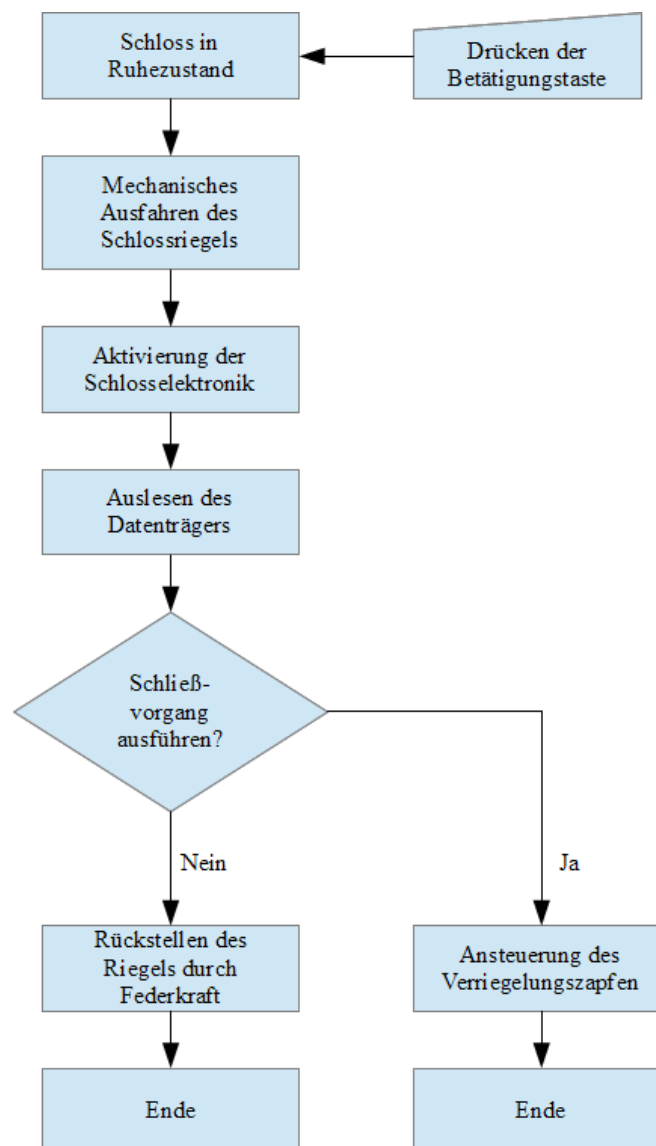


Abbildung 2.2: Ablaufdiagramm eines Verriegelungszyklus

Zu Beginn befindet sich das Schloss im ausgeschalteten und unversperrten Zustand. Durch Drücken der Betätigungstaste mittels Datenträger wird über eine mechanische Umlenkung der Schlossriegel ausgefahren und greift in eine Ausnehmung (Zuhaltung) am Schrank ein. Die Schranktüre kann somit nicht mehr geöffnet werden. Befindet sich der Schlossriegel in seiner Endposition, wird durch die Betätigung eines Mikrotasters seinerseits die Elektronik im Schrankschloss aktiviert.

Die Elektronik, die von einem Mikrocontroller gesteuert wird, überprüft anschließend die Berechtigungen der Karte und entscheidet im weiteren Verlauf, ob ein Verriegeln des Schlosses erlaubt ist oder nicht. Soll nun eine Verriegelung durchgeführt werden, so wird seitens der Elektronik der Hubmagnet angesteuert, welcher den Verriegelungszapfen in den Schlossriegel einführt. Dadurch bleibt der Schlossriegel in seiner Position fixiert und der Schrank ist auch nach dem Loslassen der Betätigungstaste weiterhin versperrt.

Sollte jedoch eine Verriegelung des Schanks nicht zulässig sein, so findet keine Ansteuerung des Hubmagneten statt. Dadurch wird der Schlossriegel nach dem Loslassen der Betätigungstaste mittels Federkraft wieder in den Ursprungszustand versetzt und gibt somit den Schrank wieder frei.

#### **2.1.4 Schematischer Ablauf der Firmware**

Das folgende Bild zeigt eine schematische Darstellung des Ablaufs der Firmware im Mikrocontroller beim Verriegeln des Schrankschlosses. Das Programm wurde in verschiedene Funktionsblöcke unterteilt, die nacheinander ausgeführt werden. Es werden nur die für das Verständnis der Funktion relevanten Teile in Blöcke gefasst und dargestellt. Sämtliche Programmabläufe für bestimmte Zusatzfunktionen sind hier nicht relevant und werden deshalb auch nicht dargestellt.

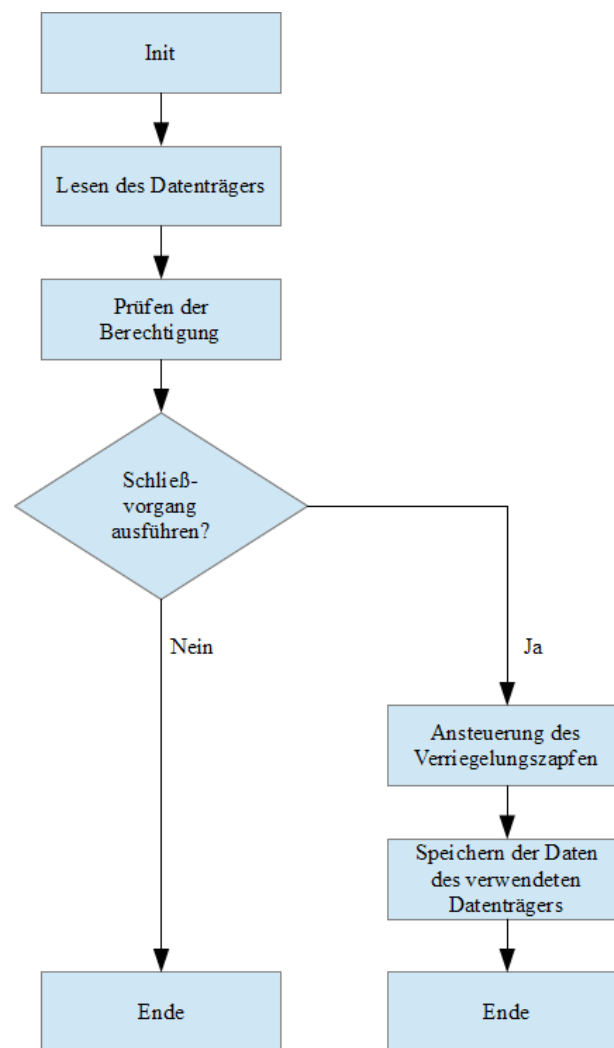


Abbildung 2.3: Ablaufdiagramm eines Firmwarezyklus

Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, wird die Elektronik durch das Drücken eines Mikrotasters durch den Verschlussriegel aktiviert. Die Firmware beginnt mit der Initialisierung des Mikrocontrollers sowie den verschiedenen benötigten Baugruppen.

Anschließend wird der RFID-Reader aktiviert und es werden die entsprechenden Daten vom RFID-Datenträger im Nahfeld gelesen. Diese gewonnenen Daten werden vom Mikrocontroller weiterverarbeitet und es folgt eine Prüfung der Berechtigung zum Versperren oder Öffnen des Schrankschlosses. Liegt eine Berechtigung vor, so wird der notwendige Schaltungsteil, hier durch eine H-Brückenschaltung realisiert, entsprechend angesteuert und führt die gewünschte Bewegung des Verriegelungszapfens durch.



Nach jedem Betätigungsvorgang werden die gelesenen Daten des Datenträgers sowie der aktuelle Zustand des Schlosses im Speicher abgelegt. Diese sind zur Ermittlung der Berechtigung zum Öffnen oder Schließen bei einer erneuten Betätigung des Schlosses notwendig.

## **2.2 Strombedarf der verschiedenen Funktionsblöcke**

Zur Ermittlung des Strombedarfs der einzelnen Schaltungsteile werden diese in Funktionsblöcke aufgeteilt. Der Strombedarf für die LED wurde in den folgenden Ausführungen nicht separat betrachtet, da ihr Gesamtanteil verschwindend gering ist.

Die Einteilung der Schaltungsteile erfolgt für die anschließende Untersuchung am bestehenden Schrankeinbauschloss GAT LOCK 6010F in folgende Funktionsblöcke:

- Mikrocontroller
- RFID-Teil
- Verschlussmechanismus

Zur Strommessung wurde ein Messwiderstand von  $1\ \Omega$  in die Versorgungsleitung eingefügt. Die Messwerte wurden dabei mit einem Oszilloskop des Typs Agilent MSO6032A erfasst und die Wertereihe als CSV-Datei exportiert. Anschließend wurden diese Werte in ein Tabellenkalkulationsprogramm importiert und zur Visualisierung als Diagramm dargestellt. Der schematische Aufbau der Messschaltung ist auf dem nachfolgenden Bild zu sehen.

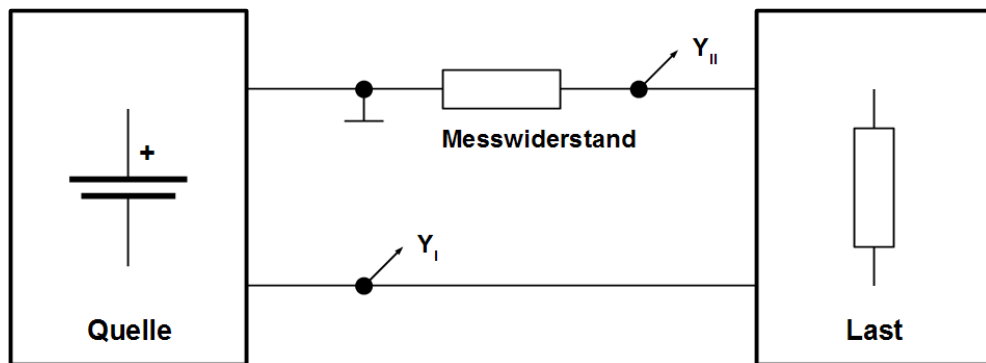


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung des Messaufbaus

Bei der Messung wurde zur Spannungsversorgung eine potentialfreie Spannungsquelle verwendet. Das Massesymbol stellt den Masseanschluss des verwendeten Oszilloskops dar. Die beiden Eingänge des Oszilloskops wurden mit  $Y_I$  und  $Y_{II}$  bezeichnet.

Im folgenden Diagramm ist der Gesamtstromverlauf des Schrankschlosses dargestellt. Die Schaltung wurde dabei mit der dafür vorgesehenen Batterie versorgt und die Batteriespannung ebenfalls aufgezeichnet.

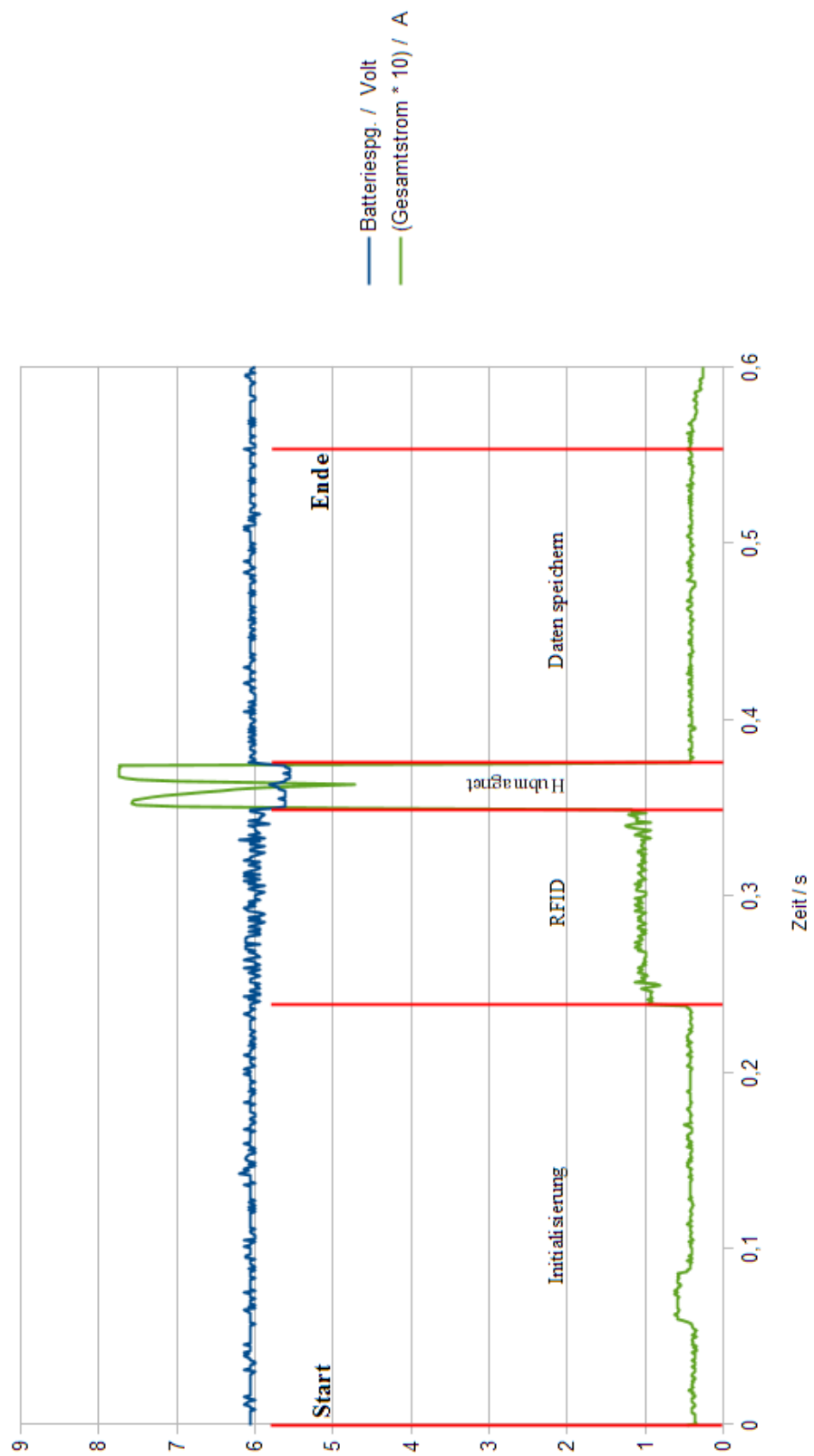


Abbildung 2.5: Stromverlauf eines Schließzyklus beim GAT LOCK 6010F

Der dargestellte Stromverlauf beginnt zum Zeitpunkt der Betätigung des Mikrotasters und stellt den Verlauf eines kompletten Schließzyklus dar. Im ersten Teil des Kurvenverlaufs ist nur der Mikrocontroller tätig und arbeitet den Initialisierungscode der Firmware ab. Anschließend wird der RFID-Reader aktiviert und kommuniziert mit dem RFID-Datenträger. Dazu ist ein HF-Feld von 13,56 MHz nötig, was in einem sehr hohen Strombedarf resultiert. Nach dem Datenaustausch mit dem mobilen Datenträger (Schlüssel) wird der Verschlussmechanismus betätigt. Da er im gegebenen Fall als Hubmagnet ausgeführt ist, entsteht ein dafür typischer, sehr hoher aber kurzer Impuls im Stromverlauf. Im darauf folgenden Bereich ist wiederum nur noch der Mikrocontroller mit der Bearbeitung sowie Speicherung der zuletzt verwendeten und relevanten Daten beschäftigt.

Da die Spannungsversorgung des Schlosses auch nach dem Ablauf des Zyklus bei dieser Messung noch eingeschaltet blieb, ist auch nach der Beendigung des Schließzyklus eine signifikante Stromaufnahme zu verzeichnen. Der Mikrocontroller befindet sich dabei allerdings in einer Endlosschleife, die weiterhin mit voller Taktfrequenz bearbeitet wird. Dies ist ein Punkt, der im Neuentwurf der Schaltung zu berücksichtigen ist und wird deshalb im Kapitel 2.3 genauer analysiert.

Die Dauer des Ablaufs eines Zyklus beträgt im Idealfall 560 ms. Dies bedeutet, dass der verwendete RFID-Datenträger ohne Probleme gelesen werden konnte und keine Wiederholungen der Leseroutinen nötig waren.

Die Berechnung mittels Tabellenkalkulationsprogramm ergeben einen Gesamtenergieverbrauch von 276,78 mWs für den Ablauf dieses Schließzyklus. Der mittlere Strom über den betrachteten Zeitraum beträgt 83,87 mA.

### **2.3 Schaltungstechnische Nachteile des bestehenden Entwurfs**

Bei der genauen Analyse des bestehenden Entwurfs wurden einige schaltungstechnische Nachteile wie auch Verbesserungsmöglichkeiten in der Firmware festgestellt. Die entsprechenden Punkte werden nun nacheinander aufgelistet und beschrieben. Die jeweiligen Funktionsblöcke sind im Schaltplan markiert und beschriftet.

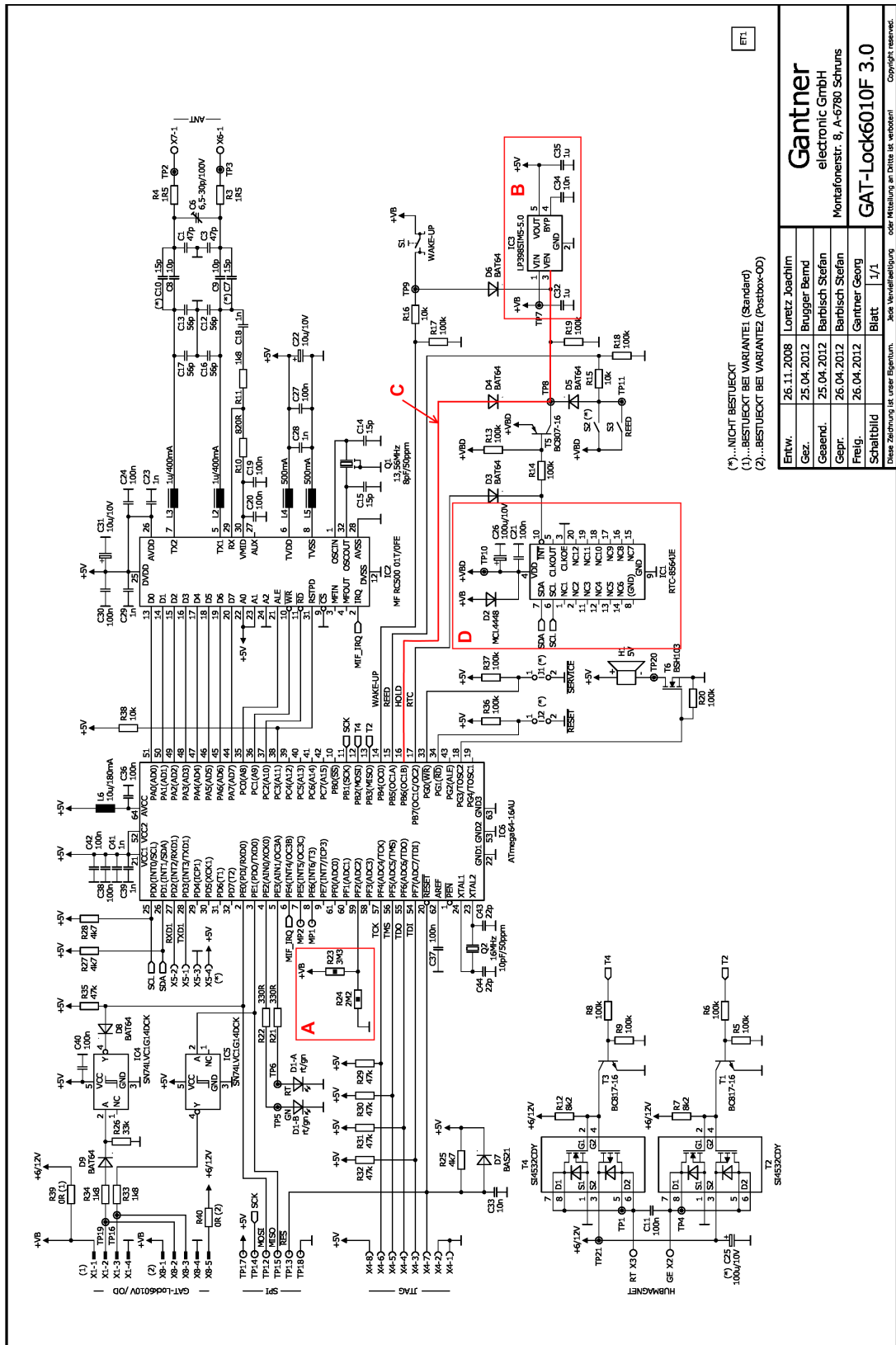


Abbildung 2.6: Schaltplan des GAT LOCK 6010F

Entw.:	26.11.2008	Lonez, Joachim
Gez.:	25.04.2012	Burger, Bernd
Gepr.:	25.04.2012	Barbisch, Stefan
Freig.:	26.04.2012	Barbisch, Stefan
Schaltbild	Blatt	1/1
Dieser Zeichnung ist unser Eigentum. Jede Vervielfältigung oder Mitteilung an Dritte ist verboten. Copyright reserved.		

**Gantner**  
 electronic GmbH  
 Montafonerstr. 8, A-6780 Schnus  
**GAT-Lock6010F 3.0**

### 2.3.1 Spannungsteiler zur Messung der Batteriespannung

Die Batterie im bestehenden Entwurf ist vom Typ 2CR5 und ist eine Lithiumbatterie. Sie besitzt eine nominale Nennspannung von 6 V. Da der Mikrocontroller die Batteriespannung erfasst, um bei zu geringer Spannung keine weiteren Schließzyklen mehr zuzulassen, muss dieser die Batteriespannung bei jedem Schließvorgang erfassen. Die maximal zulässige Eingangsspannung des internen AD-Wandlers beträgt bei dem verwendeten Mikrocontroller bei der hier angewandten Beschaltung maximal 5,3 V [ATM01, S. 332-334].

Der dadurch nötige Spannungsteiler wird durch die Widerstände R23 und R24 gebildet und ist im Schaltplan im Funktionsblock A zu sehen. Der schaltungstechnische Nachteil liegt nun darin, dass die Versorgung des Spannungsteilers direkt an +VB angeschlossen ist und somit direkt an der Batterie hängt. Dadurch fließt im Spannungsteiler immer ein kleiner Strom, der zur Entladung der Batterie beiträgt. Mittels des Ohmschen Gesetzes und der Annahme, dass die Nennspannung der Batterie von 6 V anliegt, erhalten wir folgenden Strom:

$$I_{\text{Spannungsteiler}} = \frac{U_{\text{Batterienennspannung}}}{(R_{23} + R_{24})} = 1,091 \mu A \quad [2.1]$$

Obwohl der errechnete Strom nur im Bereich von 1  $\mu A$  liegt, wirkt er sich bereits maßgeblich auf die Batterielebensdauer aus. Er liegt somit in der selben Größenordnung wie der Strombedarf eines RTC-Bausteins. Es gilt daher, solche stetigen Entladeströme bei einem neuen Schaltungsentwurf unbedingt zu vermeiden.

### 2.3.2 Linearer Spannungsregler

Der im Schaltplan als Funktionsblock B gekennzeichnete Spannungsregler arbeitet nach dem Prinzip der linearen Spannungsregler. Dies hat im Allgemeinen zwei erhebliche Nachteile zur Folge.

Meistens ist ein Spannungsabfall von mindestens 0,6 V oder mehr über dem Regler zu garantieren. Dies kann bei einer nominalen Batteriespannung von 6 V und einer gewünschten Ausgangsspannung von 5 V, bei bereits teilentladener Batterie nicht mehr garantiert werden und zu unzulässigen Betriebsbedingungen führen. Diesem Problem wurde hier durch die Verwendung eines Low-Drop-Spannungsreglers des Typs LP3985 entgegengewirkt [TI01, S. 1].

Ein weiterer Nachteil stellt die hohe Verlustleistung auf Grund des Wirkprinzips des Spannungsreglers dar. Bei der bestehenden Schaltung wird neben dem Mikrocontroller auch der RFID-Reader über den linearen Spannungsregler versorgt. Der RFID-Reader besitzt jedoch bei eingeschaltetem HF-Feld eine sehr hohe Stromaufnahme von bis zu 150 mA, was zu einer sehr hohen Verlustleistung im Regler führt [NXP02, S. 3].

### **2.3.3 Selbsthalteschaltung**

Wie im Schaltplan zu sehen ist, verfügt die Versorgung der Schaltung über eine Selbsthalteschaltung. Diese ist im Plan als mit C markierte Leitung zu sehen, die den Spannungsregler ansteuert, der wiederum direkt an der Batterie angeschlossen ist. Dies ist nötig, da die Aktivierung der Gesamtschaltung über den Mikrotaster durch Drücken der Betätigungstaste erfolgt und dieser unter Umständen nicht ausreichend lange gedrückt wird, um den vollen Firmwarezyklus zu durchlaufen.

Wird die Betätigungstaste jedoch über den nötigen Zeitraum hinaus weiter gedrückt gehalten, so wird die Schaltung auch weiterhin versorgt. Da der Mikrocontroller sich und die anderen Baugruppen nicht in einen Ruhemodus versetzt, sondern in einer Endlosschleife weiterhin mit voller Taktfrequenz arbeitet, ist ein sehr hoher bleibender Strom zu verzeichnen.



Dies führt vor allem bei klemmenden Tastern, die anschließend nicht oder nicht immer in die Ausgangsposition zurückkehren, zum schnellen Entladen und Entleeren der Batterie. Weiters ist durch den Einsatz in meist öffentlichen Bereichen und Gebäuden eine mutwillige, jedoch behebbare, Blockade der Taster nicht auszuschließen. Wird solch ein Zustand nicht schnellstmöglich entdeckt, so ist die Batterie meist bereits soweit entladen, dass sie ausgetauscht werden muss.

