Hochschule Offenburg
offenburg.university

Entwicklung eines energieautarken Türschildes mit E-Paper-Display und NFC-Konfigurationsschnittstelle

Andreas Angermayr, Elke Mackensen

***Zusammenfassung*—Elektronische Türschilder zur Darstellung von Informationen sind insbesondere in öffentlichen Gebäuden zwischenzeitlich weit verbreitet. Die Varianz dieser elektronischen Türschilder reicht vom Tablet-basierten Türschild bis hin zum PC-basierten Türschild mit externem Bildschirm. Zumeist werden die Systeme mit 230 V betrieben. Bei einer großen Summe von Türschildern in öffentlichen Gebäuden kann dies zu einem signifikanten Umsatz an Energie führen. Im Rahmen dieses Papers wird die Entwicklung eines energieautarken arbeitenden Türschildes vorgestellt, bei dem ein E-Paper-Display zum Einsatz kommt. Das Türschild lässt sich per Smartphone-App und NFC-Schnittstelle konfigurieren. Es wird insbesondere auf das Low-Power-Hardware-Design der Elektronik und energetische Aspekte eingegangen.**

***Schlüsselwörter*—E-Paper, E-Ink, Low-Power, Digitale Türschilder, NFC.**

I. Einleitung

In öffentlichen Gebäuden wie an Hochschulen, Ämtern oder beispielsweise Museen, aber auch in Firmen- und Bürogebäuden, setzen sich zunehmend elektronische Türschilder zur Informationsdarstellung durch. Weiterhin setzen sich auch in Einkaufsläden elektronische Displays zur Anzeige von Preisinformationen durch. Die Vorteile elektronischer Türschilder bzw. Displays liegen auf der Hand:

- Man kann elektronische Türschilder dynamisch und flexibel beschriften, d.h. gegenüber papierbasierten Türschildern können Daten der Türschilder schnell ausgetauscht werden.
- Informationen auf den Türschildern können stets auf dem neuesten Stand gehalten werden.
- Es ist möglich, elektronische Türschilder mit anderen elektronischen Systemen, wie z.B. Kalendersysteme, zu verknüpfen, um aktuelle Informationen automatisiert darzustellen.
- Der Zeitaufwand für die Aktualisierung eines elektronischen Türschildes ist wesentlich geringer, als die Wartung von Papiertürschildern. Insbesondere in großen Gebäuden kann der Zeitaufwand für die Aktualisierung von Papiertürschildern sehr hoch sein.

Andreas Angermayr, andreas.angermayr@hs-offenburg.de, Elke Mackensen, elke.mackensen@hs-offenburg.de, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien Offenburg, Badstraße 24, 77652 Offenburg

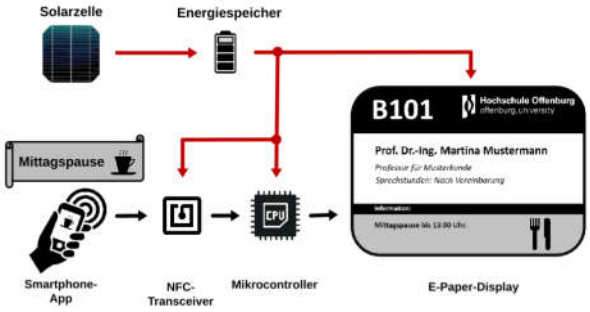

Abbildung 1. Grundsätzliche Idee für die Entwicklung eines energieautarken Türschildes.

Die Varianz elektronischer Türschilder reicht vom Tablet-basierten Türschild bis hin zum PC-basierten Türschild mit externem Bildschirm. Eine Konfiguration der Türschilder ist oftmals über WLAN oder Ethernet möglich. Zumeist werden derartige Systeme mit 230 V oder Batterien betrieben. Bei einer großen Summe von Türschildern in öffentlichen Gebäuden kann dies zu einem signifikanten Umsatz an Energie führen. Erfahrungen aus dem Betrieb elektronischer Türschilder an der Hochschule Offenburg zeigen einen weiteren Nachteil PC- oder Tablet-basierter elektronischer Türschilder auf: Derartige Türschilder werden oftmals mit Windows-Betriebssystem betrieben, sodass leider häufig Ausfälle zu verzeichnen sind.

Im Rahmen dieses Papers wird auf Grund der aufgezeigten Nachteile auf die Entwicklung eines energieautark arbeitenden digitalen Türschildes und die Implementierung eines Funktionsmusters eingegangen. Die erste Idee für Entwicklung des energieautarken Türschildes ist in Abbildung 1 dargestellt, was zu den folgenden Anforderungen an die Entwicklung führt:

- Die notwendige Energie für den laufenden Betrieb des Türschildes soll per Energy-Harvesting, in diesem Fall Solarzellen, aus der Umgebung gewonnen werden. Trotz Energy-Harvesting sollen möglichst viele Informationsupdates pro Tag (im Folgenden *Updates*) auf dem Display möglich sein, was zu der Forderung nach einem möglichst energiesparendem Elektronikdesign führt.
- Als vielversprechende Display-Technologie soll ein E-Paper-Display eingesetzt werden [1] - [5].

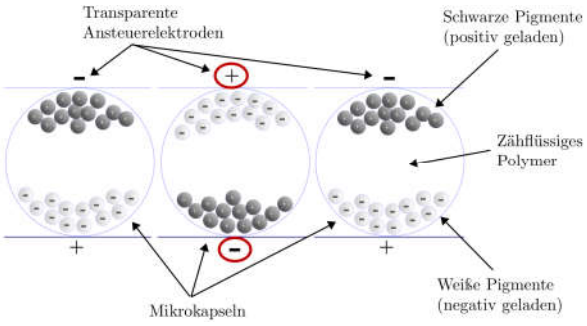

Abbildung 2. Querschnitt durch ein EPD-Panel (angelehnt an [6]).