### **2.3.4 RTC-Baustein**

Hier wird ein externer Uhrenbaustein verwendet, der stetig von der Batterie versorgt werden muss. Dies ist bei Schlössern, die keine ständige Kommunikationsverbindung nach außen besitzen, unerlässlich, da die Berechtigungen der Karten zum Schließen und Öffnen meist zeitgebunden sind und das System somit über die aktuelle Uhrzeit verfügen muss.

Es sollen im Zuge der Diplomarbeit Alternativen zu einem RTC gesucht werden, die vor allem energietechnisch besser abschneiden und auch nicht auf eine permanente Versorgung angewiesen sind. Dieser Punkt wird im Kapitel 3.2.2 genauer behandelt.

### **2.3.5 Hubmagnet**

Bei dem bestehenden Entwurf des Schrankschlosses kommt ein Hubmagnet zur Ansteuerung der Verriegelungsmechanik zum Einsatz. Der Hubmagnet wird dabei mittels einer H-Brücke angesteuert, welche direkt von der Batterie versorgt wird.

Es ist nicht zu vernachlässigen, dass der Hubmagnet auch gewisse Vorzüge gegenüber den anderen Ausführungsformen aufweisen kann. Um die Verriegelungsmechanik zu betätigen, ist nur eine kleine lineare Bewegung notwendig. Diese kann von einem Hubmagneten direkt ausgeführt werden, und somit kann auf ein aufwendiges Getriebe verzichtet werden. Dies ist normalerweise nötig, um die Drehbewegung eines Motors in

die nötige lineare Bewegung umzusetzen. Neben der Vereinfachung des gesamten Mechanismus ist auch die dadurch erreichbare kleinere Bauform ein weiterer Vorteil. Ebenso kann die um den Faktor 10 kleinere Betätigungszeit eines Hubmagneten gegenüber einer motorbetriebenen Lösung als klarer Vorteil gesehen werden.

Der entscheidende Nachteil bei dieser Anwendung besteht im großen Impulsstrom des Hubmagneten, der zur Betätigung erforderlich ist. Dieser muss von der Batterie allein bereitgestellt werden und beträgt mindestens 800 mA bei einer Einschaltdauer von 25 ms.

Dies ist ein sehr hoher Strom und somit ist die Auswahl der zu verwendenden Batterien bereits sehr stark eingeschränkt. Des Weiteren ist eine Batterie nur in nahezu vollem Zustand fähig, einen solch hohen Impulsstrom zu liefern. Dies war auch der bisher größte Nachteil des bestehenden Entwurfs. Die Batterien mussten oft bereits ausgetauscht werden, obwohl sie noch etwa rund die Hälfte der ursprünglichen Kapazität aufwiesen. Dennoch war es in diesem Ladezustand den Batterien nicht mehr möglich, den hohen Impulsstrom zur Verfügung zu stellen und den Hubmagneten somit sicher zu betätigen.

Es soll daher bei der Neuentwicklung des Schrankschlosses auf eine motorbetriebene Lösung gesetzt werden. Diese weist neben dem Nachteil der längeren Betätigungsdauer den entscheidenden Vorteil des geringen Gesamtstroms auf. Der Strom kann dabei auf rund 1/10 des Impulsstroms reduziert werden. Damit sollte es möglich sein, die Kapazität der Batterie besser zu nutzen und somit ihre Lebensdauer zu verlängern.

## **2.4 Zwischenfazit**

Es wurde deutlich, dass die bisherige Schlosselektronik mehrere schaltungstechnische Defizite aufweist, die zu einem erhöhten Gesamtenergiebedarf führen. Die Nachteile der bestehenden Schlosselektronik sollen kurz zusammengefasst werden:

- **Spannungsteiler zur Messung der Batteriespannung**  
Der Spannungsteiler wird direkt von der Batterie gespeist und stellt dadurch einen zusätzlichen statischen Entladestrom dar.
- **Linearer Spannungsregler**  
Ein linearer Spannungsregler besitzt gerade bei großen Strömen eine sehr hohe Verlustleistung und somit einen kleinen Wirkungsgrad.
- **Selbsthalteschaltung**  
Das Deaktivieren der Selbsthalteschaltung stellt nach Ablauf des Schlosszyklus die einzige Abschaltmöglichkeit dar. Wird die Selbsthalteschaltung danach weiter durch den Taster überbrückt, so befinden sich mehrere Funktionsblöcke weiterhin im aktiven Zustand, was einen sehr hohen Strombedarf zur Folge hat.
- **RTC-Baustein**  
Da die Schaltung über die aktuelle Uhrzeit verfügen muss, ist der Einsatz eines RTC-Bausteins notwendig. Dieser besitzt jedoch eine statische Stromaufnahme, die den Energiespeicher belastet.
- **Hubmagnet**  
Ein Hubmagnet besitzt eine sehr hohe impulsförmige Stromaufnahme und stellt daher hohe Anforderungen an die Stromlieferfähigkeit des Energiespeichers.

Weiters wurde durch Messungen ermittelt, dass der Gesamtenergiebedarf für den Ablauf eines Schließzyklus bei 276,78 mWs liegt. Es erfolgte dabei eine mittlere Stromaufnahme von 83,87 mA durch die Schlosselektronik.

### 3 Entwurf einer stromsparenden Schaltung

Dieses Kapitel beschreibt die Entwicklung einer stromsparenden Ausführung der Steuerelektronik für ein Schrankschloss. Ziel ist es, einen erheblich geringeren Stromverbrauch bei gleichbleibendem oder erweitertem Funktionsumfang gegenüber der bestehenden Schaltung zu erreichen.

#### 3.1 Beschreibung der einzelnen Funktionsblöcke des Prototyps

Die neue Schlosselektronik kann in einzelne Funktionsblöcke unterteilt werden. Auf dem nachfolgenden Bild sind die vier Funktionsblöcke der Schaltung zu sehen. Auf die Spannungsversorgung wurde hier bewusst nicht eingegangen, da sie im Kapitel 5 separat behandelt wird.

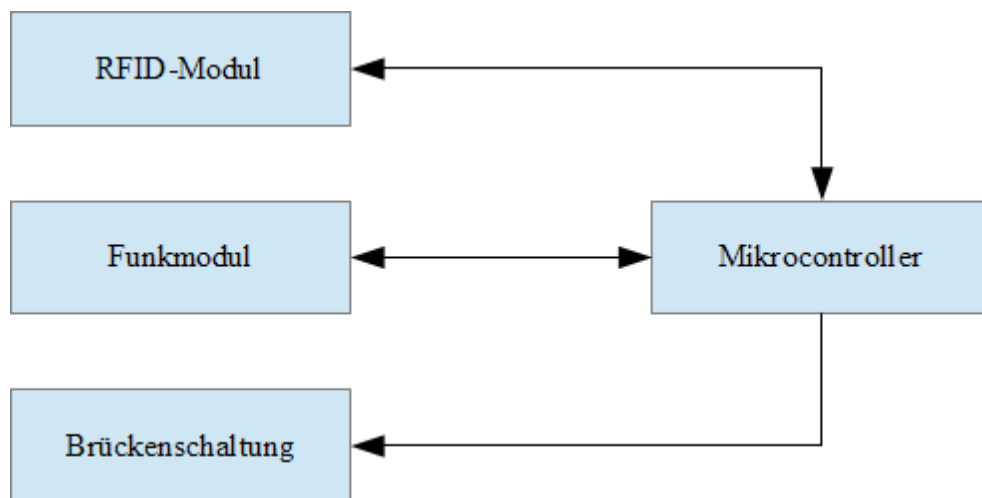


Abbildung 3.1: Funktionsblöcke des Prototyps der neuen Schlosselektronik

### 3.1.1 Mikrocontroller

Die Wahl fiel auf einen Mikrocontroller der im Bereich der energiesparenden Mikrocontroller führenden Firma Energy Micro. Es wurde sich für einen Mikrocontroller aus der Serie „Giant Gecko“ entschieden, da dieser alle benötigten Funktionseinheiten aufweist und darüber hinaus, sich durch den großen Funktionsumfang auch für Weiterentwicklungen eignet. Bei dieser Mikrocontrollerfamilie kommt ein 32-bit ARM Cortex-M3 Kern zum Einsatz und entspricht somit dem aktuellen Stand der Technik im Bereich der Embedded Systems [EM02, S. 1]. Der Mikrocontroller besitzt in der verwendeten Ausführung, dem EFM32GG380F1024, einen Flashspeicher von 1024 KB sowie einem RAM von 128 KB. Als Gehäusevariante wurde, auf Grund der einfacheren Handhabbarkeit beim Prototypen, die Bauform LQFP100 gewählt [EM01, S. 2].

Besonders bemerkenswert ist der geringe Stromverbrauch von maximal  $270 \mu\text{A}/\text{MHz}$  bei der Standardtaktfrequenz (Default-Einstellung) von 14 MHz [EM01, S. 12]. Dies gilt nur für den Prozessorkern ohne Peripherie und entspricht einem maximalen Gesamtstrom von 3,78 mA im Betrieb.

Der bisher verwendete ATMEGA 64L wurde mit einem externen Quarz bei 16 MHz betrieben. Trotz der etwas höheren Frequenz ist dieser Prozessor jedoch auf Grund der Architektur dem verwendeten EFM32GG380F1024 leistungsmäßig unterlegen. Der Strombedarf des ATMEGA 64L liegt bei rund 18 mA bei einer Versorgungsspannung von 5 V [ATM01, S. 344]. Dies entspricht einem mehr als vierfach höheren Stromverbrauch gegenüber dem Prozessor der Firma Energy Micro. Durch die Verwendung des neuen Prozessors kann somit eine erhebliche Energiemenge eingespart werden.

### **3.1.2 RFID-Modul**

Als Datenträger kommen weiterhin RFID-Tags, vorwiegend des Typs MIFARE Classic der Firma NXP, zum Einsatz. Die Wahl fiel dabei auf den aktuellen Baustein CLRC663 – Contactless Reader IC der Firma NXP. Für die Auswahl waren vor allem der große Funktionsumfang sowie die Kompatibilität zu den anderen Geräten der Firma Gantner Electronic GmbH entscheidend. Aus energietechnischer Sicht waren zum Zeitpunkt der Recherche keine besseren alternativen Produkte mit dem selben Funktionsumfang verfügbar.

Der komplette RFID-Funktionsblock wurde als eigenständiges Modul mit der Bezeichnung RM510 gefertigt und ist zum Aufstecken auf den Prototypen vorgesehen. Dieses Modul wurde in einem bereits firmenintern definierten Formfaktor gefertigt und kann somit auch in den anderen Geräten der Firma Gantner Electronic GmbH mit entsprechender Schnittstelle verwendet werden.

Das neu entworfene RFID-Modul soll das bisher verwendete Modul ablösen und zukünftig in Serie produziert werden. Dazu ist es nötig, sich an die bereits definierte Schnittstelle der Firma Gantner Electronic GmbH anzupassen, auch wenn dies teilweise im Gegensatz zu den gewünschten Eigenschaften des Prototyps steht. Dies bezieht sich neben der Anwendung einer UART-Schnittstelle vor allem auf die vorgeschriebene Versorgungsspannung von 5 V. Das Modul wurde daher so entworfen, dass die bisherigen Reader-Module ersetzt werden können, jedoch auch mit geringem Aufwand so umgebaut werden kann, dass sie alle Ansprüche der neuen Schlosselektronik erfüllen. Der Schaltplan des Moduls RM510 ist am Ende dieses Kapitels angefügt.

Das Modul wurde für eine Betriebsspannung von 5 V ausgelegt, besitzt jedoch keinen eigenen Spannungsregler, und kann somit auch mit jeder beliebigen Spannung von Seiten des Prototypenboards versorgt werden. Weiters befindet sich auf dem Board eine Antennenumschaltung, die jedoch für den erstellten Prototypen nicht bestückt wurde und mit dem 0  $\Omega$  - Widerstand R10 umgangen wurde.

Der Baustein CLRC663 besitzt mehrere Schnittstellen zur Datenübertragung an den Mikrocontroller. Die in der Serienproduktion verwendete UART-Schnittstelle wird beim Neuentwurf der Schlosselektronik durch eine SPI-Schnittstelle ersetzt. Die verwendete Schnittstelle wird dabei mittels den Programmierwiderständen an den Eingängen IFSEL0 und IFSEL1 eingestellt und entsprechend angepasst. Dazu wird der Widerstand R5 ausgelötet und der Widerstand R6 bestückt [NXP01, S. 66].

Eine Besonderheit stellen die durchverbundenen Jumper im Schaltplan dar. Diese deuten lediglich ein sehr dünnes Leiterbahnstück an, das sehr einfach, durch Abkratzen der Leiterbahn, unterbrochen werden kann. Anschließend kann am gegenüberliegenden offenen Jumper, der als Lötösen oder Stiftleiste ausgeführt ist, eine Strommessung durchgeführt werden. Bei Nichtgebrauch der Strommessmöglichkeit kann durch den Einsatz einer Drahtbrücke oder eines Jumpers die Verbindung der Leiterbahn wieder hergestellt werden.

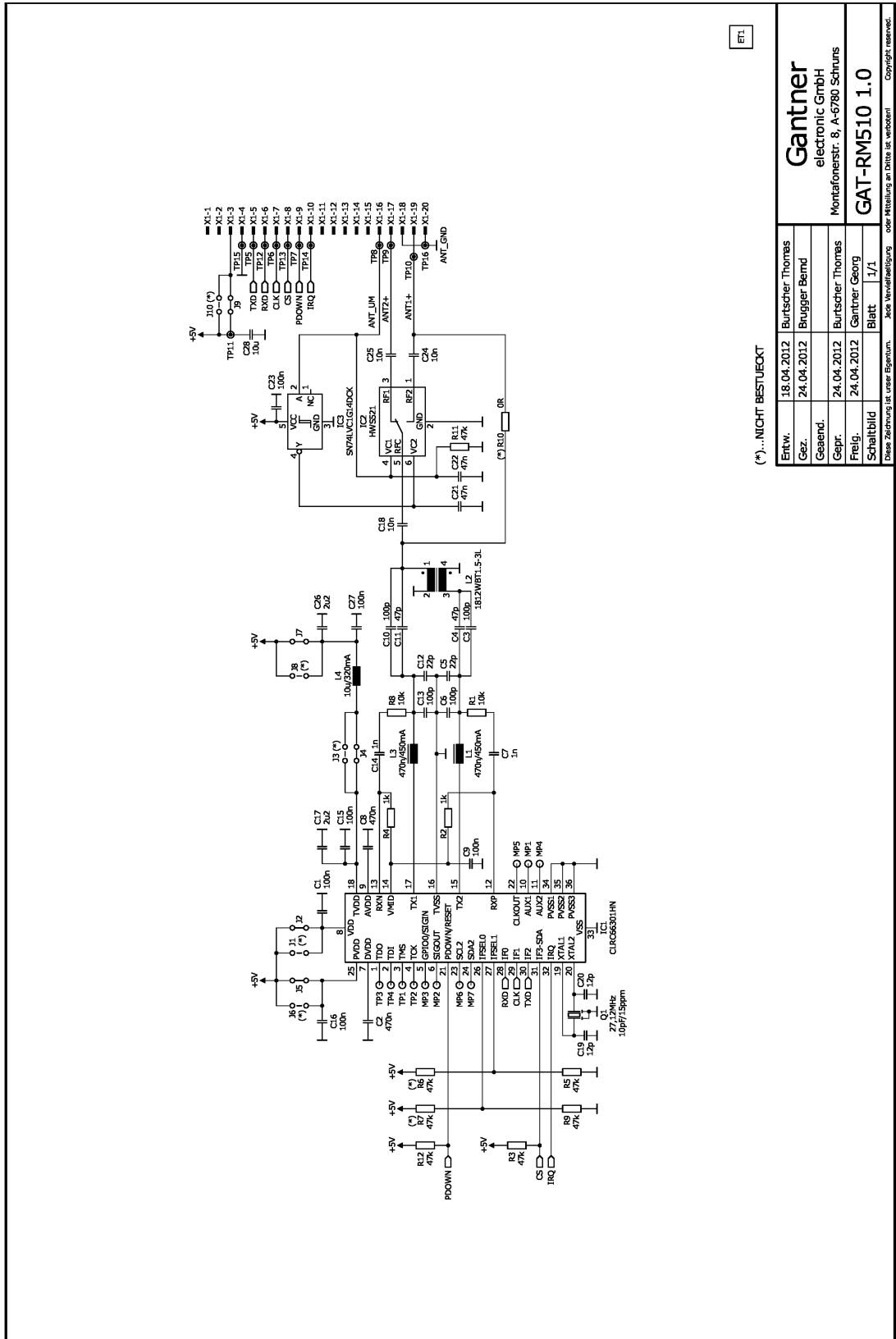


Abbildung 3.2: Schaltplan des RFID-Moduls RM510



### 3.1.3 Funkmodul

Das Funkmodul WM800 stellt einen weiteren Funktionsblock des Entwurfs der neuen Schrankelektronik dar. Es dient zur Vernetzung der einzelnen Schrankschlösser mit einer zentralen Verwaltungsstelle, welche die jeweiligen Berechtigungen der einzelnen Datenträger festlegt und vorhält. Der entsprechende Schaltplan befindet sich am Ende dieses Kapitels.

Auf Grund des geringen Strombedarfs sowie aus Gründen der Kompatibilität zu den anderen bestehenden Geräten der Firma Gantner Electronic GmbH wurde zu Gunsten des CC1101 der Firma Texas Instruments entschieden. Der Funkchip kann über den SPI-Bus angesteuert werden und besitzt viele nützliche Funktionen zur Datenübertragung bereits hardwaremäßig integriert. Dies bedeutet eine Entlastung des Prozessors des angeschlossenen Mikrocontrollers. Eine Auflistung aller Vorteile und Funktionen im analogen sowie digitalen Bereich findet sich unter [TI02, S. 2].

Auch dieses Modul wurde im bereits erwähnten firmenintern definierten Formfaktor umgesetzt und an die bestehende Schnittstelle angepasst. Es soll ebenso in Serie gefertigt werden und in bestehenden sowie in zukünftigen Entwicklungen der Firma Gantner Electronic GmbH eingesetzt werden. Durch die Anpassung an die bestehende Schnittstelle wurde ein Spannungsregler erforderlich, der die Betriebsspannung von 5 V auf unter die maximal zulässigen 3,9 V des Funkmoduls herunter regelt [TI02, S. 8].

Damit das Funkmodul auch im Prototypen unter den dort gewünschten Betriebsbedingungen verwendet werden kann, wurde der Spannungsregler ausgelötet und durch den Widerstand R2 umgangen. Weiters wurden auch hier wieder Strommessmöglichkeiten in Form von zu durchtrennenden Leiterbahnen und entsprechenden Lötaugen eingesetzt. Die sonstige Beschaltung des Bausteins CC1101 stellt eine Adaption der Application Note CC1101EM [TI03] sowie einem Schaltungsentwurf eines USB-Dongles mit dem Chip CC1111 [TI04, S. 3] von TI dar.

Das Modul wurde für einen Betrieb auf 868 MHz ausgelegt und die entsprechende Antenne sowie Anpassung verwendet. Zum Einsatz kommt eine PCB-Antenne mit sehr geringem Platzbedarf. Das Antennendesign entspricht einem Referenzvorschlag von Texas Instruments und wird in der Design Note DN016 beschrieben. Die genauen Abmessungen der Antenne sind in folgendem Dokument nachzulesen: [TI05, S. 3].

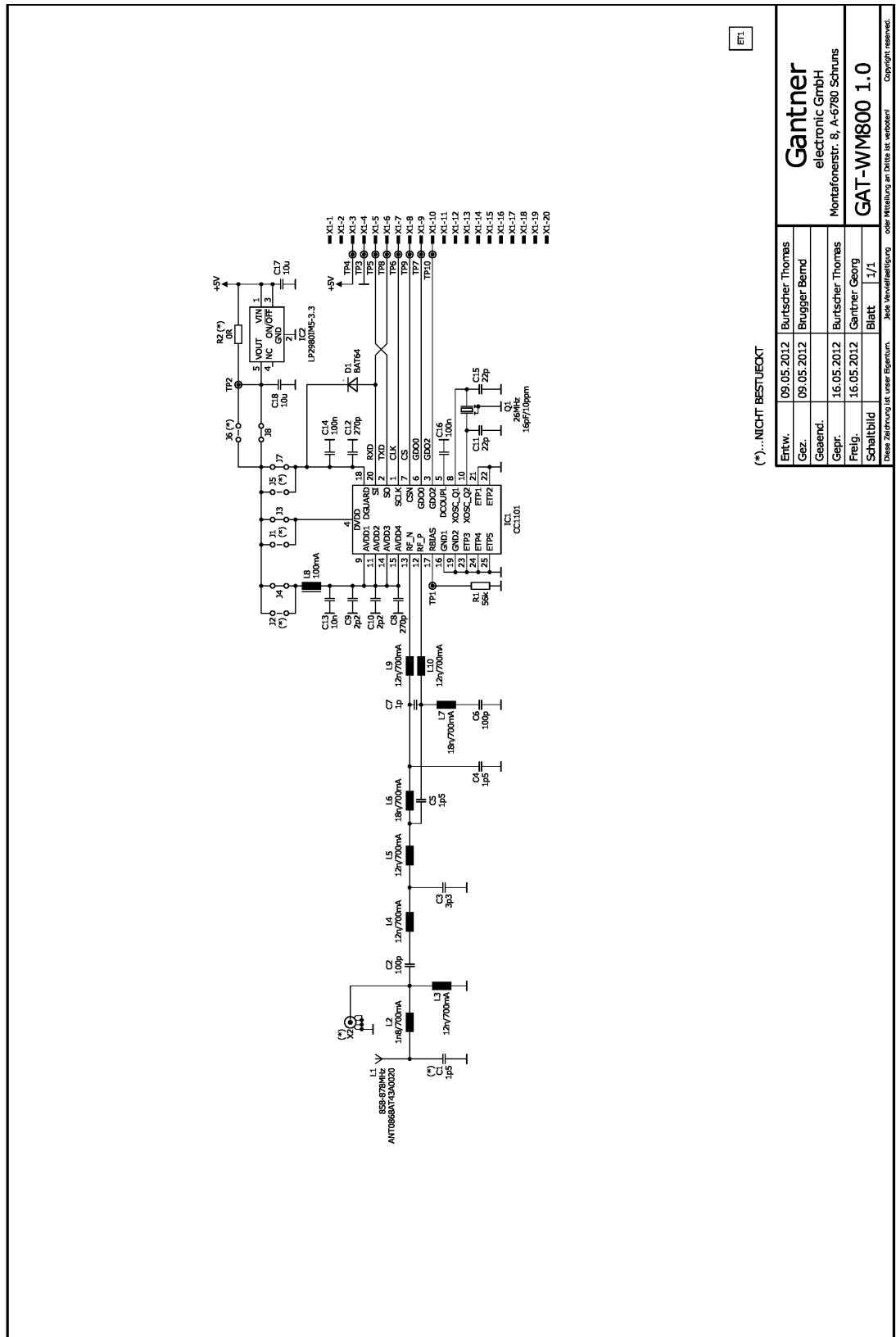


Abbildung 3.3: Schaltplan des Funkmoduls WM800

### **3.1.4 Ansteuerung des Schließmechanismus**

Zur Ansteuerung des Schließmechanismus wird ein Vierquadrantensteller, also eine elektronische H-Brückenschaltung, verwendet, dessen Schalter mittels Mosfets realisiert werden. Die Brückenschaltung wird statisch angesteuert und dient nur der Änderung der Polung der Spannung am Schließmechanismus. Das elektromechanische Stellglied kann so in beide Richtungen bewegt werden, was ein Öffnen oder Versperren des Schrankschlosses ermöglicht.

Als Schalter kommen zwei Doppel-Mosfets mit einer sehr geringen Gate-Threshold-Voltage zum Einsatz. Dies ermöglicht eine direkte Ansteuerung der Mosfets mittels Mikrocontroller auch bei kleinen Versorgungsspannungen [AO01, S. 2].

Auf dem folgenden Schaltplanausschnitt ist die H-Brückenschaltung, sowie ein Messwiderstand zur Strommessung mittels ADC, zu sehen. Das Prototypenboard bietet zusätzlich die Möglichkeit, den Stellmotor bzw. Hubmagneten mittels einer externen Spannungsquelle zu versorgen. Die Auswahl erfolgt durch Stecken der entsprechenden Jumper in der Stiftleiste X10. Die Widerstände R1 und R2 dienen der Spannungsbereichsanpassung des ADC. Der eigentliche Messwiderstand wird durch R3 dargestellt. Die Stiftleiste X11 stellt die Schnittstelle zum Mikrocontroller dar und wird entsprechend durchverbunden.

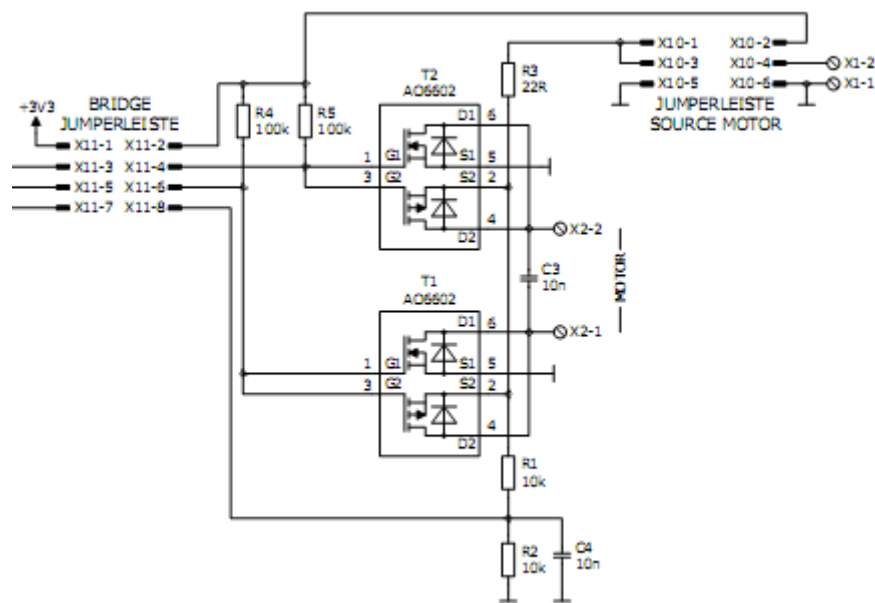


Abbildung 3.4: Brückenschaltung des Prototypenboards

## 3.2 Möglichkeiten zum Senken des Energiebedarfs

### 3.2.1 Firmwaremäßige Optimierungen

Wie die Analyse des bestehenden Schlosses ergab, beherbergt nicht nur die Hardware, sondern auch die Firmware ein hohes Potential zur Energieeinsparung. Die wichtigsten Punkte sind nachfolgend aufgelistet und sollen kurz beschrieben werden:

- Sinnvoller Einsatz der Stromsparmodi
- Hohe Datenraten bei der Kommunikation zwischen den Funktionsblöcken
- Nicht benötigte Funktionsblöcke in Ruhezustand versetzen

Obwohl der Mikrocontroller bereits einen sehr geringen Strombedarf aufweist, macht es Sinn, die verschiedenen Ruhemodi, hier Energy Mode genannt, gezielt einzusetzen. Der verwendete Mikrocontroller besitzt neben dem normalen Betriebsmodus vier weitere „Energy Modes“. Je nach Energy Mode werden gewisse Peripheriegruppen des

Mikrocontrollers abgeschaltet. Durch eine Vielzahl von verschiedenen Arten des Interrupts kann der Mikrocontroller wieder in den Betriebsmodus versetzt werden und seinen Programmablauf weiter fortführen. So kann etwa die H-Brückenschaltung entsprechend angesteuert werden und anschließend der Mikrocontroller in den Ruhemodus versetzt werden. Die Pegel an den Ausgängen bleiben erhalten und somit wird das Stellelement weiterhin von der Brücke angesteuert. Beim Erreichen der Endposition des Verschlusszapfens wird ein Mikrotaster betätigt, der wiederum einen Interrupt im Mikrocontroller auslöst. Dadurch wird der Mikrocontroller aufgeweckt und der Programmablauf wird fortgesetzt.

Durch das Erhöhen der Datenübertragungsrate, hier auf der SPI-Schnittstelle, ergibt sich ein weiteres wichtiges Einsparpotential. Da die Daten schneller übertragen werden, befindet sich der entsprechende Baustein kürzer in seinem aktiven Modus und verbraucht dadurch weniger Energie. Das mögliche Einsparpotential soll kurz anhand eines Beispiels aufgezeigt werden. Es wird dazu der Gesamtenergiebedarf des RFID-Readers betrachtet. Dies bedeutet, der Energiebedarf des Bausteins wird bei zwei verschiedenen Taktraten, die um den Faktor 10 auseinanderliegen, betrachtet. Die zu übertragene Datenmenge bleibt jeweils gleich und entspricht der nötigen Datenmenge bei einem normalen Ablauf eines Schließ- oder Öffnungsvorganges des Schlosses.

Geschwindigkeit Symbole/s	$U_{\text{vorher}}$ V	$U_{\text{nachher}}$ V	$W_{\text{gesamt}}$ mWs
50 kbaud	3,615	3,396	26,87
500 kbaud	3,593	3,533	7,48

Abbildung 3.5: Energieverbrauch bei verschiedenen Übertragungsgeschwindigkeiten

Zur Messung des Energiebedarfs wurde das RFID-Modul aus einer Kondensatorbank mit einer Gesamtkapazität von 35.000  $\mu\text{F}$  gespeist. Die Kondensatorbank wurde vor der Aktivierung des Moduls auf rund 3,6 V aufgeladen und dann von der Spannungsversorgung getrennt. Nach dem Einlesen des Datenträgers wurde die Spannung an den Klemmen der Kondensatorbank erneut gemessen. Aus dem Spannungsunterschied konnte über die Kapazität der Kondensatorbank die entnommene Energie berechnet werden. Die Berechnung erfolgte im Tabellenkalkulationsprogramm nach folgender Formel:

$$W_{\text{gesamt}} = \frac{C_{\text{ges}} * (U_{\text{vorher}})^2}{2} - \frac{C_{\text{ges}} * (U_{\text{nachher}})^2}{2} \quad [3.1]$$

Die Erfassung des Stromverlaufs mittels Oszilloskop und anschließender Auswertung der Messung in einem Tabellenkalkulationsprogramm gestaltete sich auf Grund der hohen Frequenzen sowie der kleinen Signalamplituden als äußerst schwierig.

Eine weitere Möglichkeit, den notwendigen Gesamtenergiebedarf zu senken, ist eine möglichst schnelle Initialisierung der Funktionsblöcke, um einen undefinierten Zustand des Halbleiterbausteins zu vermeiden. Zwischen Anlegen der Spannungsversorgung und Initialisierung befindet sich der Baustein in einem undefinierten Zustand, was meist eine hohe Stromaufnahme zur Folge hat. Ebenso sollten die Funktionsblöcke nach Beendigung ihrer Aufgaben sofort wieder deaktiviert und in einen Ruhezustand versetzt werden.

### 3.2.2 Funkmodul als RTC-Ersatz

Beim bisherigen System wurden die Berechtigungen im Schloss oder auf dem Datenträger gespeichert. Da diese Berechtigungen zum Öffnen und Verschließen eines Schrankschlosses meist zeitabhängig sind, ist es notwendig, dass das System über die aktuelle Uhrzeit verfügt. Dies wurde bisher durch den Einsatz eines RTC-Bausteins (Real-Time-Clock) realisiert.

Ein Nachteil dieser Ausführung stellt die Notwendigkeit einer unterbrechungsfreien Stromversorgung dar. Dies ist bei einem Batteriewechsel nicht mehr gegeben und kann unter Umständen zum Verlust der Uhrzeit führen. Dies bedingt dann eine Neukonfiguration des Schlosses mittels PC. Ebenso ergibt sich dadurch ein kleiner statischer Strom, der die Batterie zusätzlich, auch bei Nichtgebrauch des Schlosses, belastet und somit deren Lebensdauer verkürzt.

Eine mögliche Alternative zum Einsatz eines RTC-Bausteins stellt die Verwendung einer Funkschnittstelle dar. So bietet diese, neben der einfachen Zeitabfrage von einer zentralen Verwaltungsstelle, eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten, den Funktionsumfang des Schrankschlosses zu erweitern.

Der wesentliche Vorteil bei der Verwendung eines Funkmoduls liegt darin, dass es nur bei Bedarf aktiviert wird. Da es jedoch im Betrieb einen erheblich höheren Strombedarf als ein RTC-Baustein aufweist, muss sorgfältig verglichen werden, welche der beiden Ausführungen im hier geforderten Anwendungsfall effizienter arbeitet.

Um solch einen Vergleich zu ermöglichen sind zuerst die Rahmenbedingungen einer typischen Anwendung festzulegen. Es wird seitens der Firma Gantner Electronic GmbH angenommen, dass am Tag maximal 50 Betätigungen des Schrankschlosses stattfinden. Dies entspricht je 25 Öffnungs- und 25 Schließvorgängen.

Der typische Anwendungsfall der Schrankeinbauschlösser sieht vor, dass meist eine größere Anzahl an Schlössern punktuell konzentriert auftritt. Dies erfolgt meist in Form einer Schrankwand mit mehreren kleineren Fächern, die jeweils ihr eigenes Schrankeinbauschloss besitzen. Bei der Anwendung einer Funkschnittstelle zur Zeit- und Berechtigungsabfrage sind daher zusätzlich folgende Probleme zu beachten:

- Kollision der Anfragen der Schrankschlösser bei gleichzeitiger Betätigung
- Durch Kollisionsvermeidung entstandene Verzögerungszeiten
- Verzögerungen durch die Antwortzeit der zentralen Verwaltungsstelle



Es wird für die folgende Betrachtung angenommen, dass innerhalb einer Betriebszeit des Funkmoduls von 300 ms sowohl die Datenübertragung, Kollisionsvermeidung und eventuell erneutes Senden durchgeführt werden können. Die zeitliche Verzögerung durch die Antwortzeit der zentralen Verwaltungsstelle ist ebenfalls bereits mit eingerechnet. Somit kann von einer aktiven Zeit von 300 ms des Funkmoduls bei einer Betätigung des Schrankschlosses ausgegangen werden.

Die Berechnung des Energiebedarfs des RTC-Bausteins sowie des Funkmoduls basieren auf folgender Formel:

$$W_{Ges} = U_{Versorgung} * I * t_{Betriebsdauer} \quad [3.2]$$

Bei einer angenommenen Betriebsspannung des neuen Schaltungsentwurfs von 3,3 V und der Verwendung eines aktuellen RTC-Bausteins ergibt sich ein statischer Strom von 0,9  $\mu$ A. Für diese Betrachtung wurde der integrierte RTC-Baustein des Mikrocontroller EFM32GG380F1024 herangezogen [EM01, S. 1]. Der Vergleich erfolgt auf eine Betriebsdauer von 24 h bzw. 86400 s.

$$W_{Ges} = U_{Versorgung} * I_{RTC} * t_{Betriebsdauer} = 256,6 \text{ mWs} \quad [3.3]$$

Da beim verwendeten Funkmodul der Strombedarf beim Senden und Empfangen annähernd gleich hoch ist, wird für die Berechnung einfacherheitshalber der höhere Strom, also 16,8 mA bei 0 dBm Sendeleistung, zur Betrachtung herangezogen [TI02, S. 10]. Die Versorgungsspannung beträgt hierbei ebenfalls 3,3 V.

$$W_{Ges} = U_{Versorgung} * I_{Funk} * t_{Betriebsdauer} * n_{Betaetigungen} = 831,6 \text{ mWs} \quad [3.4]$$

Wie im Datenblatt des Funkchips CC1101 vorgeschlagen, kann durch die Verwendung eines Spannungsvorreglers der Energiebedarf des Funkmoduls erheblich gesenkt werden. Hierbei wird die Spannung durch einen Schaltregler im Vorfeld herabgesetzt, und nicht anschließend im Funkchip mittels eines Längsreglers auf den entsprechenden Wert gebracht.

Demzufolge ergibt sich für eine erneute Berechnung des Energiebedarfs bei einem Strom von 11,7 mA [TI02, S. 3]:

$$W_{Ges} = U_{Versorgung} * I_{Funk} * t_{Betriebsdauer} * n_{Betaetigungen} = 579,15 \text{ mWs} \quad [3.5]$$

Es wird hier deutlich, dass bei einer Betrachtung des Worst-Case das Funkmodul mit seinem höheren Energieverbrauch eindeutig die schlechtere Lösung darstellt. Dennoch wurde für die Realisierung eines Schrankschlosses mit Funkschnittstelle entschieden, da es folgende Vorteile mit sich bringt:

- Kein statischer Strombedarf
- Erhöhter Verwaltungskomfort durch die zentrale Verwaltungsstelle
- Vereinfachte und zentrale Handhabung der Berechtigungen
- Aktueller Status aller Schließfächer

Um die Verwendung der Funklösung zu legitimieren, soll noch ein Vergleich mit Praxiswerten durchgeführt werden. Dazu wird der Zeitraum von einer Woche betrachtet, in der an zwei Tagen keine Benutzung der Schrankschlösser stattfindet. Weiters soll angenommen werden, dass die Antwortzeit der zentralen Verwaltungsstelle in der Praxis mit durchschnittlich 100 ms angenommen werden kann. Zuerst erfolgt die Betrachtung der Lösung mittels RTC-Baustein:

$$W_{Ges} = U_{Versorgung} * I_{RTC} * t_{taegl. Betriebsdauer} * n_{Anzahl_Tage} = 1796,25 \text{ mWs} \quad [3.6]$$

Dazu im Vergleich der Energiebedarf der Lösung mittels Funkmodul:

$$W_{Ges} = U_{Versorgung} * I_{Funk} * t_{Betriebsdauer} * n_{Betaetigungen} * n_{Anzahl_Tage} = 965,25 \text{ mWs} \quad [3.7]$$

Es ist hier klar ersichtlich, dass sich bereits bei der Betrachtung eines Zeitraums von einer Woche in der Praxis ein eindeutiger Vorteil zu Gunsten der Funklösung ergibt. Es wurde daher schlussendlich für die Realisierung der Funklösung entschieden, da sie, neben den zu erwartenden Verbrauchsvorteilen im realen Einsatz, vor allem einen hohen Zugewinn an Verwaltungskomfort bietet.

### **3.2.3 Vergleich unterschiedlicher Schließmechanismen**

Derzeit sind vor allem drei verschiedene Mechanismen zum Antrieb des Verriegelungszapfens denkbar und technisch umsetzbar. Dazu kommen folgende drei elektromechanischen Komponenten in Frage:

- Hubmagnet
- Antrieb einer Zahnstange mittels Elektromotor
- Antrieb einer Gewindestange mittels Elektromotor

In der bisherigen Lösung wurde ein Hubmagnet mit seinen bekannten Nachteilen verwendet. Der größte Nachteil ist der sehr hohe Impulsstrom, den die Batterie zur Betätigung zu liefern hat. Die genaue Analyse sowie die Nachteile einer Lösung mittels Hubmagnet sind im Kapitel 2.3.5 detailliert nachzulesen. Beim neuen Entwurf soll deshalb kein Hubmagnet zum Einsatz kommen.

Eine Alternative dazu stellt der Antrieb des Verschlussriegels mittels Motor dar. Dabei wird durch ein Zahnrad, das auf der Motorwelle angebracht ist, eine Zahnstange verschoben, die wiederum den Verschlusszapfen betätigt oder bereits selbst als solcher ausgebildet ist.

Es wird dadurch das Problem des hohen Impulsstroms umgangen und es kann mit niedrigeren Strömen über einen längeren Zeitraum gearbeitet werden. Dies bietet vor allem Vorteile bei bereits teilentleerter Batterie oder bei großer Kälte.

Es wurde jedoch auch gegen diese Lösung entschieden, da sie einen entscheidenden Nachteil aufweist. Ein Antrieb dieser Bauart weist keine Selbsthemmung auf und es kann somit eine ungewollte Bewegung des Verschlusszapfens nicht ausgeschlossen werden. Da nach Betätigung des Verschlussmechanismus der Rotor des Motors frei drehbar ist und nicht eingebremst wird, kann durch die Einwirkung von äußeren Kräften, wie beispielsweise Schlägen oder starkem Rütteln an Schränken und Türen, unter Umständen die Zahnstange bewegt werden und somit der Schlossriegel freigegeben werden.

Um dies zu vermeiden wurde eine Lösung gewählt, die an Stelle der Zahnstange eine Gewindestange einsetzt. Die Gewindestange wird durch den Antrieb mittels Motor und Zahnradgetriebe gedreht und wird somit vor und zurück bewegt. Dieser Antrieb ist selbsthemmend und kann daher durch äußere Krafteinwirkung in Form von Schlägen oder Ähnlichem nicht mehr beeinflusst und bewegt werden.

Weiters wurde festgelegt, dass der notwendig zurückgelegte Weg des Verschlusszapfens im Vergleich zur bestehenden Mechanik verringert werden kann. Es wird die Annahme getroffen, dass ein Verschiebeweg von rund 1,05 mm der Gewindestange zum Versperren der neuen Schlossmechanik als ausreichend betrachtet werden kann. Durch die Reduzierung des notwendigen Verschiebewegs ergeben sich auch hier Verbrauchsvorteile, was bedeutet, dass der Gesamtenergiebedarf bei der Betätigung des Schranksschlusses gesenkt werden kann.

Schließmechanismus	Einschaltdauer ms	$W_{\text{Gesamt}}$ mWs
Hubmagnet	25-27	~ 100
Motor mit Zahnstange	~ 260	~ 100
Motor mit Gewindestange	200	43

Abbildung 3.6: Vergleich des Energiebedarfs der Schließmechanismen

### **3.3 Schaltung des Prototyps**

Im Zuge der Diplomarbeit ist ebenso ein Prototyp entstanden, bei dem alle neuen Schaltungsideen umgesetzt und anschließend analysiert wurden.

Der Hardwareumfang des Prototypen übersteigt bei weitem den notwendigen Umfang für die Evaluierung und Untersuchungen der neuen Schlosselektronik. Da das Prototypenboard jedoch auch bei zukünftigen Neuentwicklungen der Firma Gantner Electronic GmbH eingesetzt werden soll, wurden alle eventuell relevanten Funktionsblöcke bereits auf dem Board integriert. Bei dem für die Diplomarbeit verwendeten Prototypen wurden daher nur die für die Schlosselektronik relevanten Funktionsblöcke bestückt.

#### Relevante Funktionsblöcke für die neue Schlosselektronik

- Mikrocontroller
- Brückenschaltung
- Ein- und Ausgabe (LED & Taster)
- Selbsthalteschaltung
- Spannungsregler des Funkmoduls

Folgende Funktionsblöcke wurden nicht getestet und bestückt:

- Seriell-USB-Wandler
- USB-Schnittstelle des Mikrocontrollers
- Externer Speicherbaustein
- RS232-Schnittstelle

Der Prototyp verfügt über Schnittstellen für das RFID- und das Funkmodul und somit können diese einfach aufgesteckt werden. Sämtliche Funktionsbaugruppen können mittels einer Jumperleiste direkt mit dem Mikrocontroller und der Spannungsversorgung verbunden werden. Alternativ dazu ist es möglich, mittels Drahtbrücken mit entsprechenden Steckverbindern, beliebige Verbindungen herzustellen. Aus Platzgründen wurden manche Pins des Mikrocontrollers nur als Lötungen und nicht als Steckverbinder ausgeführt.

Die Programmierung des Mikrocontrollers erfolgt beim Prototypen über die auf dem Board befindliche Debug-Schnittstelle. Als Programmer dient ein Eval-Board der Firma Energy Micro, das über ein 20-poliges Kabel mit dem eigenen Prototypen verbunden wird. Die softwareseitige Ausführung der Programmierung ist unter Kapitel 3.4.1 nachzulesen.

Auf den nachfolgenden Schaltplänen des Prototypen sind die jeweiligen Funktionsblöcke zu erkennen. Die Selbsthalteschaltung wurde rot markiert.