Diese benötigen im Gegensatz zu LCD- oder OLED-Displays im statischen Betrieb keinerlei Energie.

- Die Entwicklung des Gesamtsystems soll auf einem Mikrocontroller ohne Betriebssystem basieren.
- Die Konfiguration des Türschildes (Angezeigter Text, Grafiken usw.) soll per Smartphone-App möglich sein. Als physische Schicht der Benutzerschnittstelle soll NFC (Near Field Communication) verwendet werden.

Im Folgenden wird zunächst in Abschnitt II auf den Stand der Technik der E-Paper-Displaytechnologie und kommerziell erhältlicher elektronischer Türschilder eingegangen. In Abschnitt III wird das detaillierte Hardware-Systemkonzept des energieautarken Türschildes vorgestellt und die Auswahl der Komponenten erläutert. Abschnitt IV stellt die Implementierung eines Funktionsmusters vor. In Abschnitt V werden detaillierte Messergebnisse des Gesamtsystems diskutiert und Optimierungspotenziale aufgezeigt. Abschließend wird in Abschnitt VI aufgrund der bisherigen Ergebnisse ein Fazit für die weitere Entwicklung des energieautarken Türschildes gezogen.

II. E-Paper-Displaytechnologie und Marktübersicht vergleichbarer Türschilder

Wie in der Einleitung erläutert, sind E-Paper-Displays ein vielversprechender Ansatz für die Realisierung eines energieautarken digitalen Türschildes, weshalb im Folgenden zunächst die E-Paper-Technologie etwas näher betrachtet wird und dann eine kurze Marktübersicht zu kommerziell erhältlichen E-Paper-Türschildern gegeben wird.

A. *E-Paper-Displaytechnologie*

E-Paper-Displays (EPDs) sind Displays, deren Betrachtungseindruck jenem von bedrucktem Papier nachempfunden ist und die im statischen Betrieb keine Leistung benötigen. Die Anwendungsbereiche sind vielseitig und reichen mittlerweile von E-Book-Readern bis zu Benzinpreisanzeigen an Tankstellen.

EPDs basieren auf dem Effekt der Elektrophorese [5, 6]. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt durch ein EPD-Panel. Dieses besteht aus transparenten Mikrokapseln, die ein zähflüssiges Polymer, sowie schwarze und weiße Pigmente enthalten, die entgegengesetzt geladen sind. Auf und unter dem Panel befindet sich eine Matrix aus transparenten Ansteuerelektroden, deren Anordnung letztlich die Bildpunkte definiert. Die Diffusion der Pigmente ist durch das Polymer stark eingeschränkt, sodass ein EPD ein Bild über Wochen und Monate hält.

Durch Anlegen eines E-Feldes über den entsprechenden Bildpunkten lässt sich das Bild verändern, indem die Pigmente je nach Richtung des Feldes nach oben oder nach unten wandern. Dieser Vorgang wird als Refresh bezeichnet.

Das E-Feld muss dabei im Zeitverlauf besonderen Anforderungen genügen, die den aktuellen Zustand des Pixels, den Zustand benachbarter Pixel, die Temperatur und weitere Parameter berücksichtigen, sodass aufwändige Wellenformen zur Ansteuerung der Pixel berechnet werden müssen, wofür ein EPD-(Timing)-Controller benötigt wird [6]. Moderne EPD-Controller sind so in der Lage, nur einen bestimmten Anteil der Pigmente zu bewegen, wodurch die Darstellung von Graustufen ermöglicht wird.

Das komplette Weiß- bzw. Schwarz-Überschreiben ist hingegen unkritisch, hierzu muss lediglich ein genügend starkes Feld ausreichend lange angelegt werden. Die Leistungsaufnahme des Panels beim Refresh ist dadurch begründet, dass die Partikel gegen den Strömungswiderstand des Polymers durch die Kapseln bewegt werden müssen, d.h. mit steigender Panelgröße steigt auch die Leistungsaufnahme beim Refresh.

B. *Marktübersicht vergleichbarer Türschilder*

In Tabelle I sind einige derzeit erhältliche E-Paper-Türschilder einander vergleichend gegenübergestellt. Es wird klar, dass zwar kommerzielle Lösungen mit E-Paper-Display existieren, jedoch keine die energieautark arbeiten, d.h. mittels Energy-Harvesting betrieben werden. Stattdessen werden die Türschilder aus einer Batterie versorgt, was zu Ausfällen führen kann und den Wartungsaufwand erhöht.

Weiterhin gibt es derzeit noch keine Produkte, die über eine NFC-Schnittstelle verfügen. Die Konfiguration über WLAN erfordert ein Anmelden im WLAN-Netzwerk, die Konfiguration über ein USB-Kabel ist denkbar unkomfortabel. Eine NFC-Schnittstelle in Verbindung mit einer Smartphone-App verspricht hingegen eine schnelle und unkomplizierte Konfigurationsmöglichkeit.

III. Hardware-Systemkonzept und Auswahl der Komponenten

Im Folgenden wird das detaillierte Hardware-Systemkonzept des energieautarken Türschildes vorgestellt und die Auswahl der Komponenten erläutert.

Tabelle I
ÜBERSICHT EINIGER KOMMERZIELL ERHÄLTLICHER E-PAPER-TÜRSCHILDER.

Hersteller / Produkt	Energiequelle	Energieautark	Benutzer-Schnittstelle	Displaytechnologie	Preis in €
go2 / Türschild e-Ink [7]	Batterie	nein	USB	EPD	295
m.i.b. / door_ink [8]	Batterie	nein	"Funk"(W-Lan?)	EPD	?
e-shelf-labels / ROOMZ [9]	Batterie	nein	W-Lan	EPD	?