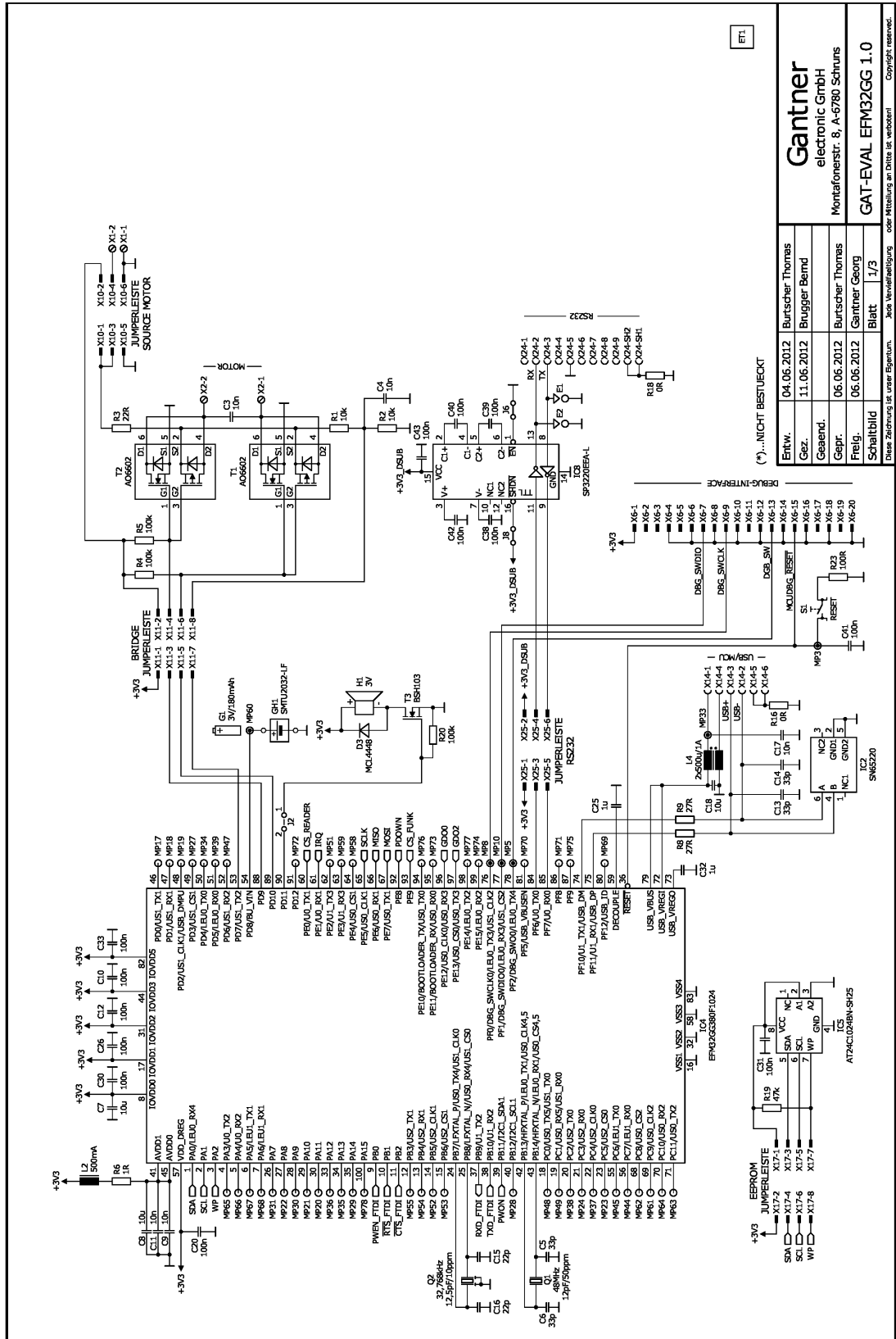


Abbildung 3.7: Schaltplan des entwickelten Eval-Boards, Seite 1

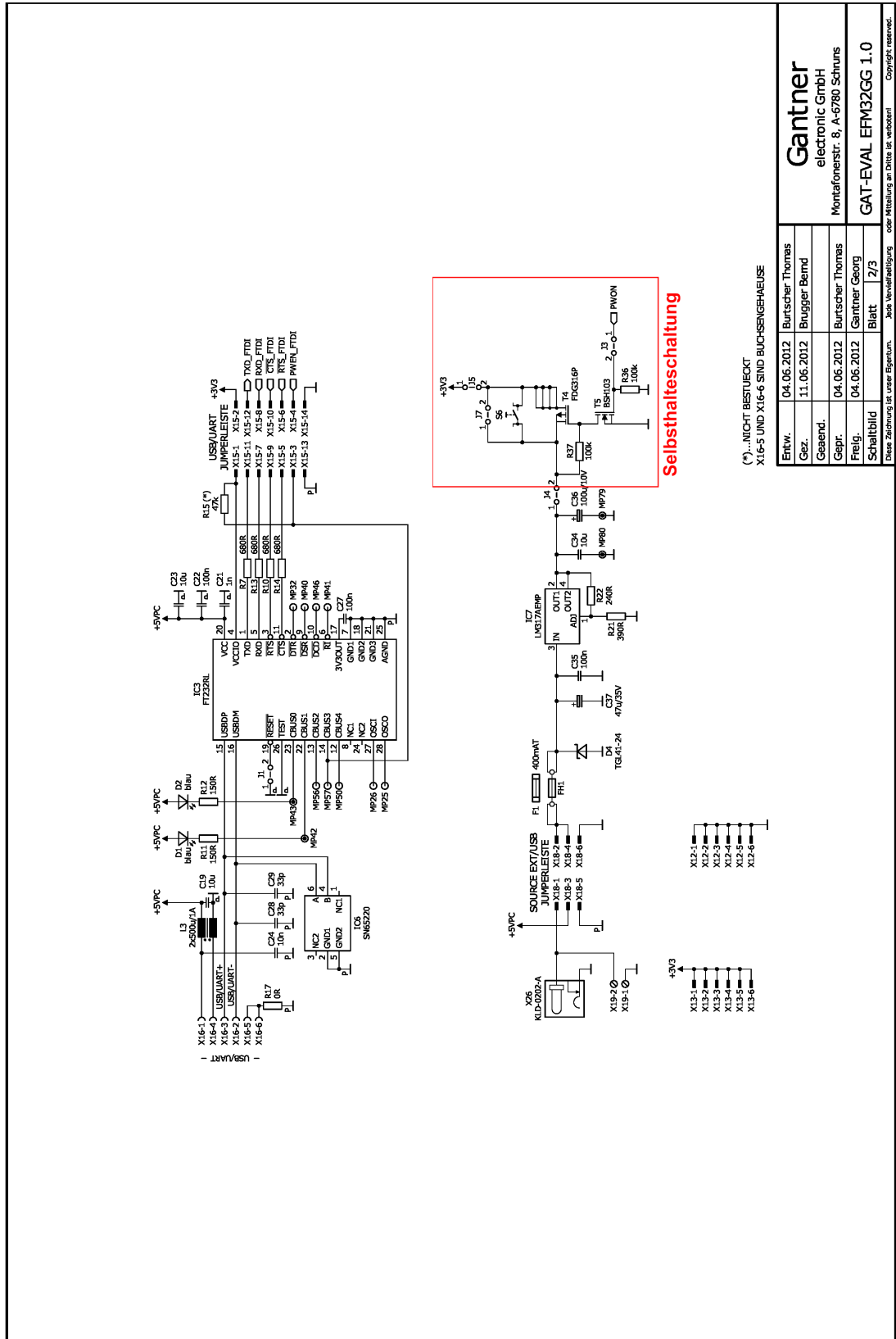


Abbildung 3.8: Schaltplan des entwickelten Eval-Boards, Seite 2



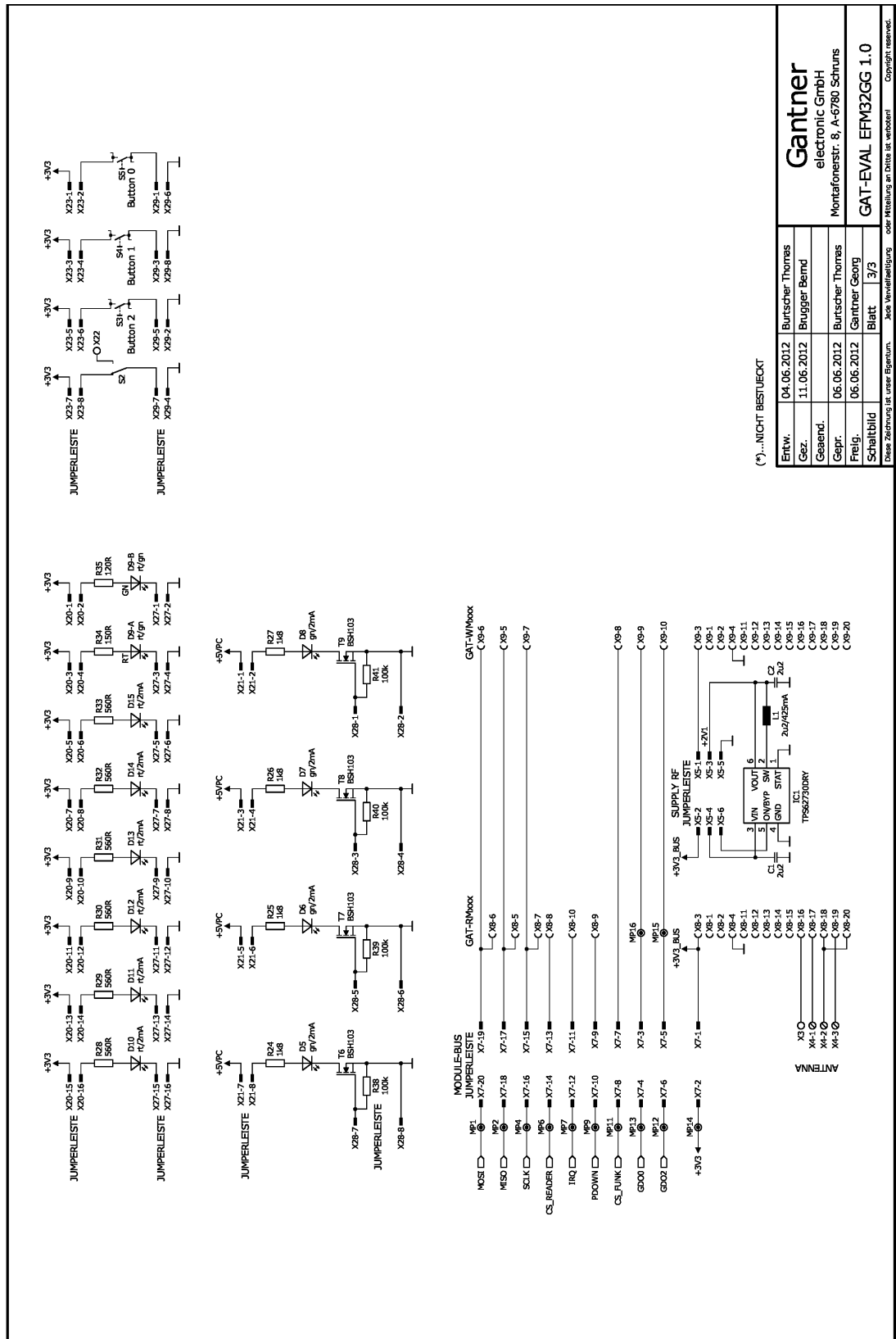


Abbildung 3.9: Schaltplan des entwickelten Eval-Boards, Seite 3

Im Bereich der Ein- und Ausgabe sind LEDs, die mittels Mosfets geschaltet werden, zu sehen. Diese werden von einer externen Spannungsversorgung, beispielsweise der +5VPC-Schiene, versorgt und können somit quasi stromlos angesteuert werden. Dies dient dazu, beliebige digitale Signalpegel der Schaltung zu visualisieren, ohne dabei einen Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch zu haben. Dies war bei diesem Projekt besonders wichtig, da mit sehr kleinen Energiemengen gearbeitet wurde und diese genau erfasst werden mussten. Der Strombedarf mehrerer LEDs wäre somit nicht zu vernachlässigen und würde sich entsprechend auf die Messergebnisse auswirken.

Beim verwendeten Prototypen wurde am Ausgang der Brückenschaltung ein Kleinstmotor mit Zahnradgetriebe und Gewindestange angeschlossen, der den Verschlussmechanismus des Schlosses darstellt. Es wurde angenommen, dass eine so konstruierte Schlossmechanik eingesetzt wird, damit eine lineare Bewegung der Gewindestange von rund 1,05 mm als ausreichend zu betrachten ist.

Bei der Verwendung von externen Spannungsquellen, die bei Versuchen mit Energy Harvesting zur Versorgung der Schlosselektronik eingesetzt wurden, befand sich der Einspeisepunkt, sofern nicht anders angeführt, am Jumper J4/2 im Schaltplan. Die im Schaltplan eingezeichnete Spannungsversorgung entspricht einer Standardschaltung und dient nur zum Betrieb der Platine, wenn keine externen Spannungsquellen zur Verfügung stehen. Da es sich um ein linear geregeltes Netzteil handelt, ist der Wirkungsgrad nicht sehr hoch und für eine Schaltung mit geringem Energieverbrauch daher nicht geeignet.

## **3.4 Firmware des Prototyps**

### **3.4.1 Programmierwerkzeuge**

Als Editor für die Firmware kam Eclipse mit CDT-Plugin mit den entsprechenden Bibliotheken für den Mikrocontroller sowie für den RFID-Baustein zum Einsatz. Der genaue Aufbau der Toolchain kann in der Application Note AN0023 Eclipse Toolchain [EM05] von Energy Micro nachgelesen werden. Die Firmware selbst wurde komplett in C geschrieben. Bei der Entwicklung der neuen Schlossfirmware kamen keine Werkzeuge oder andere Hilfsmittel zur Codegrößenreduzierung zum Einsatz. Dies hatte den Vorteil, dass damit die Debug-Fähigkeit auch im Betrieb des Mikrocontrollers erhalten blieb. Der Speicher des verwendeten Mikrocontrollers im Prototypen war mit 1024 KB ausreichend groß.

Zum Einspielen der Firmware in den Mikrocontroller dient ein beliebiges Eval-Board der Firma Energy Micro. Dazu wird dieses an den USB-Port des Computers angeschlossen und über ein 20-poliges Flachbandkabel mit entsprechenden Steckern an das Prototypenboard angeschlossen. Damit kann direkt aus dem Editor das compilierte Programm in den Flashspeicher des Mikrocontrollers übertragen werden.

### **3.4.2 Ablauf der Firmware**

Bei der erstellten Firmware wurden alle Verbesserungsmöglichkeiten, wie im Kapitel 3.2.1 bereits erwähnt, berücksichtigt und umgesetzt. Da beim Prototypen auch das Funkmodul verwendet werden soll, musste der grundsätzliche Ablauf der Schlossfirmware modifiziert werden. Ein entsprechendes Ablaufdiagramm ist auf dem nachfolgenden Bild dargestellt.

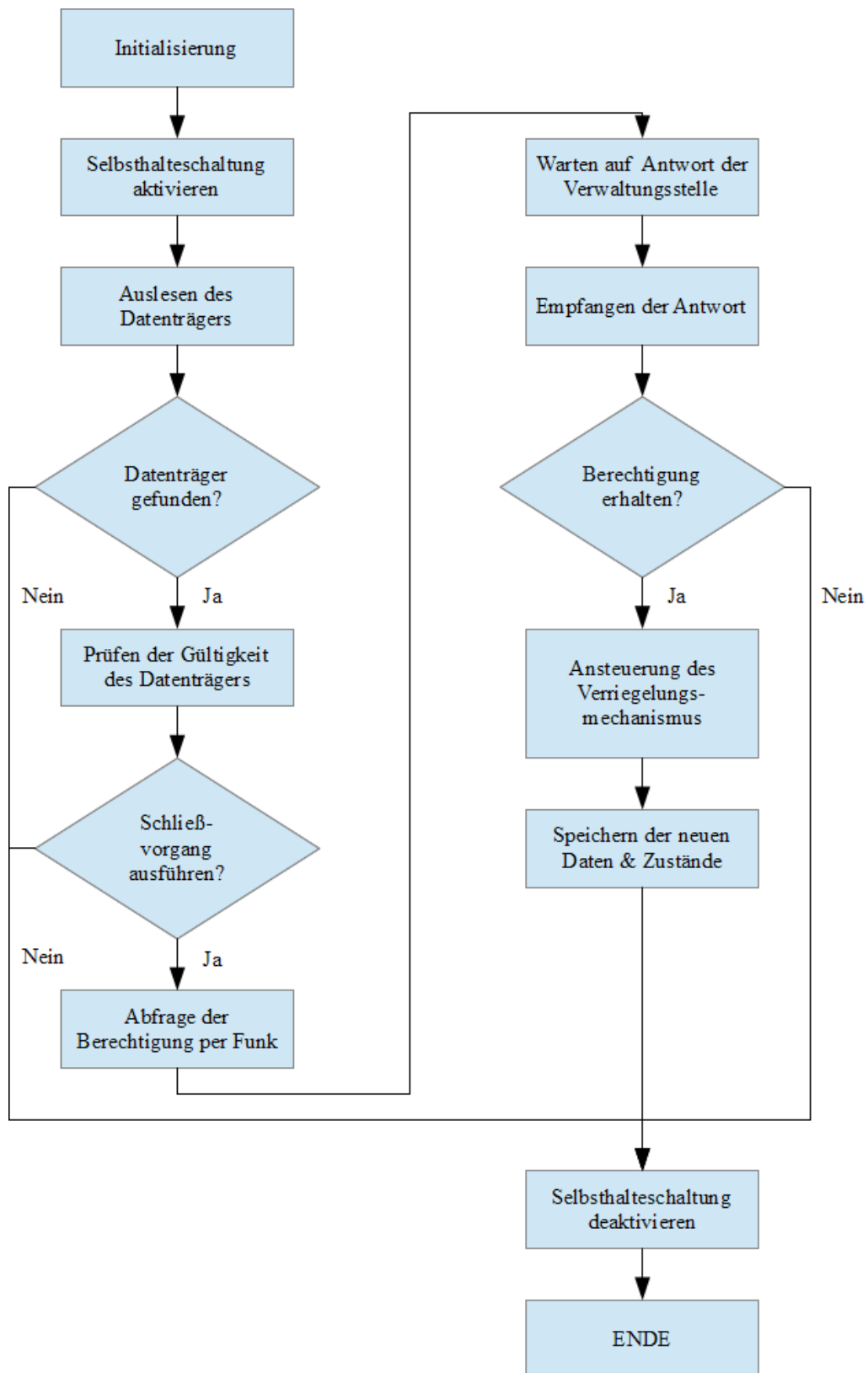


Abbildung 3.10: Firmwareablauf der neuen Schlosselektronik

Die Firmware beginnt mit der Initialisierung des Mikrocontollers und aller Funktionsblöcke. Anschließend werden alle Funktionsblöcke in den Ruhezustand versetzt und nur die für den aktuellen Abschnitt der Firmware benötigte Hardware aktiviert.

Nach der Initialisierung wird dann die Selbsthalteschaltung der Versorgungsspannung aktiviert, um einen unterbrechungsfreien Ablauf der Firmware zu garantieren. Damit ist die Spannungsversorgung nicht mehr an die Schlossbetätigungstaste gekoppelt und kann nur noch vom Mikrocontroller selbst wieder unterbrochen werden.

Anschließend wird das RFID-Modul aktiviert und es wird versucht einen Datenträger einzulesen. Befindet sich kein Datenträger im RFID-Feld, so ist die weitere Abarbeitung der Firmware nicht mehr sinnvoll und der Mikrocontroller schaltet die Selbsthalteschaltung der Versorgungsspannung aus. Damit ist der Firmwarezyklus beendet und wird beim erneuten Anlegen der Versorgungsspannung wieder von Anfang an abgearbeitet.

Im folgenden Funktionsblock werden die eingelesenen Daten auf ihre Gültigkeit geprüft. Ist der Datenträger für diese Schließanlage zulässig, so erfolgt eine Abfrage der Berechtigung zum Öffnen oder Schließen des Schanks mittels einer Funkschnittstelle bei der zentralen Verwaltungsstelle.

Nach dem Senden der Anfrage zur zentralen Verwaltungsstelle, wird der Empfangsmodus aktiviert und auf die entsprechende Antwort gewartet. Trifft eine Antwort ein, so wird diese auf ihre Gültigkeit geprüft und die Berechtigungen ausgewertet. Liegt eine Berechtigung zum Öffnen oder Schließen vor, so wird anschließend der Verschlussmechanismus angesteuert und das Schloss versperrt oder wieder freigegeben.

Am Ende des Firmwareablaufs steht die Speicherung der aktuellen Zustände im Speicher des Mikrocontollers. Danach erfolgt die Deaktivierung der Selbsthalteschaltung und der Ablauf des Firmwarezyklus ist beendet.

Enthält die empfangene Antwort jedoch keine Berechtigung zum Ändern des Schlosszustands, so wird ebenfalls, wie bereits beim Vorliegen eines falschen oder keines Datenträgers, der Firmwareablauf abgebrochen und die Selbsthalteschaltung deaktiviert.

### **3.5 Aufbau einer zentralen Verwaltungsstelle**

Zum Betrieb der neu entwickelten Schlosselektronik ist auch eine entsprechende zentrale Verwaltungsstelle notwendig. Die Kommunikation zwischen Schlosselektronik und der Gegenstelle erfolgt dabei über die Funkschnittstelle. Die zentrale Verwaltungsstelle hält dabei die entsprechenden Berechtigungen der jeweiligen Karten vor und übermittelt diese bei Anfrage an die Schlosselektronik.

Um den Prototypen zu testen, war es daher notwendig, eine vereinfachte Form einer zentralen Verwaltungsstelle zu errichten und in Betrieb zu nehmen. Der schaltungstechnische Aufbau sowie der Ablauf der Firmware sind in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

#### **3.5.1 Schaltungstechnische Ausführung**

Auf Grund der geringen rechentechnischen Anforderungen wurde für die Verwendung eines Starter-Kits der Firma Energy Micro entschieden. Verwendet wurde das EFM32 Tiny Gecko Starter Kit. Bei diesem Board kommt der Mikrocontroller EFM32TG840F32 aus der Serie „Tiny Gecko“ zum Einsatz.

Dieser Mikrocontroller besitzt ebenfalls eine 32-bit Architektur und verwendet den ARM Cortex-M3 Prozessorkern. Der Umfang der Peripherie sowie die Speicherkapazität unterscheiden sich jedoch stark von den Mikrocontrollern der Serie „Giant Gecko“. Der hier verwendete Mikrocontroller besitzt einen Flashspeicher von 32 KB sowie einen RAM von 4 KB [EM03, S. 1].

Die verwendete Taktfrequenz beträgt 14 MHz, was der Default-Einstellung entspricht, und wird von einem internen RC-Oszillator erzeugt. Das Starter-Kit besitzt neben einem einfachen Display auch zwei Eingabetasten [EM04].

Um eine Kommunikation über die Funkschnittstelle zu ermöglichen, wurde auch hier das Funkmodul WM800 verwendet. Eine detaillierte Beschreibung dieses Funkmoduls findet sich in Kapitel 3.1.3. Die Anbindung des Moduls an den Mikrocontroller erfolgte mittels SPI-Schnittstelle. Die für das Modul nötige Versorgungsspannung wurde ebenfalls durch das Starter-Kit bereitgestellt. Auf dem nachfolgenden Bild ist der schematische Aufbau der zentralen Verwaltungsstelle zu sehen.

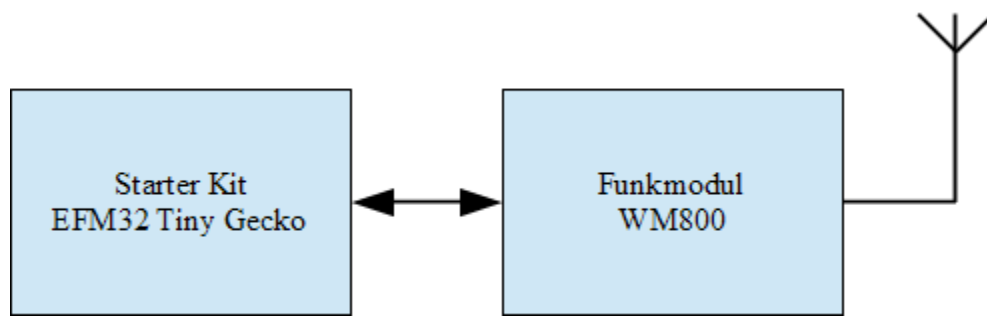


Abbildung 3.11: Schematischer Aufbau der zentralen Verwaltungsstelle

### 3.5.2 Ablauf der Firmware

Die Firmware in der zentralen Verwaltungsstelle hat die Aufgabe, die Berechtigungsanfragen der Schrankschlösser anzunehmen und zu beantworten. Dazu überprüft die zentrale Verwaltungsstelle die hinterlegten Berechtigungen und sendet dann eine entsprechende Antwort an das Schloss. Abhängig von der Antwort der Verwaltungsstelle führt das Schloss eine Ansteuerung der elektromechanischen Verschlussmechanik durch.

Da es sich um eine Minimalkonfiguration der zentralen Verwaltungsstelle handelt, kann diese die Berechtigungen nur eines einzigen Schlosses verwalten. Dies ist für einen Probetrieb des Prototypen ausreichend und wurde, um die Komplexität und den Aufwand möglichst niedrig zu halten, bewusst so realisiert.

Zum einfacheren Testen des Prototypen kann durch einen Taster auf dem Starter-Kit zwischen drei verschiedenen Antwortmodi gewechselt werden. Dadurch ergeben sich folgende Möglichkeiten:

- Antwort gemäß Berechtigungsabfrage
- Negative Antwort unabhängig vom Ergebnis der Berechtigungsabfrage
- Keine Antwort

Je nach Auswahl des Antwortmodus werden die entsprechenden Zweige des Ablaufdiagramms durchlaufen. Der jeweils aktive Modus wird auf dem Display angezeigt. Das nachfolgende Diagramm zeigt den schematischen Ablauf der Firmware in der zentralen Verwaltungsstelle.



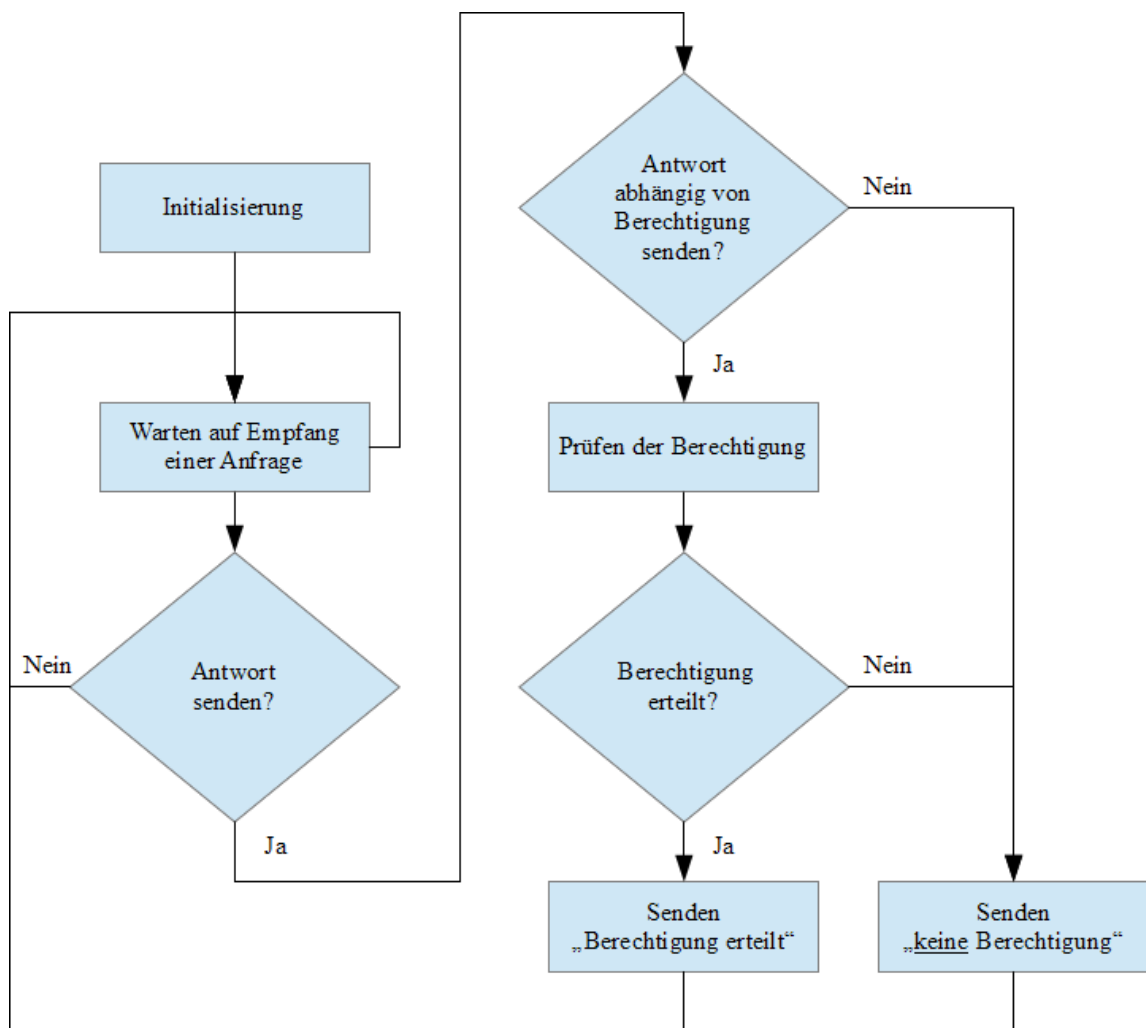


Abbildung 3.12: Firmwareablauf der zentralen Verwaltungsstelle

Nach dem Einschalten werden zuerst der Mikrocontroller sowie das Funkmodul initialisiert. Anschließend überwacht das Funkmodul die Funkschnittstelle und löst beim Empfang einer Nachricht einen Interrupt am Mikrocontroller aus. Dadurch wird die eigentliche Abarbeitung der Firmware gestartet.

Je nach eingestelltem Betriebsmodus wird nach einem solchen Interrupt keine Antwort gesendet und wieder zum Ausgangspunkt, dem Warten auf den Empfang einer Berechtigungsabfrage, zurückgekehrt.

Ist das Senden einer Antwort durch die zentrale Verwaltungsstelle gestattet, so wird mit der Abarbeitung des Programmablaufs fortgefahren. Im folgenden Block des Ablaufdiagramms wird über die Art der Antwort entschieden. Je nach Einstellung des Antwortmodus wird grundsätzlich eine negative Antwort gesendet oder es folgt eine Prüfung der Berechtigung.

Bei der Prüfung der Berechtigung muss zwischen zwei Fällen unterschieden werden:

- Anfrage zum Versperren eines Schrankes
- Anfrage zum Öffnen eines Schrankes

Bei einer Anfrage zum Versperren erfolgt zuerst eine Prüfung der Gültigkeit der Karte für diese Schrankanlage. Anschließend wird die Verfügbarkeit des gewünschten Schrank ermittelt. Waren beide Überprüfungen erfolgreich, so kann der Schrank versperrt werden. Dazu wird eine Berechtigung zum Versperren an die Schrankelektronik gesendet und die Schrank- sowie Kartenummer in der zentralen Verwaltungsstelle gespeichert. Die Identifikationsnummer der verwendeten Karte wird neben dem aktuellen Status des Schrankes ebenso auf dem Display angezeigt.

Erfolgt nun eine Anfrage eines bereits versperrten Schlosses zum Öffnen, so wird auch hier zuerst die Gültigkeit der Karte für diese Schrankanlage geprüft. Danach erfolgt ein Abgleich der übermittelten Kartenummer mit der für den entsprechenden Schrank bereits hinterlegten Kartenummer. Sind sie identisch, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um eine berechtigte Anfrage zum Öffnen des Schrankes handelt und eine entsprechende Antwort wird an die Schlosselektronik gesendet. Daraufhin wird der Status des Schrankes aktualisiert und in der zentralen Verwaltungsstelle wieder als frei verfügbar gekennzeichnet.

Sollte eine Überprüfung negativ verlaufen, so wird auch eine negative Antwort an die Schlosselektronik übermittelt. Das bedeutet, es wird dem Schloss keine Berechtigung zur Betätigung des Verschlussmechanismus erteilt. Der Schrank bleibt also weiterhin verschlossen.