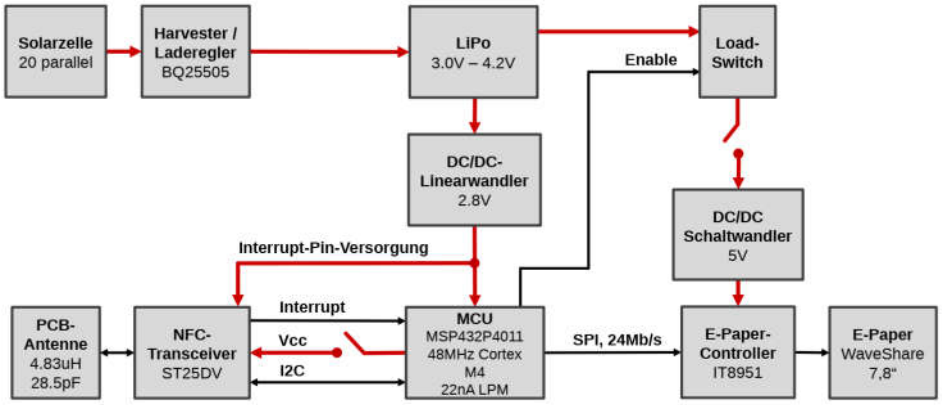

Abbildung 3. Hardware-Systemkonzept des energieautarken Türschildes.

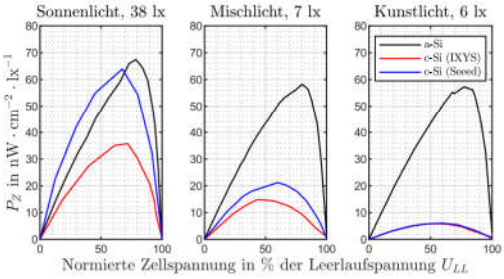

Abbildung 4. Vergleichsmessung von amorphen und kristallinen Siliziumzellen unter schwacher Sonnen-, Misch- und Kunstlicht Beleuchtung.

Hierzu sind in Abbildung Abbildung 3 die Systemkomponenten und deren Verschaltung dargestellt.

A. Solarzellen

Für das Energy-Harvesting kommen amorphe Silizium-Solarzellen vom Typ Amorton AM-1454 von Panasonic [10] zum Einsatz. Die Verwendung amorpher Zellen wurde durch eine durchgeführte Messreihe begründet, in der die $P(U)$-Kurve verschiedener Zellen unter sehr schwacher Kunstlicht-, Mischlicht- und Sonnen-Beleuchtung zwischen $6\,\mathrm{lx}$ und $38\,\mathrm{lx}$ aufgenommen wurde. Das Ergebnis ist in Abbildung 4 dargestellt und zeigt, dass die amorphe Panasonic-Zelle (a-Si) den kristallinen Zellen (c-Si) unter den zu erwarteten Beleuchtungsbedingungen (dunkle Gänge und Korridore, wenig Sonnenlicht) klar überlegen ist.

B. Spannungsversorgung

Die von den Solarzellen bereitgestellte Energie wird von einem `BQ25505` Energy-Harvesting-IC von Texas Instruments [11] in einen LiPo-Akku zwischengespeichert. Der IC benötigt zum Starten lediglich $15\,\mu\mathrm{W}$ Leistung an einer Spannung von mindestens $600\,\mathrm{mV}$ und hat einen Ruhestrom von nur $400\,\mathrm{nA}$. Da die maximale Eingangsspannung bei $5,1\,\mathrm{V}$ liegt, sind Solarzellen mit ausreichend kleiner Leerlaufspannung notwendig.

Ein LiPo-Akku ist anderen Energiespeichern wie beispielsweise Supercaps vorziehen, da die Selbstentladung geringer ist, weiter sind Akkus kleiner Kapazität vorzuziehen, da der Selbstentladestrom bei gleicher Selbstentladerate kleiner ist.

Zur Versorgung des Mikrocontrollers ist ein $2,8\,\mathrm{V}$-Linearwandler verbaut, der E-Paper-Controller wird durch einen abschaltbaren Buck-Boost-Schaltwandler versorgt, der NFC-Transceiver wird direkt aus einem Mikrocontroller-Pin versorgt.

C. NFC-Transceiver

Als NFC-Transceiver-IC kommt ein `ST25DV` von ST Microelectronics [12] zum Einsatz. Dieser verfügt über eine $\mathrm{I^2C}$-Schnittstelle und eine Mailbox zum einfachen Nachrichtenumsatz von der NFC- auf die $\mathrm{I^2C}$-Schnittstelle und umgekehrt. Weiterhin kann bei Events in der Mailbox oder der NFC-Schnittstelle ein Interrupt ausgegeben werden. Da sich der NFC-Transceiver-Teil des ICs standardkonform aus dem NFC-Feld versorgt, wird der Interrupt auch bei Trennung des ICs von der Spannungsversorgung ausgegeben. Weiterhin sorgen umfangreiche Dokumentation, Software-Development-Kits (SDKs) für Android und C-Anwendungen und Tools für das Antennendesign für kurze Entwicklungszeiten.

Abbildung 5. Display vor und nach Update ohne Weiß-Überschreibung nach Neustart des Controllers.

D. Display

Aktuell sind große EPDs in kleiner Stückzahl schwer beschaffbar. Ein Anbieter ist WaveShare, der zu den Displays passende EPD-Controller sowie Beispielcode mitliefert, was sich positiv auf die Entwicklungszeit auswirkt, sodass hier das Display `7,8inch e-Paper HAT` [13] verwendet wird. Dieses hat eine Größe von etwa $174\,\mathrm{mm} \times 128\,\mathrm{mm}$ bei einer sehr guten Auflösung von $1872\,\mathrm{px} \times 1404\,\mathrm{px}$ und bis zu 16 Graustufen.

Nachteilig ist hierbei, dass der angebotene Controller eine Standby-Leistungsaufnahme von $300\,\mathrm{mA}$ hat, sodass ein Abschalten über einen Load-Switch zwingend erforderlich ist. Da der Controller zur Berechnung der Ansteuer-Wellenformen das aktuelle Bild im flüchtigen Speicher halten muss, der beim Abschalten korrumpiert wird, ist nach jedem Einschalten des Controllers ein Weiß- oder Schwarz-Überschreiben des kompletten Displays nötig, andernfalls kommt es beim Refresh zu fehlerhaften Bildern, wie in Abbildung 5 gezeigt.

E. Mikrocontroller

Der verwendete Mikrocontroller sollte über einen möglichst sparsamen Tiefschlafmodus verfügen, weiterhin muss ausreichend Programmspeicher vorhanden sein, da die auf dem Display darzustellenden Schriften und Bilder als Bitmap-Arrays gespeichert werden müssen. Es wird daher ein `MSP432P4011`-Mikrocontroller von Texas Instruments [14] verwendet. Dieser verfügt über einen $22\,\mathrm{nA}$ Tiefschlafmodus, $2\,\mathrm{MB}$ Flash Speicher und eine maximale Taktrate von $48\,\mathrm{MHz}$.

F. Energiemanagement und Benutzerinteraktion

Im Ruhezustand sind die Spannungsversorgungen für den EPD-Controller und den NFC-Transceiver abgeschaltet, lediglich dessen Interrupt-Pin und der Mikrocontroller werden versorgt.

Möchte der Benutzer ein Update vornehmen, wählt er z.B eine passende Abwesendheitsnachricht in der App aus und hält das Smartphone zur Übertragung an das Türschild. Der NFC-Transceiver löst einen Interrupt aus, der den Mikrocontroller aufweckt. Dieser schaltet anschließend die Versorgung des NFC-Transceivers ein, um die eintreffenden Nachrichten

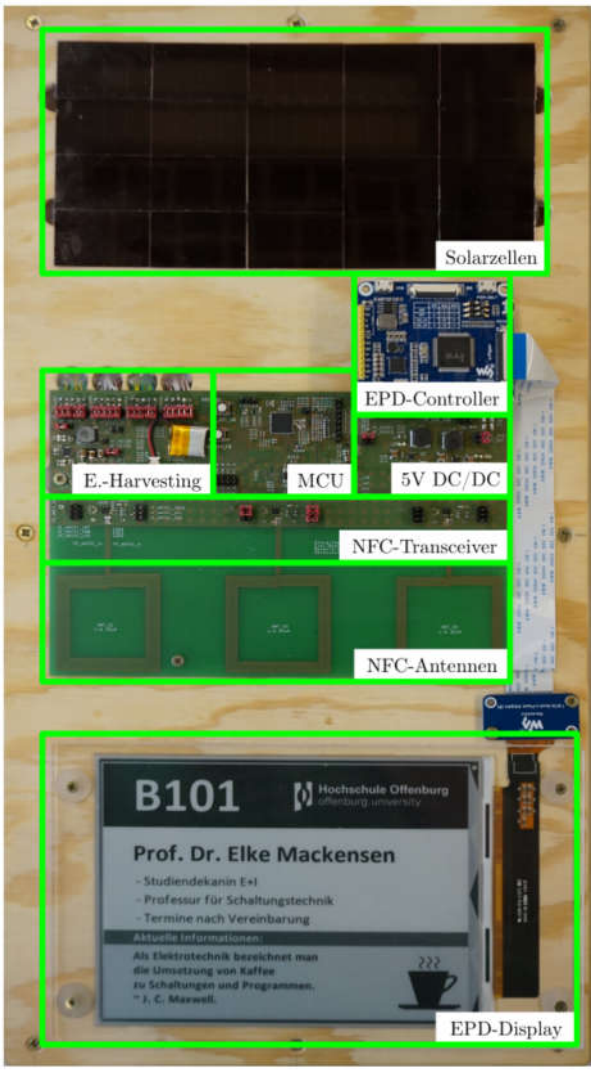

Abbildung 6. Implementiertes Funktionsmuster des energieautarken Türschildes.

über die I^2C-Schnittstelle aus dessen Mailbox zu lesen.

Anschließend wird die Versorgung des Transceivers wieder abgeschaltet und die Versorgung des EPD-Controllers eingeschaltet, um das Display in einem ersten Refresh zunächst weiß zu überschreiben. Hierzu muss ein vollständiges Weiß-Bild über die SPI-Schnittstelle übertragen werden. Anschließend wird das neue Bild zum EPD-Controller übertragen und nach einem erneuten Refresh dargestellt. Danach wird die Versorgung des EPD-Controllers abgeschaltet und der Mikrocontroller legt sich wieder schlafen.

IV. Implementierung des Gesamtsystems

A. Hardware-Implementierung

Abbildung 6 zeigt die Implementierung des im vorherigen Abschnitt erläuterten Hardware-Systemkonzeptes als Funktionsmuster. Dieses soll im Folgenden vorgestellt werden.

Oben in Abbildung 6 sind die Solarzellen zu sehen. Um die Funktion des Türschildes auch bei sehr schlechter Beleuchtung von wenigen Lux sicherstellen zu können, wurden 20 Zellen mit einer Gesamtfläche von $218,5\,\mathrm{cm}^2$ verbaut. Die Zellen wurden ohne Blocking-Dioden parallel verschaltet, da davon auszugehen ist, dass alle Zellen ähnlich bestrahlt werden. Eine Reihenschaltung ist aufgrund des Eingangsspannungsbereiches des Harvester-ICs nicht möglich.