### **3.6 Zwischenfazit**

Es wurde unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zu möglichen Energieeinsparungen ein funktionsfähiger Prototyp entwickelt und aufgebaut. Diese Ausführung verfügt über eine Funkschnittstelle sowie einen Kleinstmotor mit Getriebe zum Antrieb einer Gewindestange als Schließmechanismus.

Als Gegenstelle für die Funkschnittstelle wurde eine zentrale Verwaltungsstelle aufgebaut. Sämtliche Berechtigungen sowie der jeweils aktuelle Status der Schrankelektronik sind in der zentralen Verwaltungsstelle hinterlegt.

Weiters wurde ein eigenständiges RFID-Modul mit dem Halbleiterbaustein CLRC663 entwickelt. Dieses kann durch die entsprechende Schnittstelle direkt mit dem Prototypen verbunden werden. Die Kommunikation erfolgt dabei über den SPI-Bus.

Ebenso wurde ein Funkmodul mit dem Halbleiterbaustein CC1101 entwickelt. Auch dieses Modul besitzt die firmenintern definierte Schnittstelle und kann somit einfach am Prototypen angeschlossen werden. Als Antenne kommt eine PCB-Antenne gemäß den Schaltungsvorschlägen des Herstellers zum Einsatz.

## 4 Energy Harvesting

### 4.1 Überblick

Der Begriff Energy Harvesting stammt aus dem Englischen und bedeutet wörtlich übersetzt „Energie ernten“. Damit wird der Vorgang der Energiegewinnung aus der Umwelt und Umgebung bezeichnet.

Energy Harvesting wird bereits seit Jahrtausenden in Form von Windrädern oder durch die Nutzung der Wasserkraft mittels Wasserrädern betrieben. Auch die Sonnenenergie, die heute eine sehr wichtige Quelle des Energy Harvestings darstellt, wurde bereits damals in einer primitiven Form genutzt [ELN01, S. 1].

Ein typischer Anwendungsfall von Energy Harvesting sind kleine Schaltungen oder Funktionsbaugruppen mit geringem Energieverbrauch, die autark arbeiten sollen. Diese Form der Energiegewinnung wird daher meist nur dann eingesetzt, wenn ein sehr hoher und damit kostenintensiver Verkabelungsaufwand zum Betrieb der Geräte erforderlich wäre. Ein weiterer Einsatzbereich stellt eine Substitution von Batterien dar. Ist eine Versorgung der Schaltung mittels Batterien nicht wirtschaftlich, nicht erwünscht oder gar durch die exponierte Lage der Anlageninstallation ein Batteriewechsel unmöglich, so wird versucht, die zum Betrieb notwendige Energie aus der Umwelt und der Umgebung zu gewinnen.

Da diese Technologie noch am Anfang ihrer Entwicklung steht, findet deren Einsatz bisher nur vereinzelt in Geräten und Schaltungen Anwendung. Es wird zwar kostenfrei Energie zur Versorgung der Schaltung gewonnen, doch dem gegenüber stehen derzeit noch meist sehr hohe Entwicklungs- und Herstellungskosten. Ebenfalls stellt die bisherige Zuverlässigkeit sowie die geringen Leistungsdichten des Energy Harvestings ein Hemmnis zum Einsatz dieser Technologie in Alltagsgegenständen und Geräten dar.

Der zukünftige Schwerpunkt der Anwendung liegt hauptsächlich auf kleinen mobilen Geräten, die bisher durch einen Akku versorgt werden.

## **4.2 Unterschiedliche Arten der Energiequellen**

Es gibt mehrere verschiedene Möglichkeiten und Arten, die Energie aus der Umwelt und Umgebung zu nutzen. Nachfolgend eine auszugsweise Übersicht der möglichen Energiequellen für Energy Harvesting [HAE01].

### Mögliche Energiequellen für Energy Harvesting:

- Bewegte Materie
  - Rotationsbewegung
  - Linearbewegung
  - Vibration
  - Stoß
- Licht
- Wärmeströmung & Temperaturunterschied
- Funkwellen

Dies ist eine Übersicht der aktuell am meist verbreiteten und fortgeschrittensten Technologien und Arten des Energy Harvestings. Die verwendete Art des Energy Harvesting hängt neben der Verfügbarkeit einer solchen Quelle natürlich auch vom Energiebedarf der Schaltung selbst ab. Ebenso können nicht alle Arten von Quellen gleich effektiv genutzt werden und die benötigte Energie bereitstellen. Die verschiedenen Leistungsdichten der Quellen und Möglichkeiten des Energy Harvestings sind in der nachfolgenden Tabelle zu sehen.

Energy Source	Harvested Power
<b>Vibration/Motion</b>	
Human	4 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industry	100 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
<b>Temperature Difference</b>	
Human	25 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Industry	1–10 $\text{mW}/\text{cm}^2$
<b>Light</b>	
Indoor	10 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
Outdoor	10 $\text{mW}/\text{cm}^2$
<b>RF</b>	
GSM	0.1 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$
WiFi	0.001 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$

Abbildung 4.1: Leistungsdichten von Energiequellen für Energy Harvesting [TI06, S 2]

### 4.3 Untersuchung der Eignung verschiedener Quellen

Es ist zu berücksichtigen, dass nicht alle Arten von Quellen für Energy Harvesting für jede Schaltung geeignet sind. So ist neben der Verfügbarkeit auch die entsprechende maximal mögliche Leistungsdichte entscheidend. Nachfolgend werden die in Kapitel 4.2 erwähnten Quellen auf ihre Eignung untersucht.

Typische Schaltungsanwendungen, die mittels Energy Harvesting versorgt werden, weisen keine elektromechanischen Baugruppen auf. Diese sind meist sehr energieintensiv im Betrieb und somit normalerweise nicht für Energy Harvesting geeignet. Eine typische Anwendung stellt die Auswertung diverser Sensoren durch einen Mikrocontroller dar. Wird eine Kommunikationsverbindung nach außen benötigt, so kommt meist ein Funkmodul mit einem sehr einfachen energiesparenden Protokoll zum Einsatz.

Die neue Schlosselektronik stellt in mehrererlei Hinsicht eine Abweichung von einer typischen Anwendung dar. Sie besitzt unter anderem elektromechanische Funktionsbaugruppen wie den Verriegelungsmechanismus, die bereits etwa rund die Hälfte der benötigten Gesamtenergie ausmachen. Zusätzlich sind weitere, sehr stromintensive Funktionsbaugruppen, wie beispielsweise das RFID-Modul, integriert. In manchen Energy Harvesting Anwendungen wird das RFID-Feld zur Energiegewinnung herangezogen. Dies gilt beispielsweise für die in den RFID-Karten verbaute Elektronik. Diese wird durch das RFID-Feld mit Energie versorgt. Bei der gegebenen Aufgabenstellung muss jedoch die Energie für die Erzeugung eines solchen Feldes bereits aus der Umgebung gewonnen werden.

Es wird zudem deutlich, dass es nach dem derzeitigen Stand der Technik nahezu unmöglich ist, eine so stromintensive Schaltungsanwendung wie eine Schrankelektronik mitsamt dem elektromechanischen Verriegelungsmechanismus vollständig mittels Energy Harvesting zu versorgen. Neben der sehr hohen Gesamtenergiemenge, die für jeden Durchlauf des Zyklus nötig ist, wird es auch durch die hohe Wiederholrate der Abläufe der Zyklen schwieriger, die erforderliche Energie in der zur Verfügung stehenden Zeit aus der Umgebung zu gewinnen.

#### **4.3.1 Nicht geeignete Quellen für die konkrete Aufgabenstellung**

Bei der Betrachtung der Leistungsdichte fällt auf, dass nicht alle Arten zur Versorgung von solch stromintensiven Schaltungen geeignet sind. Dies Einschränkungen finden oft auch durch die bedingte Baugröße der Anlage statt. Die Gründe, weshalb manche Arten von Energy Harvesting nicht für diese konkrete Aufgabenstellung geeignet sind, soll in den folgenden Ausführungen genauer erläutert werden.

## Funkwellen

Bei der Verwendung von Funkwellen als Energieressource für das Energy Harvesting, ist eine der Grundvoraussetzung, dass die Funkwellen im passenden Frequenzspektrum in entsprechender Intensität vorliegen.

In der Praxis hat sich herausgestellt, dass es nahezu unmöglich ist, die vorhandene HF-Strahlung, wie beispielsweise von WLAN, Mobilfunknetzen und anderen Funkfeldern, sinnvoll für Energy Harvesting einzusetzen. Dies hat vor allem mit der stark ortsabhängigen Signalstärke zusammen. Die Menge der zu erntenden Energie ist nicht annähernd mit anderen Verfahren wie beispielsweise Solarzellen oder Thermogeneratoren zu vergleichen [ELN01, S. 3].

Unter optimalen Bedingungen ist selbst im Nahfeld nur eine Leistungsdichte von unter  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  zu erreichen [ELN01, S. 1]. Für folgende theoretische Betrachtung der notwendigen Antennenfläche soll dabei von einer schaltungstechnisch realisierbaren Leistungsdichte von  $0,01 \mu\text{W}$  und einem Gesamtenergiebedarf von  $70 \text{ mWs}$  ausgegangen werden. Es hat sich gezeigt, dass je nach Art der Spannungsversorgung, und damit sich änderndem Wirkungsgrad, der Gesamtenergiebedarf der neuen Schlosselektronik im Bereich von  $50\text{-}100 \text{ mWs}$  liegen wird.

Wird wieder von den bereits in Kapitel 3.2.2 genannten Praxiswerten ausgegangen, so wird der Zeitraum einer Woche betrachtet. Dabei findet nur an fünf Tagen eine Benutzung der Schrankanlagen statt. Zuerst erfolgt eine Berechnung der nötigen Gesamtenergie die für diesen Zeitraum zur Verfügung stehen muss.

$$W_{\text{Ges}} = W_{\text{Betaetigung}} * n_{\text{taegl\_Betaetigungen}} * n_{\text{Anzahl\_Tage}} = 17500 \text{ mWs} \quad [4.1]$$

Wird eine Leistungsdichte von  $0,01 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  angenommen, kann unter Berücksichtigung des für die Gewinnung der Energie zur Verfügung stehenden Zeitraumes die notwendige Antennenfläche berechnet werden.



$$A_{\text{Antenne}} = \frac{W_{\text{Ges}}}{\frac{P_{\text{RF}}}{A} * t_{\text{betrachteter\_Zeitraum}}} = 2893,5 \text{ cm}^2 \quad [4.2]$$

Die benötigte Antennenfläche ist bei der derzeitigen Baugröße eines Schrankschlosses unter keinen Umständen im Gehäuse unterzubringen. Es wäre denkbar, dass die Antenne als externes Bauteil ausgeführt und in die Schranktüre eingelassen wird. Dies hat neben dem sehr hohen Installationsaufwand auch den Nachteil der nur bedingt idealen Ausrichtung der Antenne. Dies würde bedeuten, dass die Antenne entsprechend der baulichen Ausrichtung der Schränke ausgerichtet ist, und somit eine Verringerung der effektiven Antennenfläche unter Umständen nicht zu verhindern ist. Weiters ist zu beachten, dass der Großteil der Schrankanlagen Blechtüren sowie Blechgehäuse besitzen, die den Einsatz von Antennen erschweren oder nahezu unmöglich machen.

Aus den vorher genannten Gründen wurde bei der gegebenen Aufgabenstellung von dieser Art der Energiequellen für Energy Harvesting abgesehen.

## Piezowandler

Eine weitere Möglichkeit der Energiegewinnung stellt die Piezoelektrizität dar. Wird auf Piezoelemente eine Kraft ausgeübt, so kommt es zur elastischen Verformung des Materials. Durch die Verschiebung des Ladungsschwerpunktes entsteht ein Dipol und somit liegt eine Spannung am Element an.

Es wird dabei versucht aus Stößen oder Vibrationen, also kinetischer Energie, elektrische Energie zu gewinnen. Dazu werden meist Piezowandler verwendet, die nach dem Prinzip eines Biegebalkens arbeiten. Es kann neben mechanischen Schwingungen auch die menschliche Bewegung als Energiequelle für diese Art von Energiewandlern dienen. Wie ein Blick in die Tabelle zeigt, ist die erzielbare Leistungsdichte sehr unterschiedlich [ELN01, S. 2].

Die Ausgangsspannung dieser Wandler ist meist sehr hoch und impulsförmig. Dies bedarf einer aufwendigen Umwandlung der gelieferten Spannung. Dadurch wird der Wirkungsgrad weiter gesenkt.

Damit diese Wandler effektiv arbeiten können ist es nötig, dass entweder eine kontinuierliche Bewegung oder Vibration vorliegt oder eine Vielzahl von aufeinanderfolgenden Stößen. Bei der hier untersuchten Anwendung liegen weder Vibrationen noch eine Abfolge von Stößen vor. Es könnte lediglich die Bewegung der Betätigungstaste als Energiequelle herangezogen werden [ELN01, S. 2].

Würde man diese Bewegung als Einzelbewegung umsetzen wollen und mit einem Wandler eine relevante Energiemenge erzeugen, so würde dieser baulich so groß ausfallen, dass es in der Praxis nicht mehr handhabbar wäre. Weiters ist eine Integration eines solchen Wandlers in die derzeitige Bauform des Schrankschlosses undenkbar.

Würde man die Bewegung jedoch über eine geeignete Mechanik in eine Abfolge von schnellen Stößen wandeln oder damit eine Vibration erzeugen, so wäre die erzielbare Leistungsdichte bereits größer. Geht man aber von einer Betätigungsdauer von unter 1 s aus, so ist ebenfalls keine für die betrachtete Aufgabenstellung relevante Energie zu erzeugen. Weiters wäre eine solche Mechanik nur schwer zu realisieren und baulich, zusammen mit dem notwendigen Wandler, ebenfalls nicht in dem gewünschten Gehäuse unterzubringen.

Weiters ist aus der Praxis bekannt, dass die Leistungen der Piezoelemente bereits nach 100.000 Zyklen nur noch die Hälfte ihrer Anfangsleistung erbringen [HEI01, S. 6]. Die zu erwartende Lebensdauer eines Schrankschlosses liegt bei mindestens 150.000 Zyklen. Damit ist dieser Umstand der Leistungsreduzierung auf Grund von Alterungseffekten nicht zu vernachlässigen und muss in der Auslegung berücksichtigt werden.

Diese Wandler sind nur bei Vibrationen ab einer Frequenz von mehreren kHz sinnvoll einzusetzen. Deshalb wurde diese Art von Energiequellen bei dieser Aufgabenstellung als technisch nicht sinnvoll betrachtet und somit ausgeschlossen.

## Thermische Wandler

Eine weitere Art der Energiegewinnung stellen die thermischen Wandler dar. Diese basieren auf dem Seebeck- oder auf dem Peltier-Effekt. Dazu werden zwei elektrische Leiter mit unterschiedlichen Seebeck-Koeffizienten miteinander verbunden. Dadurch entsteht ein Thermoelement, das zur Gewinnung elektrischer Energie aus Temperaturunterschieden genutzt werden kann. Die Ausgangsspannungen sind bei Thermoelementen in der Regel recht klein, was einen anschließenden DC/DC-Wandler erfordert [ELN01, S. 1].

Da für den Betrieb eines solchen Thermoelements eine nutzbare Temperaturdifferenz vorliegen muss, ist diese Art des Energy Harvestings für die konkrete Aufgabenstellung nicht geeignet.

### 4.3.2 Licht als Energiequelle

Licht und Sonnenenergie stellen noch immer eine der stärksten Quellen des Energy Harvesting dar. Es wird der photoelektrische Effekt genutzt, um daraus elektrische Energie zu gewinnen. Solarzellen finden bereits seit sehr langer Zeit Verwendung in der Technik und besitzen eine, im Verhältnis zu anderen Arten möglicher Quellen für Energy Harvesting, sehr hohe Leistungsdichte.

Wie auch in der Übersichtstabelle zu erkennen ist, muss zwischen Outdoor- und Indoor-Solarzellen unterschieden werden. Herkömmliche Solarzellen sind grundsätzlich für den Außeneinsatz konzipiert. Diese Solarzellen weisen eine sehr hohe Leistungsdichte auf, sind jedoch auf natürliches Sonnenlicht angewiesen. Diese Einschränkung beruht auf der unterschiedlichen Spektralverteilung von natürlichem Sonnenlicht gegenüber jener des Kunstlichts, das in Innenbereichen verwendet wird.

Erst in den letzten Jahren gewannen die Indoor-Solarzellen als Energiequelle für Energy Harvesting zunehmend an Bedeutung und sind auch in den entsprechenden Größen und Leistungsklassen verfügbar.

Als Indoor-Solarzellen finden meist amorphe oder monokristalline Solarzellen Anwendung. Die herkömmlichen kristallinen Solarzellen besitzen bei schwacher Lichtintensität einen Spannungsrückgang und sind daher für einen Einsatz in Innenräumen nicht geeignet. Das nutzbare Frequenzspektrum von Indoor-Solarzellen deckt sich mit jenem von typischen weißen Leuchtstoffröhren oder ähnlichen Leuchtmitteln, die in Innenräumen eingesetzt werden [ELN01, S. 1].

Da sich die Schrankanlagen meist in gut beleuchteten Räumen befinden und Indoor-Solarzellen mit einer ausreichenden Leistungsdichte verfügbar sind, soll diese Art der Quelle für das Energy Harvesting beim Entwurf der Schlosselektronik berücksichtigt werden.

### 4.3.3 Bewegung als Energiequelle

Eine der wohl bekanntesten Energiequellen für die Gewinnung von elektrischer Energie stellt die Nutzung von Bewegungsenergie dar. Diese Art der Energieumwandlung beruht auf dem Induktionsgesetz. Dabei kann die Bewegungsenergie als rotative, aber auch als lineare Bewegung vorliegen.

Bei der Nutzung der beiden Formen von Bewegungsenergie ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der Umwandlung. Liegt eine klassische Drehbewegung vor, so kann ein Generator herkömmlicher Bauart verwendet werden, um elektrische Energie zu gewinnen.

Um auch die lineare Bewegungsenergie zu nutzen, wäre eine Ausführung des Generators als Lineargenerator denkbar. Ebenso kann aber auch ein entsprechendes Getriebe eingesetzt werden, welches die lineare Bewegung wieder in eine Drehbewegung umwandelt. Somit kann also auch beim Vorliegen von linearen Bewegungsabläufen, unter der Zuhilfenahme eines entsprechenden Getriebes, ein herkömmlicher Generator verwendet werden.

Da die Leistungsdichte hier sehr hoch ist und durch die Betätigung des Schlosses eine lineare Bewegung vorliegt, ist der Einsatz eines elektrodynamischen Wandlers denkbar. Die Bewegungsenergie wird dabei vom Benutzer bei der Betätigung des Schlosses in die Mechanik eingebracht. Hier besteht die Möglichkeit den linearen Bewegungsablauf für Energy Harvesting zu nutzen.

Weiters wäre bei dieser konkreten Aufgabenstellung denkbar, die Bewegung der Schranktüre miteinzubeziehen, um daraus elektrische Energie zu gewinnen. Dies ist ein sehr erfolgversprechender Ansatz. Die Untersuchungen im Zuge der Diplomarbeit beschränken sich jedoch auf die Umsetzbarkeit der Möglichkeiten im Schloss selbst. Dies liegt vor allem darin begründet, dass das Einbeziehen der Türbewegung einen zu großen mechanischen Aufwand bedeuten würde, und somit die Umbau- und Installationskosten zu hoch werden würden. Das Schrankschloss soll möglichst einfach und ohne Verkabelungsaufwand in jeden beliebigen Schrank eingebaut werden können.

#### **4.4 Schematischer Aufbau eines Energy Harvesting – Systems**

In diesem Kapitel soll der grundsätzliche Aufbau eines Energy Harvesting Systems beschrieben werden. Die Ausführungen in diesem Kapitel beziehen sich dabei auf folgende Quelle: [KLD01, S. 23-25].

Ein Energy Harvesting System besteht nicht nur aus den entsprechenden Wandlern, viel mehr muss der gesamte Schaltungsentwurf auf den Einsatzzweck abgestimmt sein. Ein solches System lässt sich daher schwer aus einer vorhandenen Elektronikschaltung und einfachem Ankoppeln der Wandler herstellen. Es muss bereits beim Entwurf der Schaltungselektronik der Einsatz des Energy Harvestings miteinbezogen werden. Alle beteiligten Komponenten müssen für die entsprechende Art des Energy Harvesting geeignet sein. Dies umschließt ebenfalls die Firmware, die auch auf diesen Einsatzzweck anzupassen ist.

Schaltungen die mittels Energy Harvesting versorgt werden, sind meist nicht für Dauerbetrieb ausgelegt. Der typische Einsatz beispielsweise bei einem Sensorknoten sieht vor, dass die Schaltung in regelmäßigen Abständen sehr kurz in Betrieb ist. In der Zwischenzeit kann und muss mittels Energy Harvesting die Energie für den nächsten Ablaufzyklus der Schaltung gesammelt werden. Da in der Zwischenzeit der Mikrocontroller und die anderen Komponenten meist nicht komplett abgeschaltet sind, sondern sich in einem Ruhe- oder Schlafmodus befinden, ist es wichtig, dass alle beteiligten Komponenten möglichst effektive Ruhe- bzw. Schlafmodi aufweisen.

Die Auswahl der Quellen, die für das Energy Harvesting herangezogen werden sollen, hängt in erster Linie von der Umgebung ab, in der die Schaltung betrieben werden soll. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass es nicht das Ziel ist, möglichst viel Energie zu gewinnen, sondern die Schaltung so zu konzipieren, dass ein sicherer Betrieb der gewünschten Anwendung garantiert wird. Wird in der Zeit zwischen zwei Zyklen mehr Energie gesammelt als anschließend verbraucht wird, fällt die Energiebilanz positiv aus und der Betrieb der Schaltung ist gesichert. Die überschüssige Energie kann entweder gespeichert

werden oder es erfolgt eine Beendigung des Energy Harvesting nach Erreichen einer bestimmten Energiemenge.

Ebenso ist es aber möglich, dass die benötigte Energie in der Zeit zwischen zwei Zyklen nicht gewonnen werden kann. Dies kann permanent der Fall sein, weil beispielsweise die Zeitdauer zwischen den Zyklen zu kurz ist, oder aber auch nur temporär, weil die Quelle des Energy Harvesting in der betrachteten Zeit beispielsweise zu schwach oder nicht vorhanden ist. Um auch dann einen sicheren Betrieb zu garantieren, ist der Einsatz eines zusätzlichen Energiespeichers nötig. Dies geschieht meist in der Form einer herkömmlichen Batterie, die zur Unterstützung der Schaltung dient. Durch den Einsatz von Energy Harvesting wird die Lebensdauer der Batterie signifikant erhöht und reicht somit unter Umständen bis zum Ende der erwarteten Lebensdauer des Geräts.

Es ist also durchaus möglich, dass mehrere verschiedene Quellen zur Energieversorgung einer Schaltung benutzt werden. Um diese Quellen sinnvoll zu verwalten und bedarfsgerecht zu aktivieren, ist eine Steuerung notwendig. Diese wird als „Energiemanagement“ bezeichnet und wird meist mittels Mikrocontroller gesteuert. Auf dem nachfolgenden Bild ist der schematische Aufbau eines solchen Systems zur Energiegewinnung und Verwaltung zu sehen.

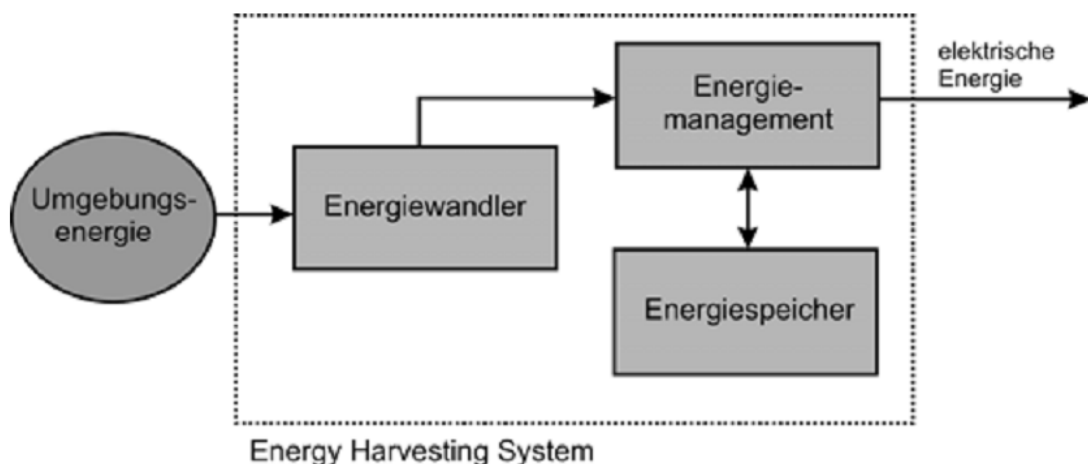


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung eines Energy Harvesting Systems [KLD01, S. 24]



Es zeigt, dass die Umgebungsenergie mit einem entsprechenden Energiewandler gewonnen wird. Anschließend entscheidet das Energiemanagement, wohin die Energie geleitet werden soll. Grundsätzlich gibt es drei Möglichkeiten der Energienutzung:

- Direkter Verbrauch durch die Schaltung
- Speichern der Energie im Kurzzeitspeicher
- Speichern der Energie im Langzeitspeicher

Die vom Wandler gelieferte Energie kann, sofern sie ausreicht, direkt an die Schaltung weitergegeben und zu deren Betrieb genutzt werden. Eine gebräuchlichere Ausführung stellt die Speicherung der Energie in einem temporären Zwischenspeicher dar. Dieser ist ständig mit dem Wandler verbunden und speichert die Energie. Diese kann dann von der Schaltung aus dem Speicher bezogen werden. Ebenso ist es denkbar, dass beim Erreichen einer bestimmten Schwelle im Kurzzeitspeicher dessen Energie in einen Langzeitspeicher umgeladen wird. Dieser kann beispielsweise durch einen Akku realisiert werden. Wird von der Schaltung im weiteren Verlauf des Betriebs ein sehr hoher Strom benötigt, so kann dieser dann aus dem Langzeitspeicher entnommen werden. Dieser weist gegenüber dem Kurzzeitspeicher typischerweise eine erheblich höhere Stromlieferfähigkeit auf.

## **4.5 Zwischenfazit**

Es wurde deutlich, dass nicht alle möglichen Quellen des Energy Harvesting auch eine ausreichende Leistungsdichte zur Versorgung der Schlosselektronik aufweisen. Dies hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Einerseits sind mit der derzeitigen Technologie keine größeren Leistungsdichten bei der Energieernte zu erzielen, andererseits sind die entsprechenden Quellen am gewünschten Einsatzort nicht oder nicht in der benötigten Intensität vorhanden.

Es hat sich weiters gezeigt, dass die Nutzung von Licht als Energiequelle ein möglicher Ansatz wäre. Ebenso wäre eine Lösung mittels eines Generators denkbar. Dieser könnte, abhängig von der vorliegenden Bewegungsform, als Lineargenerator oder als herkömmlicher Generator ausgeführt werden.

Bei der Betätigung des Schlosses wird vom Benutzer Bewegungsenergie in die Schlossmechanik eingebracht, die nach der Umwandlung in elektrische Energie zur Versorgung der entsprechenden Schlosselektronik genutzt werden kann.

Bei der Untersuchung von Energy Harvesting - Systemen hat sich gezeigt, dass bereits beim Entwurf einer Schaltung der Einsatz von Energy Harvesting berücksichtigt werden muss. Neben den schaltungstechnischen Anpassungen an diese Art der Energieversorgung, muss auch der firmwaremäßige Ablauf an die Gegebenheiten angepasst werden. Dies betrifft vor allem die sinnvolle Nutzung der Ruhemodi der einzelnen Funktionsblöcke.

## 5 Konzepte zur Spannungsversorgung

In diesem Kapitel soll auf die verschiedenen möglichen Realisierungsvarianten der Spannungsversorgung der neuen Schlosselektronik eingegangen werden. Es werden neben einer einfachen Batterieversorgung auch die Möglichkeiten der Spannungsversorgung mit Hilfe von Energy Harvesting beschrieben.

### 5.1 Details der zu versorgenden Schaltung

Für die Betrachtung der folgenden Ausführungen wird der bereits in Kapitel 3 ausführlich beschriebene Prototyp verwendet. Für den Testaufbau wurden die nachfolgend angeführten Baugruppen bestückt und verwendet.

#### Verwendete Funktionsblöcke des Prototypenboards

- Mikrocontroller
- Brückenschaltung
- Ein- und Ausgabe (LED & Taster)
- Selbsthalteschaltung
- Spannungsregler des Funkmoduls

Neben den oben angeführten Funktionsblöcken wird noch das Funkmodul WM800 sowie das RFID-Modul RM510 verwendet. Als Verriegelungsmechanismus wird der unter Kapitel 3.2.3 beschriebene Motor mit Zahnradgetriebe und verschiebbarer Gewindestange verwendet. Der Anschluss erfolgt direkt an die Brückenschaltung. Der Messwiderstand R3 mit  $22 \Omega$  ist bereits vorhanden und soll zukünftig Messungen des Motorstroms mittels Mikrocontroller dienen. So kann beispielsweise eine Blockade der Mechanik über die stark erhöhte Stromaufnahme des Antriebsmotors festgestellt werden.

Der wichtigste Punkt beim Entwurf eines Konzepts zur Spannungsversorgung ist die Sicherstellung, dass jeder Halbleiterbaustein mit der nötigen und zulässigen Spannung versorgt wird. Nur so wird eine einwandfreie Funktion des Halbleiterbausteins seitens des Herstellers garantiert.

Die Grenzen der Versorgungsspannung der einzelnen Halbleiterbausteine sowie des verwendeten Kleinstmotors sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

Halbleiterbaustein	$U_{\min}$ V	$U_{\max}$ V	Quelle
CLRC663	3	5,5	[NXP01, S 3]
CC1101	1,8	3,9	[TI02, S. 8]
EFM32GG380	1,85	3,8	[EM01, S. 9]

Abbildung 5.1: Übersicht der zulässigen Versorgungsspannungen

Wie zu erkennen ist, variieren die Bereiche der zulässigen Versorgungsspannung sehr stark. Wird nur mit einer gemeinsamen Versorgungsspannung gearbeitet, so muss diese im Bereich von 3 – 3,8 V liegen.

## 5.2 Versorgung mittels Batterie

### 5.2.1 Reiner Batteriebetrieb

Der direkte Anschluss einer Batterie an die Schlosselektronik kann als einfachste Ausführungsform der Spannungsversorgung betrachtet werden. Es muss jedoch auch hier sichergestellt werden, dass sich die Versorgungsspannung im zulässigen Bereich befindet.

Auf die Größe der Versorgungsspannung kann im Betrieb kein Einfluss genommen werden und hängt rein von der verwendeten Batterie ab. Der einzige Schutzmechanismus gegen das Verlassen des zulässigen Spannungsbereichs stellt eine Überwachung der Batteriespannung mittels Mikrocontroller dar. Somit kann bei Unterschreiten der Mindestspannung die gesamte Schlosselektronik deaktiviert werden.

Folgende Kriterien müssen also durch die verwendete Batterie erfüllt werden:

- Nominale Spannung im zulässigen Bereich
- Ausreichende Kapazität
- Geringe Selbstentladung
- Ausreichende Stromlieferfähigkeit
- Gut handhabbare Baugröße

Es kommen somit nur Lithiumbatterien mit 3,6 V nominaler Spannung in Frage. Diese besitzen neben einer geringeren Selbstentladung auch eine ausreichende Stromlieferfähigkeit. Die in der Baugröße „SIZE C“ verfügbaren Batterien weisen eine ausreichende Kapazität auf.

Auf dem nachfolgenden Diagramm ist der Stromverlauf bei der Versorgung des Prototypen mit einer 3,6 V – Lithiumbatterie zu sehen. Es wird bei diesen Messungen jeweils der Gesamtstrom mittels Messwiderstand erfasst. Der genaue Messaufbau entspricht dem in Kapitel 2.2 beschriebenen Aufbau. Die Aufzeichnung erfolgt bei der Durchführung eines Schließzyklus sowie einer Antwortzeit von 300 ms seitens der zentralen Verwaltungsstelle. Der Firmwareablauf ist im Kapitel 3.4.2 beschrieben. Ebenso ist dort nachzulesen, dass die jeweiligen Funktionsblöcke nur für die Dauer ihrer Benutzung aktiviert wurden und sich ansonsten im Ruhezustand befinden.

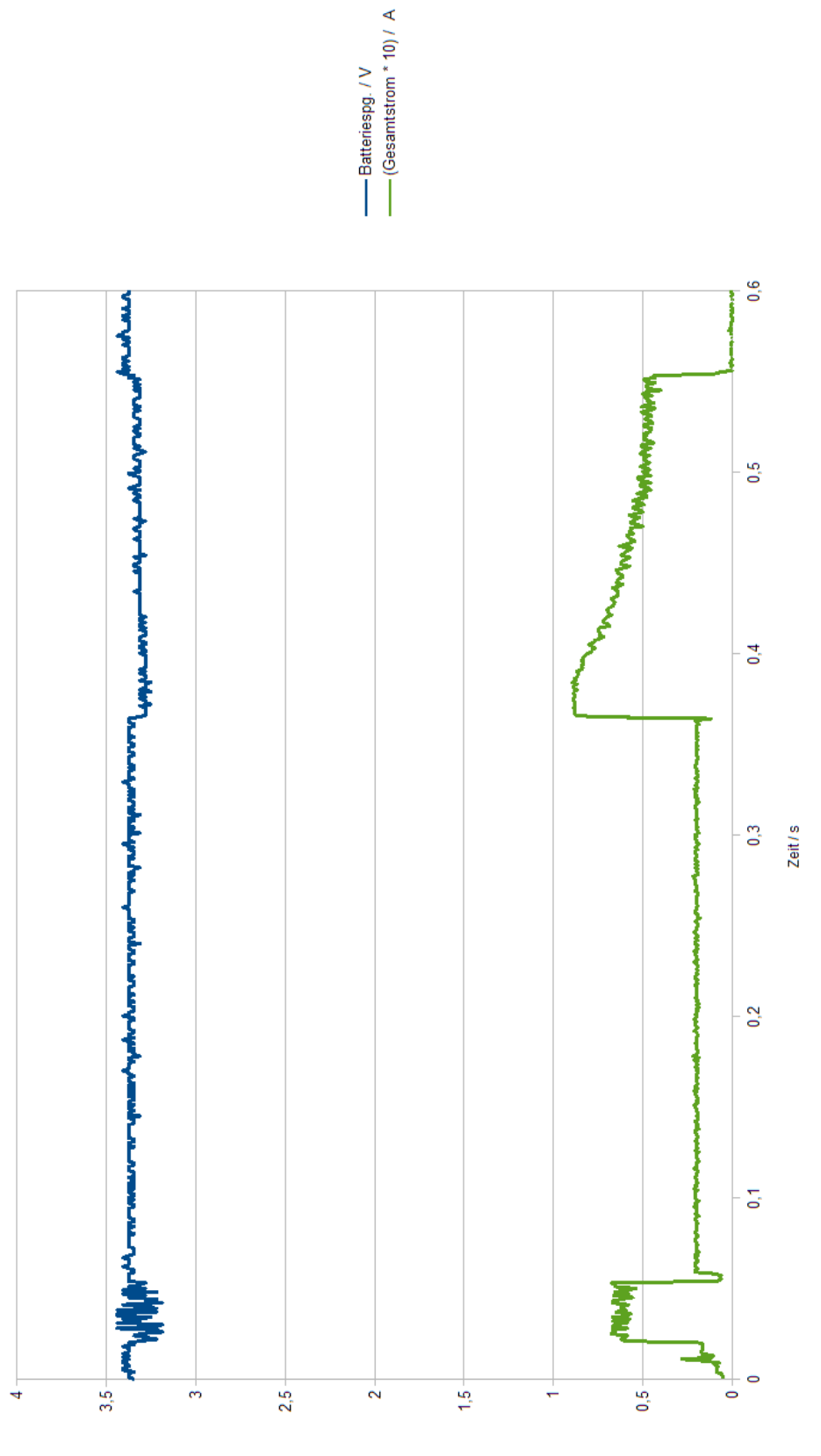


Abbildung 5.2: Stromverlauf bei Batterieversorgung ohne Wandler

Auf dem Diagramm ist der Stromverlauf eines Schließzyklus der neuen Schlosselektronik zu sehen. Auffallend sind die starken Schwankungen der Versorgungsspannung im Bereich der ersten Stromerhöhung. In diesem Bereich ist das RFID-Modul aktiv und beeinflusst durch die hohen Frequenzen des HF-Felds die Messung erheblich.

Die Zeitdauer des Ablaufs eines Schließzyklus beträgt 560 ms. Für diesen Ablauf war eine Energiemenge von 67,66 mWs erforderlich. Bei der Berechnung des mittleren Stroms über die Ablaufdauer ergibt sich ein Wert von 36,42 mA.

Mit Hilfe dieser Werte kann die Anzahl der möglichen Betätigungen berechnet werden. Als Batterie wird die Lithiumbatterie SL-2770 des Herstellers TADIRAN BATTERIES verwendet. Diese Batterie erfüllt alle zuvor gestellten Anforderungen. Mit dem berechneten durchschnittlichen Strom kann mit Hilfe des Diagramms auf die zur Verfügung stehende Batteriekapazität zurückgeschlossen werden.

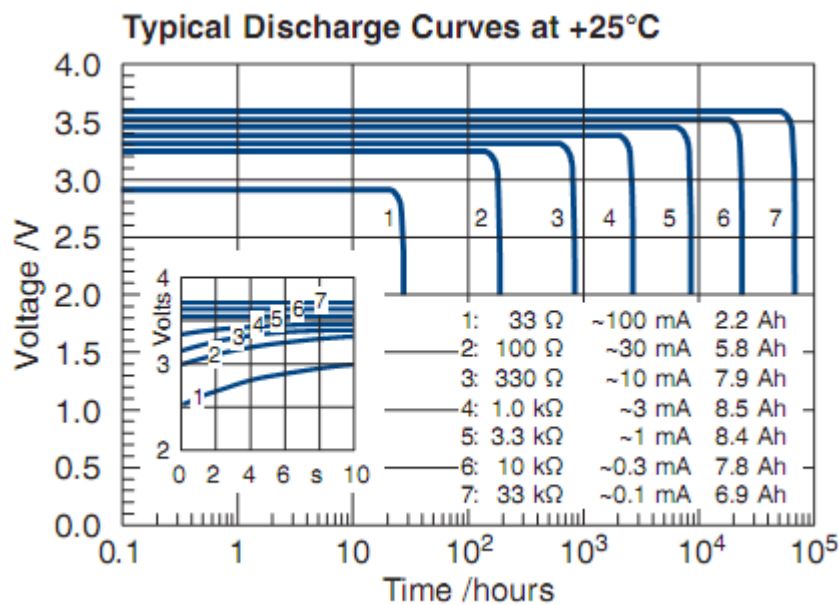


Abbildung 5.3: Kapazitätsverlauf der Lithiumbatterie SL-2770 [TAD01, S. 1]

Durch den errechneten mittleren Strom, der etwas über 30 mA liegt, und dem Auftreten einiger höherer, impulsförmiger Stromspitzen kann hier nicht mit der Kennlinie 2 gerechnet werden. Die tatsächlich zu verwendende Kennlinie liegt zwischen den Kurven mit der Markierung 1 und der Markierung 2.

Die zur Verfügung stehende Kapazität unterscheidet sich bei den betrachteten Kurven sehr stark. Unter der Berücksichtigung der Selbstentladung der Batterie von rund 1% jährlich über die Lebensdauer von 10 Jahren wird eine zur Verfügung stehende Gesamtkapazität von 3500 mAh angenommen.

Es ist außerdem zu sehen, dass bei den verwendeten Batterien die Spannung annähernd über die gesamte nutzbare Kapazität konstant bleibt. Somit kann hier für alle Zyklen vom selben Gesamtenergiebedarf ausgegangen werden. Die Ausgangsspannung der Lithiumbatterie wird mit 3,1 V angenommen.

Dadurch ergibt sich eine zur Verfügung stehende Gesamtenergiemenge von:

$$W_{Gesamt} = U_{Batterie} * C_{Batterie} = 39.060 \text{ Ws} \quad [5.1]$$

Wird von einem Energiebedarf von 70 mWs pro Zyklus ausgegangen, kann die Anzahl der möglichen Betätigungen berechnet werden:

$$n_{Betaetigungen} = \frac{W_{Gesamt}}{W_{Betaetigung}} = 558.000 \quad [5.2]$$

Es wären somit über eine halbe Million Betätigungen möglich. Bei den angenommenen 50 Betätigungen pro Tag würde dies einer Lebensdauer von 31 Jahren entsprechen. Dies übersteigt die geforderte Lebensdauer des Geräts bei Weitem. Es kann also von einer zu großen Dimensionierung des Energiespeichers ausgegangen werden. Dies wäre in der Praxis nicht sinnvoll und müsste daher den Anforderungen des Geräts angepasst werden.

Diese Berechnung zeigt, dass bereits bei der Verwendung einer Batterie der Größe C die Lebensdauer der neuen Schrankelektronik um mindestens Faktor 5 höher liegt als jede des alten Entwurfs.



## **5.2.2 Versorgung über DC/DC-Wandler**

Eine weitere Möglichkeit stellt die Versorgung der Schaltung über einen DC/DC-Wandler, der von einer Batterie gespeist wird, dar. Hierbei kann die sekundäre Spannung auf 3 V geregelt werden, da diese ja stabilisiert und somit garantiert ist. Es werden also alle notwendigen und zulässigen Versorgungsspannungen eingehalten.

Der Vorteil dieser Ausführung liegt eindeutig beim sehr großen Eingangsspannungsbereich dieser Regler. Durch geschickte Reglerwahl kann der Eingangsspannungsbereich so gewählt werden, dass die Batterie nahezu vollständig entladen werden kann. Sie kann somit auch noch benutzt werden, wenn die Batteriespannung bereits weit unterhalb der Nominalspannung liegt. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die benötigte Stromlieferfähigkeit auch bei niedrigen Klemmenspannungen noch gewährleistet ist.

Durch den sehr großen Eingangsspannungsbereich kann die Batteriewahl sehr viel flexibler gestaltet werden. Es kann somit auf handelsübliche Standardbatterien zurückgegriffen werden, die meist günstiger und einfacher zu beschaffen sind. Es sind auch beliebige Parallel- und Serienschaltungen der Batterien denkbar.

Die Energiebilanz der Schaltung selbst fällt bei einer konstanten Versorgungsspannung von 3 V günstiger als im reinen Batteriebetrieb aus. Zum Vergleich muss jedoch die aus der Batterie entnommene Energie betrachtet werden. Das bedeutet, dass auch der Wandler mit in die Betrachtung eingeschlossen werden muss. Durch den Wirkungsgrad des Wandlers ergibt sich somit ein höherer Gesamtenergiebedarf.

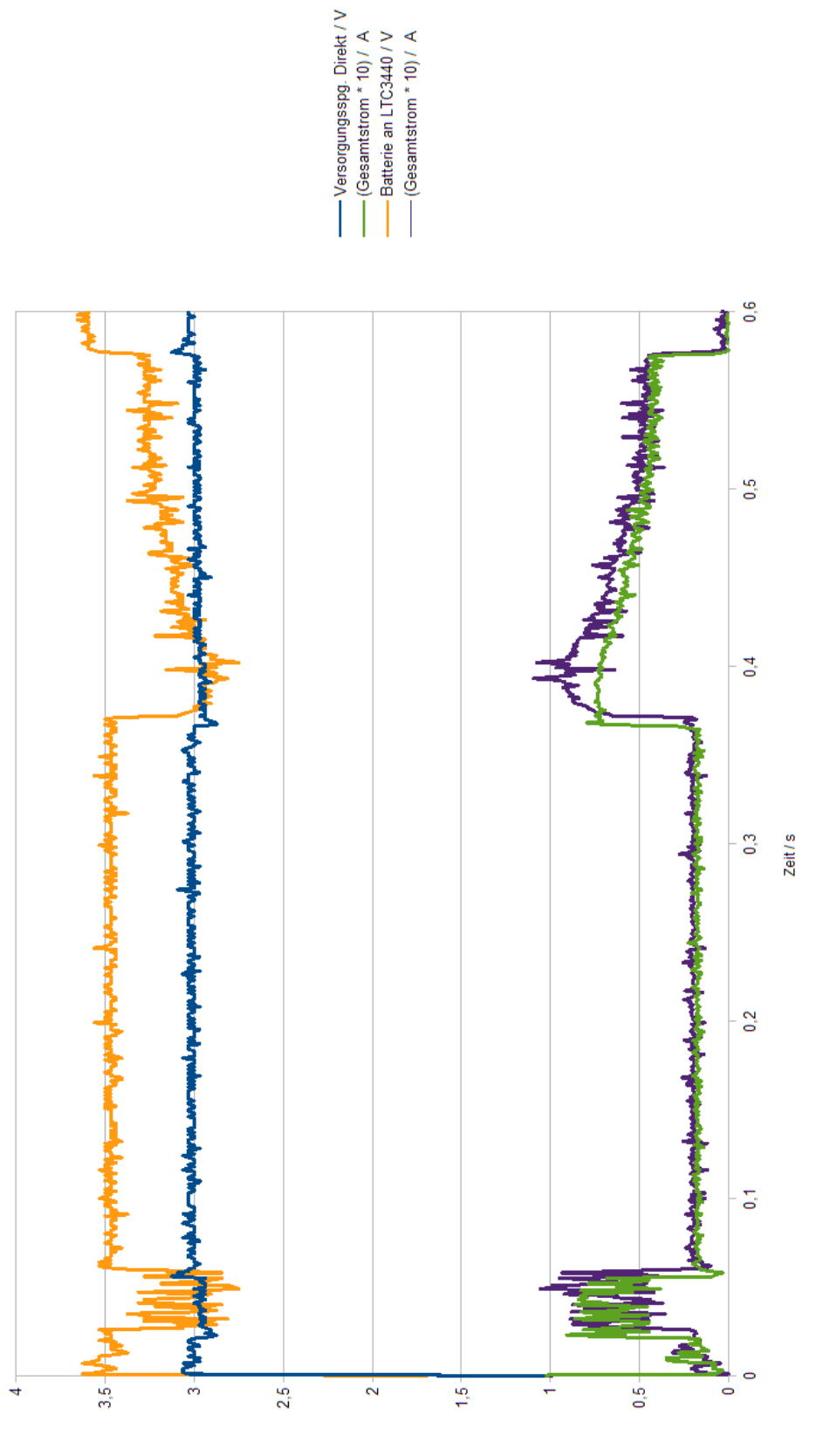


Abbildung 5.4: Stromverlauf bei Batterieversorgung mit Wandler

Aus der Berechnung geht hervor, dass bei der Versorgung der Schaltung mit 3 V ein Gesamtenergiebedarf von 58,42 mWs bei einer Ablaufdauer von 577 ms ausreichen. Diese Berechnung berücksichtigt die Verluste im DC/DC-Wandler jedoch nicht.

Es wird ein LTC3440 zur DC/DC-Wandlung eingesetzt, dessen Ausgangsspannung auf 3 V eingestellt ist. Als Energiequelle dient eine Lithiumbatterie mit einer nominalen Klemmenspannung von 3,7 V. Der Wandler wird mit der Standardbeschaltung betrieben, lediglich die Ausgangsspannung wird auf 3 V angepasst. Dies erfolgt durch Ändern des Teilverhältnisses der Widerstände R1 und R2 [LTC01, S. 6-10].

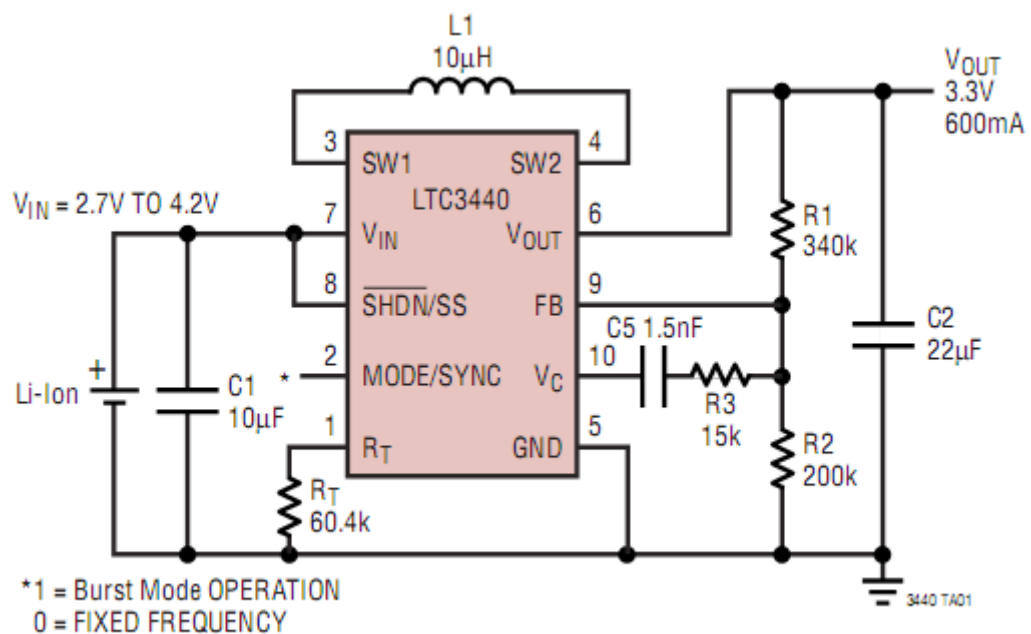


Abbildung 5.5: Standardbeschaltung des Wandlers LTC3440 [LTC01, S. 1]

Bei der Berechnung der notwendigen Energiemenge zur Versorgung der neuen Schlosselektronik ergibt sich ein Wert von 70,28 mWs. Die Ablaufdauer beträgt auch hier 577 ms. Durch die bekannten notwendigen Energiemengen für den Betrieb der Schaltung mit Wandler sowie ohne Wandler direkt an einer Versorgungsspannung von 3 V kann der Wirkungsgrad des Wandlers bestimmt werden.

$$\eta_{\text{Betaetigungen}} = \frac{W_{\text{Schaltung}}}{W_{\text{Gesamt}}} = 0,831 \quad [5.3]$$

Der errechnete Wirkungsgrad liegt mit 83,1% etwas unter dem zu erwartenden Wirkungsgrad. Dies ist jedoch vor allem auf die Verwendung einer nicht optimalen Drosselspule beim Aufbau der Schaltung zurückzuführen.

Es wurde deutlich, dass trotz Einsatz eines DC/DC-Wandlers keine Energieersparnis gegenüber der direkten Versorgung der Schaltung mit einer höheren Spannung zu erzielen war. Selbst durch Verbesserungen des Wirkungsgrads bleibt die Energieersparnis so gering, dass der Einsatz eines DC/DC-Wandler keinen wirklichen Vorteil bringt. Die zusätzlichen Materialkosten dürften die finanziellen Einsparungen durch den Einsatz von handelsüblichen und somit günstigeren Batterien bei weitem übersteigen.