Auf der mittig im Bild zu sehenden Leiterkarte befindet sich oben links der Energy-Harvesting-Teil mit dem $70\,\mathrm{mA}$-LiPo Akku, der genug Energie für etwa 200 Updates vorhalten kann. Bei 1% Selbstentladerate beträgt der Selbstentladestrom etwa $1,91\,\mu\mathrm{A}$, d.h. auch unter schlechtester Beleuchtung muss dieser Strom mindestens durch den Harvester-IC nachgeliefert werden.

Im rechten oberen Teil der Leiterplatte sind das mittels Buchsenleiste aufgesteckte EPD-Controller-Board, sowie der 5V-Buck-Boost-Wandler zur Versorgung des EPD-Controllers zu sehen. Der Buck-Boost-Wandler benötigt eingangsseitig mindestens $100\,\mu\mathrm{F}$ Kapazität, andernfalls kann es aufgrund der relativ hohen Ausgangsimpedanz des Harvester-ICs von etwa $1,5\,\Omega$ während eines Refreshs zu Spannungseinbrüchen kommen, was zu einem Reset des EPD-Controllers führt.

Mittig und unten auf der Leiterplatte befindet sich der NFC-Transceiver-Teil in dreifacher Ausführung. Zur Auslegung der Antennen wurde das *eDesign-Antenna*-Tool von ST [15] verwendet. Ziel war es, dass die Induktivität mit der internen Abstimm-Kapazität des NFC-Transceiver-ICs einen Schwingkreis mit Resonanzfrequenz $f_r = 13,56\,\mathrm{MHz}$ bildet, sodass kein Abgleich nötig und die Induktivität möglichst groß ist. Dabei wurden drei Antennen entworfen, deren Induktivität um -10%, 0% und $+10\%$ um den errechneten optimalen Wert schwankt. Über Jumper ist auswählbar, welcher NFC-Transceiver mit dem Mikrocontroller verbunden wird.

Hierbei zeigte sich, dass alle drei Antennen in Bezug auf die Vergbindungsqualität augenscheinlich gleich performant sind. Weiterhin passen die realisierten Induktivitätswerte gut mit den vom *eDesign-Antenna*-Tool errechneten Werten zusammen.

Im unteren Bildbereich ist schließlich das $7,8''$-EPD mit einer beispielhaften Nachricht im Informations-Bereich ganz unten auf dem Display zu sehen.

B. Software-Implementierung

Die Firmware des Systems arbeitet interruptgetrieben ohne Betriebssystem. Der `MSP432P4011`-Mikrocontroller lässt sich aus dem energiesparendsten Tiefschlafmodus nicht direkt aufwecken, sondern muss nach einem Interrupt einen Reset durchführen und sich danach neu initialisieren.

Zur Abwicklung der NFC-Kommunikation wurde ein einfaches Nachrichtenprotokoll entwickelt. Dieses

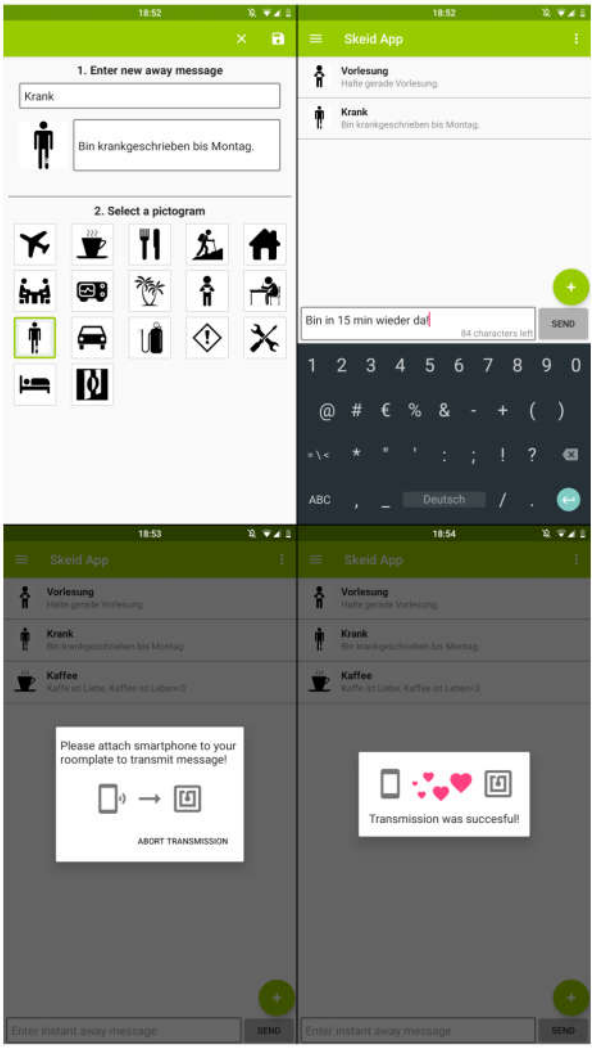

Abbildung 7. Fenster der App zum Anlegen (oben links) und Auswählen (oben rechts) von Abwesendheitsnachrichten, sowie Sendedialoge (unten) .

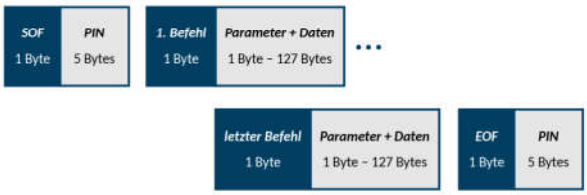

Abbildung 8. Rahmenformate und zeitlicher Ablauf des Kommunikationsprotokolls.

definiert die in Abbildung Abbildung 8 gezeigten Frames mit einem Befehls- bzw. Steuer-Byte und bis zu 127 Byte Payload. Zusätzlich gibt es SOF (*Start-Of-Frame*) und EOF-Rahmen (*End-Of-Frame*), die als Payload eine Pin zur Nutzerauthentifizierung enthalten und zur Flusskontrolle dienen.