### 5.2.3 Mischformen

Neben einer direkten Versorgung mittels Batterie oder der Versorgung der Schaltung über einen DC/DC-Wandler ist auch eine Kombination aus beiden Varianten denkbar.

#### Direkte Batterieversorgung und Wandler mit fester Ausgangsspannung

Somit könnte die Versorgungsspannung und damit der Gesamtenergiebedarf noch weiter gesenkt und von entsprechenden Batterien zur Verfügung gestellt werden. Jene Bauelemente, die eine höhere Versorgungsspannung als die zur Verfügung stehende Klemmenspannung der Batterie benötigen, werden weiterhin über einen Wandler versorgt.

In einer möglichen Ausführungsform wird die Schlosselektronik über einen Wandler, der über einen Bypass-Zweig umgangen und deaktiviert werden kann, versorgt. Der Wandler bleibt somit deaktiviert und wird erst firmwaremäßig aktiviert, wenn die entsprechenden Funktionsblöcke, die einen erhöhten Spannungsbedarf aufweisen, verwendet werden. Dies wäre bei der neuen Schlosselektronik zumindest beim RFID-Modul nötig.

### Wandler mit variabler Ausgangsspannung

Eine weitere mögliche Ausführungsform sieht einen Wandler mit variabler Ausgangsspannung zur Versorgung der Schaltungselektronik vor. Dieser Wandler wird vom Mikrocontroller angesteuert und hält die Spannungsversorgung auf dem geringsten noch zulässigen Spannungsniveau für alle aktiven beteiligten Funktionsblöcke. So entsteht ein dynamischer Verlauf der Versorgungsspannung, der von der Firmware gesteuert und an die jeweiligen Funktionsblöcke und deren Benutzung gekoppelt ist.

Es hat sich im Versuch gezeigt, dass Standard-Regler für eine Umschaltung der Ausgangsspannung im Betrieb nicht geeignet sind. In einer Standardbeschaltung wird die Ausgangsspannung meist durch einen Spannungsteiler und Rückführen der Teilspannung an den Regler-IC bestimmt. Durch Verändern dieses Teilverhältnisses während des Betriebs war zwar eine Umschaltung der Spannung möglich, jedoch ging damit eine sehr hohe impulsförmige Belastung der Quelle einher.

Abschließend kann gesagt werden, dass Standard-Regler für diese Art der Umschaltung der Ausgangsspannung im laufenden Betrieb nicht geeignet sind. Da es nicht Teil dieser Diplomarbeit war, eine optimierte Batterielösung zu finden, sowie aus zeitlichen Gründen, wurden keine weiteren Möglichkeiten der Realisierbarkeit dieser Ausführungsform der Spannungsversorgung untersucht.

### **5.3 Verschiedene Speicherkonzepte**

Beim Einsatz von Energy Harvesting zur Energiegewinnung werden auch entsprechende Energiespeichermöglichkeiten benötigt. Je nach Art des Energy Harvesting kommen unterschiedliche Speicherkonzepte in Frage.

Es sollen die verschiedenen Speicherkonzepte und -möglichkeiten mit ihren Vor- und Nachteilen untereinander verglichen werden, und die für die jeweilige Art des Energy Harvestings am besten geeigneten gesucht werden.

Grundsätzlich muss zwischen Kurzzeitspeicher und Langzeitspeicher unterschieden werden. Im Kurzzeitspeicher wird die gewonnene Energie möglichst einfach gespeichert und anschließend zeitnah verbraucht. Meist wird daher, wenn der Kurzzeitspeicher seine volle Kapazität erreicht hat, die Schaltung aktiviert und führt einen Zyklus gemäß ihrer Bestimmung durch. Nach Ablauf des Zyklus wird weitere Energie „geerntet“ und beim Erreichen einer bestimmten Kapazität oder Spannung des Speichers der Schaltungszyklus erneut gestartet.

Im Gegensatz dazu steht der Langzeitspeicher, dessen Aufgabe es ist, die gewonnene Energie möglichst verlustarm über einen längeren Zeitraum zu speichern. Speicher dieser Art werden vor allem bei Schaltungen mit aperiodischen Startzeitpunkten des Schaltungszyklus eingesetzt. Solche Schaltungen werden meist durch einen Triggerimpuls von außen, beispielsweise einer Betätigungstaste oder durch einen Sensor, der eine Überschreitung eines Grenzwertes registriert, gestartet. Da solche Triggerimpulse jederzeit auftreten können und die Zeitspanne zwischen der Ausführung der Zyklen unbekannt ist, wird die Energie daher aus einem Langzeitspeicher entnommen. Dieser Speicher wird kontinuierlich nachgeladen, um so auch bei einer schnellen Zyklenabfolge genügend Energie zur Verfügung stellen zu können. Es ist jedoch darauf zu achten, dass die Energiebilanz über einen längeren Zeitraum positiv ausfällt sowie dass der Langzeitspeicher über eine ausreichende Energiereserve für eine schnelle Abfolge der Zyklen verfügt.

Die Unterscheidung zwischen Langzeit- und Kurzzeitspeicher erfolgt in erster Linie durch ihren schaltungstechnischen Einsatz und weniger durch die Art ihrer physikalischen Ausführung. Dies bedeutet, dass ein und derselbe Speicher als Langzeit- aber auch als Kurzzeitspeicher eingesetzt werden kann. Da jedoch jedes Bauteil auch seine physikalischen Vor- und Nachteile hat, gilt es sorgfältig abzuwägen, welcher Speicher für den entsprechenden Einsatzzweck in Frage kommt.

## **5.4 Versorgung mittels Solarzellen**

Es soll zur Möglichkeit der Energieversorgung der Schrankelektronik der Einsatz von Solarzellen untersucht werden. Da beim Einsatz der Schrankenschlösser von bestimmten Umweltbedingungen ausgegangen werden muss, ist es erforderlich, diese in der Untersuchung zu berücksichtigen. Dazu zählen vor allem der vorwiegende Einsatz in Innenräumen mit künstlicher Beleuchtung.

### **5.4.1 Verwendete Solarzelle**

Aus den bereits erwähnten Umweltbedingungen ist zu folgern, dass herkömmliche kristalline Solarzellen hier nur bedingt Anwendung finden können. Es muss vor allem auf den Umstand der Verwendung im Innenbereich eingegangen werden. Da nur Kunstlicht, meist von Leuchtstoffröhren, verfügbar ist, müssen auch die verwendeten Solarzellen auf das Lichtspektrum dieser Quellen hin optimiert sein. Dazu sind spezielle Indoor-Solarzellen verfügbar, deren Absorptionsspektrum auf das Lichtspektrum der künstlichen Lichtquellen ausgelegt ist.

Nur durch solche Solarzellen kann das Spektrum des Kunstlichts optimal genutzt werden. Dennoch liegt die Leistungsdichte um ein Vielfaches niedriger im Vergleich zu Outdoor-Solarzellen bei der Verwendung von natürlichem Sonnenlicht.

Für die folgenden Versuche wurde eine kleine amorphe Solarzelle der Firma Solems verwendet. Da bei der Verwendung einer Solarzelle diese die Bauform des Schrankschlosses nicht unnötig groß werden lassen soll, wurde eine kleine Solarzelle verwendet. Diese hat zwar eine kleinere Gesamtleistung, jedoch kann sie ohne großen Aufwand in der favorisierten Baugröße des Schrankschlosses untergebracht werden.

Es wurde der Typ 05/072/032 verwendet, der eine Abmessung von 72 mm \* 32 mm aufweist. Gemäß Datenblatt ist die Zelle für eine Helligkeit von 200 lux (Wert in der ersten Spalte), was einer normalen Zimmerbeleuchtung entspricht, sowie für 1000 lux (Wert in der zweiten Spalte), was einem tageslichterfüllten Raum entspricht, spezifiziert. Die angegebenen Ströme stehen bei den jeweiligen Spannungen zur Verfügung [SOL01, S. 2].

<b>Range 5</b>	<b>at 2 V :</b>	<b>at 2.2 V :</b>
05/040/009	6 $\mu$ A	30 $\mu$ A
05/048/016	11 $\mu$ A	55 $\mu$ A
05/048/032	24 $\mu$ A	120 $\mu$ A
05/072/032	42 $\mu$ A	210 $\mu$ A
05/072/048	65 $\mu$ A	325 $\mu$ A
05/072/072	98 $\mu$ A	490 $\mu$ A

Abbildung 5.6: Auszug des Datenblatts der verwendeten Solarzelle

### 5.4.2 Laden einer Kondensatorbank

Die denkbar einfachste Konfiguration einer solchen Schaltung setzt sich neben der Solarzelle aus einer Diode und den entsprechenden Kondensatoren zusammen. Dazu wird die Solarzelle über eine Diode mit möglichst geringer Vorwärtsspannung an den Kondensator beziehungsweise an die Kondensatorbank angeschlossen.



Bei dieser Schaltung werden die Kondensatoren, beim Vorhandensein der nötigen Lichtintensität, bis auf die maximale Ausgangsspannung der Solarzelle aufgeladen. Die Diode dient als Entladeschutz der Kondensatoren. Ist die Ausgangsspannung der Solarzelle kleiner als die Spannung an den Kondensatoren, so würden sich die Kondensatoren über die Solarzelle wieder entladen.

Diese Schaltung wurde auch beim Versuch mit der oben genannten Solarzelle angewandt. Als Kondensatorbank dienten drei parallel geschaltete Kondensatoren, die eine Gesamtkapazität von  $35.000 \mu\text{F}$  aufwiesen. Das folgende Diagramm zeigt den Spannungsverlauf an den Kondensatoren beim Aufladen mittels Solarzelle. Die Solarzelle befand sich dabei im Abstand von 2 m zu einer handelsüblichen Leuchtstoffröhre mit 58 W und einer Lichtfarbe von 840. Die Ausrichtung der Oberfläche der Solarzelle erfolgte dabei Richtung Leuchtmittel.

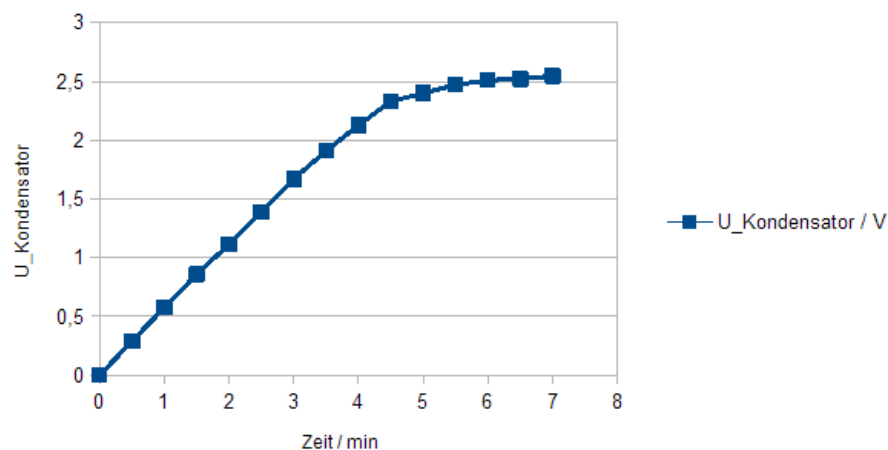


Abbildung 5.7: Spannungsverlauf an der Kondensatorbank

Nach etwa 6 min sind die Kondensatoren so weit aufgeladen, dass die Spannung an den Kondensatoren gleich der Ausgangsspannung der Solarzelle nach der Längsdiode ist. Es kann somit keine weitere Ladung in die Kondensatorbank mit  $35.000 \mu\text{F}$  Gesamtkapazität eingebracht werden.

Die bereits im Kondensator gespeicherte Energiemenge kann folgendermaßen errechnet werden:

$$W_{Gesamt} = \frac{C_{Kondensatorbank} * (U_{Kondensator})^2}{2} = 118,3 \text{ mWs} \quad [5.4]$$

Um möglichst viel Energie zu speichern, müssen folglich die Kondensatoren sehr groß sein. Es ist daher auf Grund vorhandener Beschränkungen in der Baugröße nicht immer möglich, die erforderliche und gewünschte Kapazität in Form von Kondensatoren unterzubringen. Dies bezieht sich auf handelsübliche Elektrolytkondensatoren, die vorzugsweise in einer Ausführung mit geringem Leckstrom verwendet werden.

Um die zur Verfügung stehenden baulichen Verhältnisse besser zu nutzen, wäre auch ein Einsatz von Doppelschichtkondensatoren denkbar. Diese besitzen eine sehr große Speicherkapazität bei relativ kleiner Bauform. Für die konkrete Aufgabenstellung, also der Versorgung einer Schrankelektronik mitsamt elektromechanischen Komponenten, sind sie jedoch auf Grund der geringen Stromlieferfähigkeit nicht geeignet. Aufgrund des sehr hohen Innenwiderstands bricht die Spannung an den Polen der Doppelschichtkondensatoren bei der Entnahme von größeren impulsförmigen Strömen so stark ein, dass sie zur Versorgung der Schrankelektronik nicht genutzt werden können. Ein weiterer unangenehmer Nebeneffekt ist der sehr hohe Leckstrom, den diese Ausführung von Kondensatoren aufweist.

Weiters macht sich bei der Verwendung von Kondensatoren mit beschränkter Kapazität bei der Entnahme der benötigten Energiemenge ein deutlicher Spannungsabfall an den Klemmen des Kondensators bemerkbar. Dies kann je nach verwendetem Spannungsregler zu Problemen führen. Abhilfe schafft hier ein DC/DC-Wandler mit einem sehr weiten Eingangsspannungsbereich.

Ebenso kann das schnelle Erreichen der maximalen Speicherfähigkeit der Kondensatoren als Nachteil gesehen werden. Ist die Umgebungsenergie weiterhin verfügbar, jedoch die Kondensatoren bereits vollständig geladen, so kann diese Energie nicht weiter verwertet werden. Es findet lediglich ein Ausgleich der Entladung durch die Leckströme der Kondensatoren statt. Um dieses Problem zu umgehen, ist der Einsatz eines Langzeitspeichers mit möglichst hoher Speicherkapazität nötig. Dieser wird meist in Form eines Akkumulators realisiert. Die genauere Betrachtung einer solchen Schaltungskonstellation erfolgt im anschließenden Kapitel.

### **5.4.3 Laden eines Akkus mit Hilfe eines Lade-ICs**

Eine weitere Möglichkeit der Energiespeicherung stellt die Langzeitspeicherung dar. Diese wird vorzugsweise mittels Akkumulator, der eine geringe Selbstentladung aufweist, realisiert. Gerade bei der Verwendung von Akkumulatoren mit geringer Selbstentladung, wie beispielsweise Li-Ionen-Akkumulatoren, ist die penible Einhaltung der zulässigen Ladespannungen von größter Wichtigkeit. Beim Betrieb außerhalb der Spezifikation kann der Akku dadurch beschädigt und die Lebensdauer drastisch verringert werden.

Da die Ausgangsspannungen von Solarzellen stark von der Umgebung abhängen und sich auch sehr schnell ändern können, ist ein direktes Laden von Li-Ionen-Akkumulatoren nahezu unmöglich. Die genaue Einhaltung der Ladeendspannung kann nicht gewährleistet werden.

Daher sind spezielle Lade-IC für die Ladesteuerung von Li-Ionen-Akkumulatoren am Markt erhältlich. Diese sind jedoch meist für höhere Ströme ausgelegt und besitzen nicht den erforderlichen Wirkungsgrad. Da bei der Verwendung einer Indoor-Solarzelle nur Leistungen im  $\mu\text{W}$ -Bereich zur Verfügung stehen, ist die Verwendung von herkömmlichen Lade-ICs ausgeschlossen.

Bei der Recherche hat sich ergeben, dass bereits einige Hersteller im Bereich von Lade-ICs für den Einsatz mit kleinsten Eingangsleistungen tätig sind. Diese sind nicht nur auf den Einsatz mit Solarzellen beschränkt, sondern können auch zur Nutzung anderer Energy Harvesting Quellen mit geringsten Ausgangsleistungen verwendet werden. Neben einer Vielzahl von Ankündigungen dieser Produkte sind bereits vereinzelt entsprechende Halbleiter am Markt erhältlich.

Für die Betrachtung der folgenden Ausführung wird der neue Lade-IC BQ25504 der Firma Texas Instruments herangezogen. Dieser Halbleiterbaustein ist speziell für den Einsatz bei kleinsten Eingangsleistungen entwickelt worden. Im Datenblatt wird als typische Anwendung das Gebiet des Energy Harvestings genannt. Es handelt sich dabei um einen DC/DC-Wandler, der neben einer Ladesteuerung für den Akkumulator auch das Maximum Power Point Tracking (MPPT) der angeschlossenen Solarzelle beherrscht [TI07, S. 1].

Um ein Anwendungsbeispiel konkret durchzurechnen, müssen zuerst die entsprechenden Rahmenbedingungen festgelegt werden. Es wird angenommen, dass die Solarzelle nicht ideal ausgerichtet ist und daher nicht den vollen Strom liefern kann. Der MPPT wird schaltungstechnisch auf 2 V gelegt. Bei einer typischen Beleuchtungsstärke von 100 - 200 lux im Aufstellungsbereich der Schrankanlagen kann 10  $\mu$ A als Ausgangsstrom der Solarzelle angenommen werden. Der Aufstellungsort ist durchschnittlich 8 Stunden am Tag beleuchtet. In der übrigen Zeit wird von vollkommener Dunkelheit ausgegangen.

Die Beschaltung des Lade-ICs entspricht der Standardbeschaltung. Durch das Teilverhältnis der Widerstände  $R_{OC}$  wird die Spannung des MPPT-Reglers festgelegt. Die Ladeendspannung wird durch die Widerstände  $R_{OV}$ , die Entladespannungsgrenze wird durch das Widerstandspaar  $R_{UV}$  festgelegt [TI07, S. 13-17].

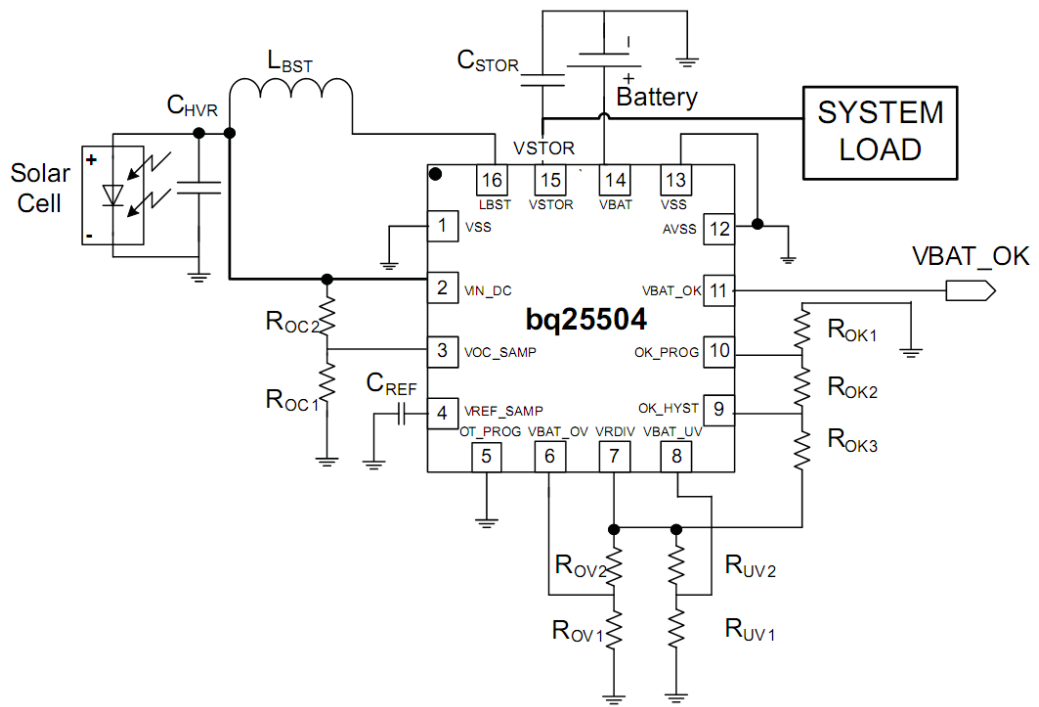


Abbildung 5.8: Standardbesaltung des Lade-IC BQ25504

Aus dem nachfolgenden Diagramm kann der Wirkungsgrad des DC/DC-Wandlers im angenommenen Arbeitspunkt bestimmt werden. Es wird von einer gewünschten Akkumulatorspannung (VSTOR) von 3 V ausgegangen. Der angenommene Arbeitspunkt ist im Diagramm mit einem „X“ gekennzeichnet.

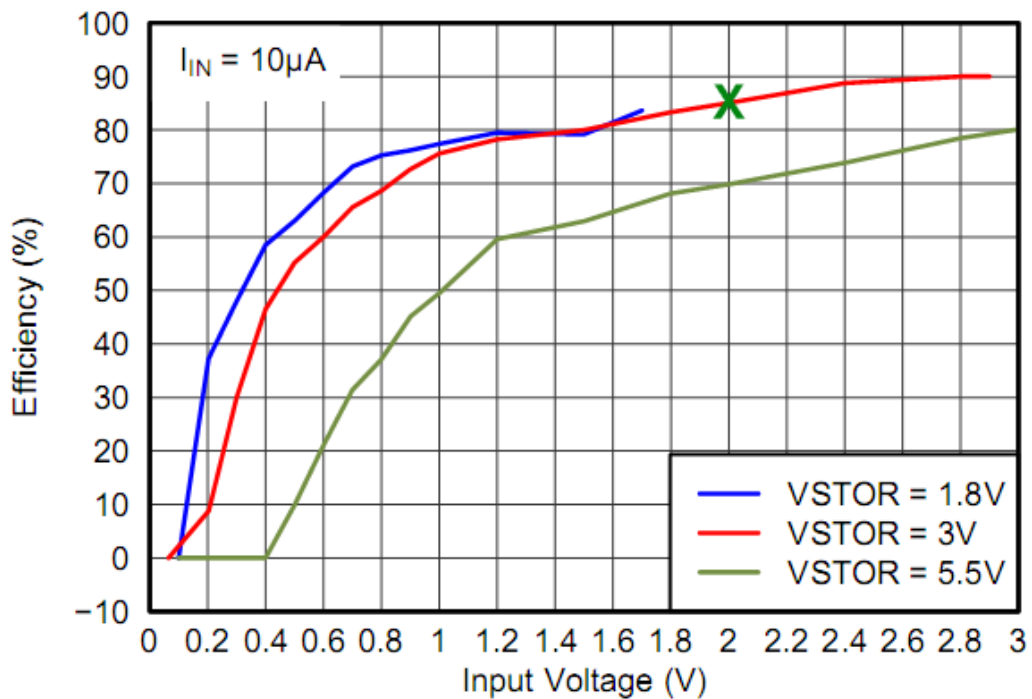


Abbildung 5.9: Verlauf des Wirkungsgrads über die Eingangsspannung [TI07, S. 10]

Die gelieferte Gesamtenergie der Solarzelle berechnet sich folgendermaßen:

$$W_{\text{Solarzelle}} = U_{\text{Solarzelle}} * I_{\text{Solarzelle}} * t_{\text{Betriebsdauer}} = 576 \text{ mWs} \quad [5.5]$$

Unter der Berücksichtigung des Wirkungsgrads von 85% des Wandlers sowie mit der Annahme, dass die Speicherung der Energie in den Langzeitspeicher verlustlos erfolgt, stehen anschließend am Ende eines Betriebstages also 489,6 mWs zur Verfügung:

$$W_{\text{Speicher}} = W_{\text{Solarzelle}} * \eta_{\text{Wandler}} = 489,6 \text{ mWs} \quad [5.6]$$

Diese Energiemenge reicht bereits für einige Betätigungen des Schrankschlosses aus. Unter der Annahme, dass bei einer Akkuspannung von 3 V bereits ein DC/DC-Wandler zur Versorgung der Schrankelektronik benötigt wird, kann mit den Ergebnissen aus Kapitel 5.2.2 gerechnet werden.

Unter der Annahme, dass für eine Betätigung des Schranksschlusses eine Energiemenge von 70 mWs bereitgestellt werden muss, gilt:

$$n_{\text{Betaetigungen}} = \frac{W_{\text{Speicher}}}{W_{\text{Betaetigung}}} = 6,98 \quad [5.7]$$

Es ist ersichtlich, dass bereits mit einer kleinen Solarzelle der Energiebedarf von rund sieben Betätigungen gedeckt werden kann. Dadurch verringert sich die täglich entnommene Energiemenge aus dem Langzeitspeicher um rund 14%.

## **5.5 Versorgung mittels Generator und Akku**

Eine weitere Möglichkeit, Energie aus der Umwelt zu gewinnen, stellt der Einsatz eines Generators dar. Dazu wird die lineare Bewegung der Betätigung der Taste am Schloss in eine rotative Bewegung umgewandelt. Damit ist es dann möglich einen herkömmlichen Generator anzutreiben.

Um die Energie aus dieser Drückbewegung bestmöglich zu nutzen, ist der Einsatz eines Übersetzungsgetriebes unerlässlich. Da die Drückbewegung nur sehr kurz und kräftig durchgeführt wird, bietet es sich an, einen Schwungradmechanismus mit Freilauf zwischenschalten. Damit wird die impulsförmige Energie von der Betätigung der Taste direkt auf das Schwungrad übertragen. Durch den Freilaufmechanismus kann das Schwungrad auch nach Beenden der Drückbewegung der Taste die gespeicherte Energie weiterhin an den Generator abgeben.

Weiters wäre natürlich der Einsatz eines Lineargenerators denkbar, der die lineare Bewegung der Tastenbetätigung oder des Verschlussriegels direkt nutzt. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass der Betätigungsweg der Taste sehr gering ist.