Abbildung 7 zeigt die implementierte Android-App, in der sich Nachrichten anlegen, speichern und versenden lassen, sowie die zugehörigen Benutzer-Dialoge zum Verbindungsauf- bzw. -abbau mit dem Türschild.

Abbildung 9. Zeitliches Systemverhalten während eines Türschild-Updates.

Firmware und App verwenden jeweils die SDKs, die von ST Microelectronics für den ST25DV-NFC-Transceiver-IC bereitgestellt werden, sodass sich die Entwicklung um die NFC-Schnittstelle als überraschend einfach erwies.

V. Messergebnisse

Zur Analyse und Bewertung des Systemkonzeptes bzw. der Implementierung wurden verschiedene Messungen am Funktionsmuster durchgeführt, die hier erläutert werden.

A. Zeitliches Verhalten während eines Displayupdates

Zunächst wurde das zeitliche Systemverhalten analysiert. Hierzu wurden an zwei freien Pins Signale ausgegeben und oszillographiert, welche anzeigen, ob der Mikrocontroller wach ist (grünes AWAKE-Signal) oder sich in der Initialisierungsphase befindet (blaues INIT-Signal). Zusätzlich wurden der NFC-Interrupt-Pin (gelbes INT-Signal) und der Enable-Pin des Display-Load-Switches (rotes EN_EPD-Signal) aufgezeichnet. Abbildung 9 zeigt die Ergebnisse.

Das Update dauert relativ lange, obwohl die Benutzerinteraktion nach weniger als 2 s abgeschlossen ist, wie am gelben INT-Signal zu sehen ist. Die Initialisierungszeit des Mikrocontrollers ist zu vernachlässigen, aber wie am roten EN_EPD-Signal zu sehen ist, dauern die Übertragung des Weiß-Bildes und die anschließende Übertragung des darzustellenden Bildes mit etwa 10 s sehr lange, was an der unzureichenden Auslastung des 24 Mbps-SPI-Busses durch den mit nur 48 MHz getakteten Mikrocontroller liegt. Hier wäre ein schnellerer Controller wünschenswert.

B. Verfügbare Leistung durch das Energy-Harvesting

Mit dem in Abbildung 10 gezeigten Aufbau wurde die vom Harvester bereitgestellte Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke gemessen. Hierzu wurde das Funktionsmuster an verschiedenen Orten aufgestellt, und die Beleuchtung der Solarzellen, sowie die Eingangs- und Ausgangsleistung des Harvester-ICs

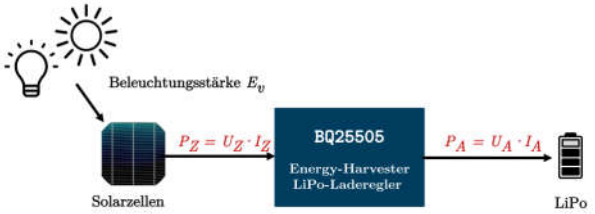

Abbildung 10. Schematischer Messaufbau zur Bestimmung der verfügbaren Leistung.

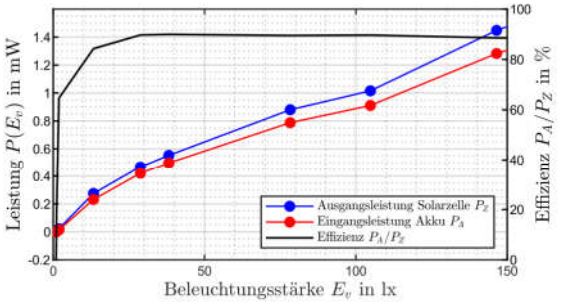

Abbildung 11. Verfügbare Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke.

gemessen und daraus die Wandlungseffizienz berechnet. Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse. Es zeigt sich, dass auch bei sehr schlechter Beleuchtung unter 10 lx nennenswert Leistung bereitgestellt wird, und dass die Effizienz bereits relativ hoch ist.

C. Leistungsaufnahme und Energieumsatz des Türschildes

Zur Bestimmung des Energieumsatzes des Systems wurde eine *Source-Measure-Unit* (SMU) verwendet, aus der das System bzw. bestimmte Komponenten versorgt wurden und welche die Momentanleistung periodisch aufzeichnete.

1) Energieumsatz während Update: Zunächst wurde der Energieumsatz des Funktionsmusters während eines Updates gemessen. Hierzu wurde die SMU anstelle des LiPo-Akkus geklemmt und die Solarzellen abgeklemmt. Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse. Bei $t = 0{,}5\,\mathrm{s}$ wacht der Mikrocontroller auf, die NFC-Kommunikation wird abgewickelt. Es folgt bei $t = 1\,\mathrm{s}$ das Einschalten des EPD-Controllers und die Übertragung des weißen Bildes in den EPD-Controller. Bei $t = 5\,\mathrm{s}$ wird das Display auf weiß refresht, anschließend wird das darzustellende Bild in den EPD-Controller geschrieben, der abschließende Refresh folgt bei $t = 11\,\mathrm{s}$. Die Refreshs sind an den hohen Leistungsspitzen zu erkennen.

Während der SPI-Kommunikation benötigt der EPD-Controller fast durchgehend über 300 mW Leistung, entsprechend steigt der Energieumsatz über der Zeit fast linear bis $4{,}5\,\mathrm{Ws}$ an. Das System ist wach bis $t = 15\,\mathrm{s}$ und es zeigt sich, dass die Leistungsaufnah-

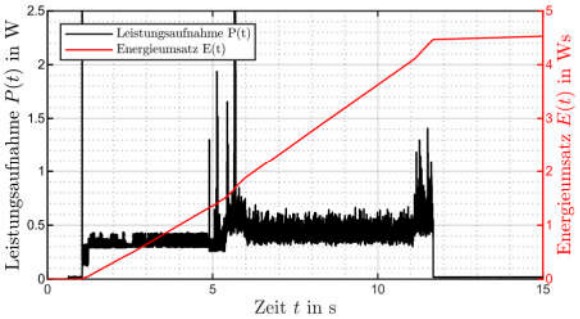

Abbildung 12. Energieumsatz des Türschildes während Displayupdate.

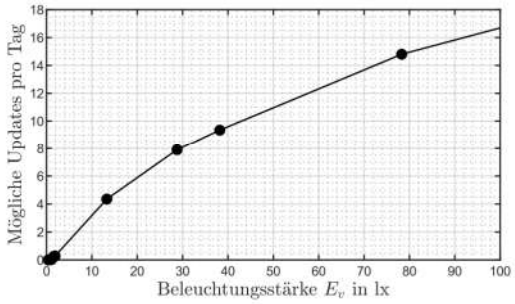

Abbildung 13. Anzahl möglicher Updates pro Tag in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke.

me des Displaycontrollers um Größenordnungen über jener der übrigen Systemkomponenten liegt.

Der verwendete EPD-Controller bietet damit erhebliches Einsparpotenzial, sodass es wünschenswert wäre, einen für Low-Power-Designs passenderen Controller-IC, wie beispielsweise den `S1D13521B01` von Epson [16] zu verwenden. Da diese ICs aber häufig extern mit einem EPD-Power-Management-IC und einem Flash-Speicher beschaltet werden müssen, die beim verwendeten Controller-Board bereits vorhanden sind, könnte sich dies nachteilig auf die Entwicklungszeiten auswirken.

2) Leistungsaufnahme im Schlafzustand: Mit dem vorherigen Messaufbau wurde die Leistungsaufnahme des Türschildes im Schlafzustand bestimmt. Damit ergab sich eine Leistungsaufnahme von etwa $1,5\,\mu\mathrm{W}$, d.h. bei $2,8\,\mathrm{V}$ eine Stromaufnahme von lediglich etwa $535\,\mathrm{nA}$.

D. Anzahl der möglichen Updates pro Tag

Aus dem Energieumsatz pro Update und der verfügbaren Leistung in Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke wurde die Anzahl der pro Tag möglichen Updates berechnet. Das Ergebnis ist in Abbildung 13 zu sehen. Es zeigt sich, dass bei einer schlechten Beleuchtung von nur $10\,\mathrm{lx}$ im Mittel bereits drei Updates pro Tag ermöglicht werden.

Damit zeigt sich auch, dass die relativ große Solarzellenfläche durchaus notwendig ist, denn Messungen zeigten, dass beispielsweise die Beleuchtungsstärken vor den Räumen in der Hochschule Offenburg selten über $20\,\mathrm{lx}$ liegen.

E. Ressourcenverbrauch der Firmware

Wie oben angedeutet, sind Schriftarten und Bilder softwareseitig im Programmspeicher als Bitmap-Arrays hinterlegt. In Abbildung 14 ist die Belegung des Programmspeichers dargestellt. Die momentan 19 verfügbaren Piktogramme ($320\,\mathrm{px} \times 320\,\mathrm{px}$ Auflösung, $4\,\mathrm{b}$ Graustufen) belegen mit $973\,\mathrm{kB}$ knapp die Hälfte des Speichers, weitere $577\,\mathrm{kB}$ kommen durch 3 Schriftarten ($133\,\mathrm{px}$, $64\,\mathrm{px}$ und $36\,\mathrm{px}$ hoch) hinzu.

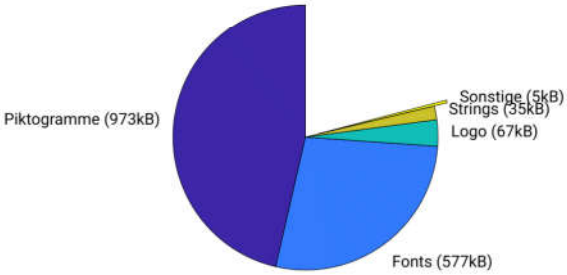

Abbildung 14. Aufteilung der Flashpeicherbelegung durch die Firmware.

Aufgrund der hohen Displayauflösung war es möglich, jede Schriftart ohne merkbare Unschärfe zur Anzeige auf dem Display um den Faktor 2 zu strecken, womit auf größere Schriftarten verzichtet werden konnte. Eine Komprimierung der Bitmaps z.B. durch eine Entropiekodierung würde den Speicherbedarf vermutlich wesentlich reduzieren, bei gleichem Speicher könnten mehr Bilder oder Schriftarten bereitgestellt werden.

VI. Zusammenfassung und Fazit

In dieser Arbeit wurden die Entwicklung und Implementierung eines energieautarken elektronischen Türschildes mit E-Paper-Display und NFC-Konfigurationsschnittstelle vorgestellt, auf dem per Smartphone-App komfortabel Abwesenheitsnachrichten hinterlassen werden können.

Die NFC-Schnittstelle als wesentliche Neuerung zu bestehenden Lösungen erwies sich in der Handhabung mit dem Türschild als intuitiv und komfortabel.

Das System wird aus amorphen Silizium-Solarzellen versorgt und verfügt über einen LiPo-Akku als Energiespeicher. Durch sorgfältiges hard- und softwareseitiges Low-Power-Design beträgt die Leistungsaufnahme im Ruhemodus lediglich $1,5\,\mu\mathrm{W}$. Bedingt durch den anwenderfreundlichen, jedoch für Low-Power-Designs ungeeigneten EPD-Controller, verursacht ein Update

einen Energieumsatz von $4,5\,\mathrm{Ws}$. Trotzdem zeigt sich, dass das System bei einer Zellfläche von knapp $220\,\mathrm{cm}^2$ bei Beleuchtungsstärken von $10\,\mathrm{lx}$ bereits drei Updates pro Tag bereitstellen kann.