### **5.5.1 Verwendeter Generator**

Es sollte auch beim Versuchsaufbau ein Generator mit Übersetzungsgetriebe zur Wandlung der linearen Bewegung in eine rotative Bewegung, sowie ein entsprechendes Schwungrad mit integriertem Freilaufmechanismus zum Einsatz kommen.

Da ein Eigenbau eines solchen Getriebes mit Schwungrad und Freilaufmechanismus die zur Verfügung stehenden mechanischen Fertigungsmöglichkeiten bei weitem überschritten hätte, musste eine andere Lösung gefunden werden.

Es bot sich die Verwendung einer sogenannten „Dynamo-Taschenlampe“ an. Diese Taschenlampe besitzen einen Generator, der ebenso durch eine Drückbewegung angetrieben wird. Die typische Ausführung einer solchen Taschenlampe besitzt, aus den vorher bereits angeführten Gründen, ein Schwungrad, das durch ein Übersetzungsgetriebe angetrieben wird. Damit auch ein Nachlaufen des Generators möglich ist, wird das Schwungrad anschließend mechanisch durch einen Freilaufmechanismus vom Getriebe entkoppelt.

Auf dem nachfolgenden Bild ist eine solche Dynamo-Taschenlampe des Herstellers AMPER LED, Model „Klick Klack“, zu sehen. Die Energiespeicher, Leuchtmittel und die Ladeschaltung wurden entfernt. Es verblieben nur die Mechanik und der Generator in dem Gehäuse. Die zwei Anschlussdrähte des Generators wurden herausgeführt und mit einem Brückengleichrichter aus Schottkydioden verbunden.





Abbildung 5.10: Abbildung der Taschenlampe Marke AMPER LED

Durch Hineindrücken des mechanischen Hebels wird das Schwungrad in Bewegung versetzt und gibt seine Energie an den Generator ab. Die Bewegungsrichtung des Hebels ist in dem Bild durch einen Pfeil gekennzeichnet. Für alle folgenden Betrachtungen des Generators wird von einem maximal möglichen Energieeintrag durch den Hebel auf den Generator ausgegangen. Der hierbei limitierende Faktor ist das Getriebe, das aus Kunststoff gefertigt und nicht für extreme Stöße ausgelegt ist. Die so eingebrachte Energie entspricht etwa einer raschen Betätigung des bestehenden Schlosses.

In der nachfolgenden Abbildung ist der Spannungsverlauf des Generators im Leerlauf bei einer Betätigung zu sehen. Aus der Anfangsfrequenz kann hierbei auch auf die Anfangsdrehzahl des Generators zurückgeschlossen werden. Es liegen keine weiteren Daten und Informationen zum verwendeten Generator vor.

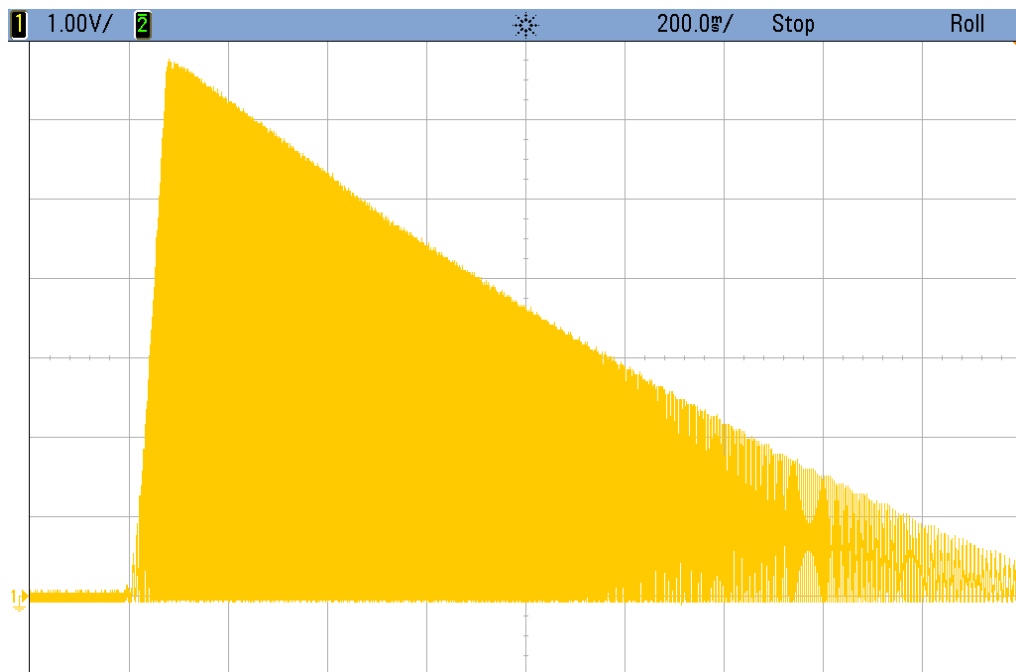


Abbildung 5.11: Spannungsverlauf am Generator bei Betätigung

## 5.5.2 Direkte Spannungsversorgung

Auf Grund der Form der Ausgangsspannung ist eine direkte Spannungsversorgung einer elektronischen Schaltung nicht möglich. Neben der hohen Restwelligkeit, die durch Kondensatoren ausgeglichen werden kann, bleibt der stark fallende Spannungsverlauf. Die zu versorgende Schaltung müsste einen sehr breiten Versorgungsspannungsbereich haben, um direkt versorgt werden zu können.

Da am Ausgang des Generators Spannungen von über 8 V anliegen können, die maximal zulässige Versorgungsspannung jedoch 3,9 V nicht übersteigen darf, wäre zumindest eine zusätzliche Spannungsbegrenzung nötig.

Der hier verwendete Generator ist somit vor allem wegen der hohen und stark schwankenden Ausgangsspannung nicht zur direkten Versorgung geeignet. Sollte dies gewünscht werden, wäre zumindest ein Generator mit dem passenden Ausgangsspannungsbereich erforderlich. Das Problem der stark fallenden Eingangsdrehzahl und somit auch der stark fallenden Ausgangsspannung würde jedoch weiterhin bestehen. Um auch dieses Problem zu umgehen, müsste ein erheblich größeres Schwungrad zum Einsatz kommen. Der damit einhergehende stark erhöhte Energiebedarf bei der Betätigung der Taste ist dabei zu berücksichtigen. Eine angenehme haptische Handhabung des Schlosses ist bei einer Erhöhung der Mindestkraft, die zur Betätigung des Schlosses aufgewandt werden muss, nicht mehr gegeben.

### **5.5.3 Laden einer Kondensatorbank**

Anstelle der direkten Versorgung der Schaltungselektronik ist auch hier wieder ein Zwischenspeichern der Energie in Kondensatoren denkbar. Es treten hierbei dieselben Probleme auf, die bereits in Kapitel 5.4.2 beschrieben wurden.

Es hat sich gezeigt, dass der Generator bei einer Betätigung in der Lage wäre, nahezu die gesamte notwendige Energie für eine Betätigung zu liefern. Dies ist jedoch nur unter bestimmten Rahmenbedingungen möglich, die in den anschließenden Ausführungen untersucht werden sollen.

Bei dieser Anordnung ist die Kondensatorbank direkt mit der Gleichrichterbrücke des Generators verbunden. Die Kondensatorbank kann somit nur geladen werden, wenn die Ausgangsspannung des Generators nach dem Gleichrichter höher ist als die Spannung an den Kondensatoren. Da der Generator bei einer Betätigung einen stark fallenden Verlauf der Ausgangsspannung aufweist, kann somit nur jene Energie gespeichert werden, die der Generator liefert bevor dessen Ausgangsspannung kleiner als die der Kondensatorbank ist.

Unter Berücksichtigung dieser Bedingung sollte die Anfangsspannung am Kondensator sehr klein sein. Dadurch ergibt sich aber das Problem des sehr hohen Stroms beim Anlegen einer Spannung an einen fast leeren Kondensator.

Durch den verhältnismäßig hohen Innenwiderstand des Generators von  $21,1 \Omega$  besitzt dieser nur eine begrenzte Stromlieferfähigkeit. Durch das Auftreten eines sehr hohen Anfangsstroms, der um ein Vielfaches über dem maximalen Ausgangsstrom des Generators liegt, wird ein sehr großer Spannungsabfall am Innenwiderstand des Generators hervorgerufen. Dadurch wird der Großteil der gewonnenen Energie im Wicklungswiderstand des Generators in Wärme umgewandelt.

Durch die sehr kurze Laufzeit des Generators wird die Phase des hohen Anfangsstroms nicht verlassen und somit wird nur eine sehr kleine Energiemenge in den Kondensatoren gespeichert. Dies hat sich in den Versuchen mit einer Kondensatorbank bestätigt.

Im folgenden Diagramm ist der Spannungsverlauf an den Kondensatoren zu sehen. Dieser wird durch die gelbe Kurve dargestellt, während der Strom, der in die Kondensatoren fließt, als grüner Kurvenverlauf erkennbar ist. Aus dem Kurvenverlauf wird deutlich, dass zwei aufeinanderfolgende Betätigungen des Generators durchgeführt wurden.

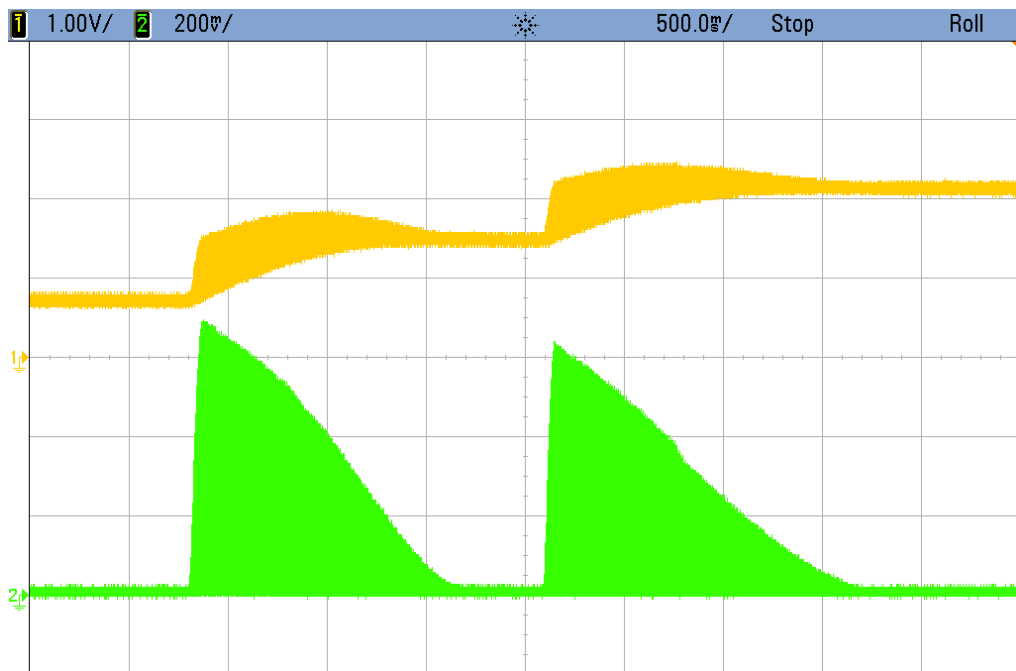


Abbildung 5.12: Spannungsverlauf an der Kondensatorbank

Wie auf dem Bild zu sehen ist, war die Kondensatorbank von 35.000  $\mu\text{F}$  bereits auf rund 0,75 V vorgeladen und erreichte ihren Endwert bei 1,5 V. Die durch die Betätigungen eingebrachte Energie kann folgendermaßen berechnet werden:

$$W_{\text{Gesamt1}} = \frac{C_{\text{ges}} * (U_{\text{vorher}})^2}{2} - \frac{C_{\text{ges}} * (U_{\text{nachher}})^2}{2} = 29,53 \text{ mWs} \quad [5.8]$$

Für die Berechnung der zweiten Betätigung ergibt sich folgende Energiemenge:

$$W_{\text{Gesamt2}} = \frac{C_{\text{ges}} * (U_{\text{vorher}})^2}{2} - \frac{C_{\text{ges}} * (U_{\text{nachher}})^2}{2} = 45,33 \text{ mWs} \quad [5.9]$$

Es wird deutlich, dass der verwendete Generator in der Lage ist, eine Energiemenge von bis zu 45 mWs pro voller Betätigung zu liefern. Die Speicherung dieser Energie gestaltet sich dennoch sehr schwierig. Um diese Energiemenge zu gewinnen, müsste der Kondensator stets auf einer Spannung von rund 2 V gehalten werden. Dies ist jedoch durch den hohen Leckstrom, den Kondensatoren dieser Größenordnung aufweisen, nicht wirtschaftlich und würde den Langzeitspeicher zusätzlich entleeren.

### **5.5.4 Laden des Akkus mit Generator**

Um das Problem des hohen Leckstroms der Kondensatorbank zu umgehen, können an Stelle der Kondensatoren Akkumulatoren eingesetzt werden. Dies hat den Vorteil einer, für den Betrachtungszeitraum einer Betätigung, festen Klemmenspannung des Akkumulators. Dadurch wäre die Bedingung des bereits vorgeladenen Kurzzeitspeichers erfüllt und der Generator könnte die gewünschte Energiemenge liefern.

Dies gilt jedoch nur, wenn die Spannung des Akkumulators ebenfalls möglichst gering ist. Im Gegensatz dazu steht meist der Wunsch, bei der Verwendung von Akkumulatoren die Schaltung direkt und ohne Wandler zu versorgen. Dazu ist jedoch eine Klemmenspannung im Bereich der minimal zulässigen Versorgungsspannung notwendig. Die meisten gebräuchlichen Akkumulatoren besitzen außerdem eine Klemmenspannung im Bereich von 3 - 4 V und sind somit nicht für diese Art der Energiespeicherung geeignet.

Eine hierfür denkbare Lösung wäre die Zusammenschaltung von mehreren Akkumulatoren mit jeweils möglichst kleiner Klemmenspannung. Diese Zusammenschaltung soll mittels elektronischen Schaltern erfolgen und die Möglichkeit bieten, die Akkumulatoren entweder in Serienschaltung oder in Parallelschaltung zu betreiben.

Somit wäre es denkbar, die Akkumulatoren beim Laden durch den Generator in Parallelschaltung mit möglichst geringer Klemmenspannung zu betreiben. Zur Versorgung der Schaltung werden die Akkumulatoren dann in Serienschaltung betrieben und liefern die erforderliche minimal zulässige Versorgungsspannung.

Dadurch entsteht wiederum ein neues Problem, das im Bereich der zeitlichen Abfolge liegt. So muss sich bei der Betätigung des Schlosses und in den darauf folgenden Sekunden der Akku im Parallelbetrieb befinden, um die vom Generator gelieferte Energie zu speichern. Gleichzeitig sollte jedoch die Schlosselektronik versorgt werden, um einen Schließ- oder Öffnungsvorgang durchzuführen. Dazu sollte sich der Akku jedoch im Serienbetrieb befinden.

Alle erdachten Lösungen, um dieses Problem zu vermeiden, resultierten entweder in einem sehr hohen materiellen Aufwand oder in einer für den Kunden ungewohnten Handhabung des Schlosses. Aus diesen und auch aus zeitlichen Gründen wurden deshalb Lösungen zur Umschaltung von Akkumulatorbänken nicht weiter untersucht.

### **5.5.5 Versorgung mittels Generator und DC/DC-Wandler**

Auf den ersten Blick erscheint der Einsatz eines DC/DC-Wandlers am Ausgang des Generators ideal. Bei der genaueren Betrachtung fällt auf, dass auch hier einige Probleme zu bewältigen sind.

Ein entscheidender Nachteil von DC/DC-Wandlern ist die meist sehr große impulsförmige Stromaufnahme. Diese tritt vor allem beim Anlauf des DC/DC-Wandlers auf. Wie bereits erwähnt, liegt jedoch einer der Nachteile des verwendeten Generators genau in der begrenzten Stromlieferfähigkeit. Somit ist, wie sich auch im Versuch herausgestellt hat, ein sicheres Anschwingen des DC/DC-Wandlers nicht gewährleistet.

Die Ausgangsspannung des Generators ist nicht nur stark abfallend, sondern auch lückend. Dies ist zur Versorgung eines DC/DC-Wandlers nicht geeignet. Es müssen daher Gegenmaßnahmen getroffen werden, um eine nicht lückende Spannungsversorgung des DC/DC-Wandlers zu gewährleisten.

Mit Hilfe eines Kurzzeitspeichers könnten die oben aufgeführten Probleme umgangen werden. Wie in den zwei vorherigen Kapiteln bereits ausführlich beschrieben wurde, ist jedoch der Einsatz eines Zwischenspeichers nicht ganz unproblematisch. Die zu erwartenden Probleme sind in den Kapiteln 5.5.3 und 5.5.4 genauer beschrieben.

Die einzig sinnvolle Ausführung, die einen DC/DC-Wandler einschließt, wäre demnach die Verwendung eines Akkumulators mit geringer Klemmenspannung als Speicher für die vom Generator erbrachte Energie. Der nachfolgende DC/DC-Wandler wird aus den Akkumulatoren gespeist. Dadurch ist sichergestellt, dass dem Wandler ein nicht lückender Strom zur Verfügung steht. Ein entsprechender Akkumulator besitzt außerdem eine sehr hohe Stromlieferfähigkeit, womit auch ein sicheres Anschwingen des DC/DC-Wandlers gewährleistet ist.



## **5.6 Zwischenfazit**

Es wurden mehrere Konzepte der möglichen Spannungsversorgung der Schlosselektronik erarbeitet. Die einfachste Möglichkeit stellt die Versorgung mittels einer Batterie dar. Diese kann je nach Schaltungsauslegung über einen DC/DC-Wandler oder direkt von der Batterie erfolgen.

Bei der Anwendung von Energy Harvesting ist ein Energiemanagement unerlässlich. Durch dieses erfolgt eine sinnvolle Verwaltung der Energie in den Langzeit- und Kurzzeitspeichern. Die als am geeignetsten betrachteten Arten des Energy Harvesting wurden untersucht und auf deren Einsatz in Verbindung mit der Schlosselektronik geprüft.

Es hat sich gezeigt, dass der Einsatz eines Generators zur Gewinnung elektrischer Energie aus der Bewegungsenergie, die vom Benutzer in den Schlossmechanismus eingebracht wird, ein denkbarer Ansatz wäre. Die Speicherung und Nutzung der Energie in der vorliegenden Form gestaltet sich komplizierter als zuerst angenommen.

Eine weitere Möglichkeit stellt der Einsatz von Indoor-Solarzellen dar. Diese Technologie ist verhältnismäßig sehr einfach zu handhaben. Es sind bereits mehrere Halbleiterbausteine zur Energiegewinnung im Bereich kleinster Leistungen verfügbar. Diese besitzen neben dem DC/DC-Wandler meist eine integrierte Lade-Regelung für einen angeschlossenen Akkumulator.

## **6 Zusammenfassung und Ausblick**

Ziel dieser Arbeit war die Untersuchung der Realisierbarkeit eines „Zero-Energy-Lock“. Darunter ist ein elektronisches Schloss zu verstehen, dessen Energiespeicher über die erwartete Lebensdauer von mindestens 8 - 10 Jahren nicht ausgetauscht werden muss. Als Schlüssel kommen RFID-Datenträger zum Einsatz.

Im Zuge der Arbeit wurde ein Schaltungsentwurf für eine energiesparende Schlosselektronik ausgearbeitet. Anschließend erfolgte eine Umsetzung dieses Entwurfs als funktionsfähiger Prototyp. Weiters wurden der Einsatz von Energy Harvesting zur Energieversorgung der Schlosselektronik untersucht und verschiedene Realisierungsmöglichkeiten aufgezeigt.

Die wesentlichen bisher erreichten Ziele und Verbesserungen gegenüber dem bestehenden Entwurf des Schrankschlosses sind in folgender Aufzählung zu sehen:

- Reduktion der notwendigen Gesamtenergie auf unter 1/4 des ursprünglichen Energiebedarfs
- Generator liefert bei einer Betätigung bereits rund 50% der notwendigen Energie für einen Zyklus
- Eine kleine Solarzelle liefert selbst unter schlechten Beleuchtungsbedingungen Energie für bis zu 7 Zyklen am Tag
- Keine statische Stromaufnahme durch Einsatz des Funkmoduls
- Erhebliche Erweiterung des Funktionsumfangs bei gleichzeitiger Reduzierung des Energieverbrauchs

Es hat sich gezeigt, dass allein durch schaltungstechnische Maßnahmen sowie dem Einsatz eines motorbetriebenen Schließmechanismus der Gesamtenergiebedarf pro Zyklus bereits auf ein Viertel des ursprünglichen Energiebedarfs reduziert werden konnte.

Ebenso hat sich gezeigt, dass sich der Einsatz von Energy Harvesting mittels Generatoren oder Solarzellen durchaus lohnt. Selbst bei einer Schaltung mit elektromechanischen Komponenten, die einen verhältnismäßig hohen Energiebedarf aufweist, kann ein beträchtlicher Teil des Gesamtenergiebedarfs abgedeckt werden.

Durch den Verzicht auf einen RTC-Baustein und unter der Verwendung eines Funkmoduls zur Abfrage der Berechtigungen kann eine statische Stromaufnahme vermieden werden. Weiters führt der Einsatz einer zentralen Verwaltungsstelle zu einer erheblichen Erweiterung des Funktionsumfangs des Schlosses, sowie zur Erhöhung des Verwaltungskomforts der gesamten Schrankanlage.

Bei einer Realisierung des neuen Entwurfs sind durchaus weitere Verbesserungen bezüglich des Gesamtenergiebedarfs vorstellbar. Folgende Verbesserungen und Optimierungen sind bei einem Neuentwurf denkbar:

- Weitere Verbesserung des Schließmechanismus  
→ Reduzieren der elektromechanischen Komponenten
- Einsatz von effizienteren Funkmodulen  
→ System-On-Chip Lösungen für Mikrocontroller & Funkmodul
- Reduktion der Betriebsdauer des Funkmoduls  
→ Erreichen einer möglichst kurzen Antwortzeit
- Verwendung eines effizienteren Generators  
→ weitere Steigerung der gewonnenen Energiemenge

Abschließend kann gesagt werden, dass das primäre Ziel der Aufgabenstellung, die Senkung des Gesamtenergieverbrauchs und somit eine Verlängerung der Lebensdauer des eingebauten Energiespeichers, erreicht wurden. Die anvisierte Verlängerung der Lebensdauer um das Vier- bis Fünffache konnte somit erreicht werden. Bei weiterer Verbesserung der Schaltung sowie deren Komponenten dürften sogar Lebensdauererwartungen von über dem Fünffachen der ursprünglichen Lebensdauer realisierbar sein.

## Literaturverzeichnis

- AO01: Alpha & Omega Semiconductor, Datenblatt - AO6602, März 2011
- ATM01: Atmel, Datenblatt - ATMEGA64L, Juni 2010
- ELN01: Klaus Dembowski, Energy Harvester zur netzunabhängigen Stromversorgung, 29.08.2012, [http://www.elektroniknet.de/power/technik-know-how/batterienakkus/article/80438/0/Energy\\_Harvester\\_zur\\_netzunabhaengigen\\_Stromversorgung/](http://www.elektroniknet.de/power/technik-know-how/batterienakkus/article/80438/0/Energy_Harvester_zur_netzunabhaengigen_Stromversorgung/)
- EM01: Energy Micro, Datenblatt - EFM32GG380, 30.05.2012
- EM02: Energy Micro, Reference Manual EFM32GG, 24.04.2012
- EM03: Energy Micro, Datenblatt - EFM32TG840, 04.05.2012
- EM04: Energy Micro, EFM32 Tiny Gecko Starter Kit , 09.09.2012, <http://www.energymicro.com/tools/efm32-tiny-gecko-starter-kit>
- EM05: Energy Micro, AN0023 - Configuring Eclipse for EFM32 Development, 13.08.2012
- GAT01: Gantner Electronic GmbH, Kurzbeschreibung Gat Lock 6010F B, Okt. 2009
- HAE01: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schwager, Übersicht nutzbarer Energiequellen für Energy Harvesting, 28.08.2012, <http://www.harvesting-energy.de/>
- HEI01: heise online, Energie-Sammler - Kostenlose Stromversorgung per Energy Harvesting, 29.08.2012, <http://www.heise.de/mobil/artikel/Kostenlose-Stromversorgung-per-Energy-Harvesting-474994.html>
- KLD01: Klaus Dembowski, Energy Harvesting für die Mikroelektronik: Energieeffiziente und -autarke Lösungen für drahtlose Sensorsysteme, 2011, Vde Verlag GmbH
- LTC01: Linear Technology, Datenblatt - LTC3440 Micropower Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter, 2001
- NXP01: NXP, Datenblatt - CLRC663, 26.09.2011
- NXP02: NXP, Datenblatt - MF RC500, 15.03.2010
- SOL01: SOLEMS, Datenblatt - Thinfilm solar cells for low and high illumination, 2009
- TAD01: Tadiran Batteries GmbH, Datenblatt - Lithiumbatterie SL2770, 2012

- TI01: Texas Instruments, Datenblatt - LP3986, 2011
- TI02: Texas Instruments, Datenblatt - CC1101, 2012
- TI03: Texas Instruments, Referenzdesign CC1101EM 868/915MHz
- TI04: Texas Instruments, Referenzdesign CC1111 USB-Dongle
- TI05: Texas Instruments, Design Note DN 016 Compact Antenna Design, 20.08.2009
- TI06: Texas Instruments - Murugavel Raju, Mark Grazier  
White Paper: Energy Harvesting, April 2010
- TI07: Texas Instruments, Datenblatt - BQ25504, Oktober 2011