Es konnte damit gezeigt werden, dass die Verwendung eines E-Paper-Displays und konsequentes Low-Power-Design, insbesondere im Vergleich zu PC- bzw. LC-Display-basierten Lösungen, enormes Energiesparpotenzial bietet. Die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse lassen sich ohne weiteres auf nicht-energieautarke Systeme erweitern, z.B. bei einer Versorgung aus Batterien oder Power-over-Ethernet (PoE), wo ein möglichst geringer Energieverbrauch ebenso wünschenswert ist.

Andreas Angermayr studierte Elektro- und Informationstechnik mit Schwerpunkt Kommunikationstechnik an der Hochschule Offenburg. Durch zahlreiche private und hochschulinterne Projekte konnte er sich umfangreiches Know-How im Bereich der Hardware-, Software- und System-Entwicklung, Software-Defined-Radio, sowie in der Elektronikfertigung aneignen. Besonders spannend findet er es, die Brücke zwischen Ultra-Low-Power und kurzzeitiger Performanz zu finden. Andreas Angermayr begann 2020 sein Elektrotechnik-Masterstudium und arbeitete seither auch als Akademischer Mitarbeiter im Schaltungstechniklabor. Leider konnte er seine Tätigkeiten an der Hochschule Offenburg nicht weiterführen, da er am 25.9.2021 bei einem tragischen Unfall in den Bergen ums Leben gekommen ist. Die Hochschule Offenburg hat mit ihm einen sehr engagierten, höflichen, verlässlichen, kompetenten, wissbegierigen und äußerst liebenswerten Mitarbeiter verloren.

Literaturverzeichnis

[1] J. Heikenfeld: *The electronic Display of the Future.* In IEEE Spectrum, 26.02.2010. URL: https://spectrum.ieee.org/computing/hardware/the-electronic-display-of-the-future - Eingesehen: 22.04.2020.

[2] A. Hellwig: *Warum sich der Einsatz eines E-Ink-Displays lohnen kann.* In Elektronik Praxis Nr. 8, 21.04.2016, S. 88–90.

[3] G. Schryen, J. Karla: *Elektronisches Papier Displaytechnologie mit weitem Anwendungsspektrum.* In Wirtschaftsinformatik 44/6, 2002, S. 567–574.

[4] M. R. Fernández, E. Z. Casanova, I. G. Alonso: *Review of Display Technologies Focusing on Power Consumption.* In Sustainability, 7, 2015, S. 10854–10875, DOI: 10.3390/su70810854.

[5] J. Heikenfeld, P. Drzaic, J.-S. Yeo, T. Koch: *Review Paper: A critical review of the present and future prospects for electronic paper.* In Journal of the SID 19/2, 2011, S. 129–156, DOI: 10.1889/JSID19.2.129.

[6] P. F. Bai, R.A. Hayes, M. Jin, L. Shui, Z. C. Yi, L. Wang, X. Zhang, G. Zhou: *Review of Paper-Like Display Technologies (Invited Review).* In Progress In Electromagnetic Research 147, 2014, S. 95–116. DOI: 10.2528/PIER13120405.

[7] Bohmeyer & Schuster - Schilder-Verand.com: *go2 Türschild e-Ink.* URL: https://www.schilder-versand.com/p/go2-tuerschild-e-ink-22011 - Eingesehen: 22.04.2020.

[8] m.i.b. Terminal: *door_ink* URL: https://www.mib-terminal.de/produkte/tuerschildtechnik/funk-tuerschilder-door-ink - Eingesehen: 22.04.2020.

[9] e-shelf-labels: *ROOMZ* URL: https://www.e-shelf-labels.com/products/digital-room-signage/roomz.html - Eingesehen: 22.04.2020.

[10] Panasonic Industry: *Amorphous Silicon Solar Cells, Amorphous Photosensors*, April 2020.

[11] Texas Instruments: *BQ25505 - Ultra low-power boost charger with battery management and autonomous power multiplexer for primary battery in energy harvester applications*, Rev. E, März 2019.

[12] ST Microelectronics: *Dynamic NFC/RFID tag IC with 4-Kbit, 16-Kbit or 64-Kbit EEPROM, and fast transfer mode capability*, Rev. 7, 2018.

[13] Waveshare Wiki: *7.8inch e-Paper HAT.* URL: https://www.waveshare.com/wiki/7.8inch_e-Paper_HAT - Eingesehen: 22.04.2020.

[14] Texas Instruments: *MSP432P411x, MSP432P401x SimpleLink Mixed-Signal Microcontrollers*, Juni 2019.

[15] ST Microelectronics: *eDesign Antenna.* URL: https://eds.st.com/antenna/#/ - Eingesehen 22.04.2020.

[16] Seiko Epson Corporation: *S1D13521B01 Epson / E Ink Broadsheet Hardware Functional Specification*, Rev. 1.2, 2008.

Elke Mackensen studierte Nachrichtentechnik an der Fachhochschule Offenburg. Nach dem Diplomabschluss in 1993 und einer dreijähriger Industrietätigkeit begann sie 1996 ihre wissenschaftliche Laufbahn an der Universität in Freiburg. Zunächst am Institut für Informatik wo sie eine ASIC-Design- Labor aufbaute, danach am Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK), wo sie 2006 über autarke drahtlose Mikrosysteme promovierte. Von 2006 bis 2010 leitete sie bei der Firma NewTec die Entwicklungsgruppe Smart Embedded Systems. Seit 2010 ist sie Professorin an der Hochschule in Offenburg. Ihre Professur beschäftigt sich mit der digitalen Schaltungstechnik und dem mikroelektronischen Systementwurf. Forschungsschwerpunkte sind drahtlose und auf Energy-Harvesting-basierte hochminiaturisierte Systeme.