

# Energieautarkes NFC-Messsystem zum Auslesen von LFA-Teststreifen

## Energy self-sufficient NFC measurement system for reading out LFA test strips

B.Sc., Markus Ismer; Dipl.-Ing., Alexander Rolapp; Dipl.-Ing., Björn Bieske

IMMS Institut für Mikroelektronik- und Mechatronik-Systeme gemeinnützige GmbH (IMMS GmbH), 98693 Ilmenau, Deutschland, {markus.ismer, alexander.rolapp, bjoern.bieske}@imms.de

### Kurzfassung

In kleinen, elektronischen, energieautarken Point-of-Care-Tests ist die Energieversorgung eine große Herausforderung. Am Beispiel eines Messsystems für LFA-Teststreifen wird eine mögliche Lösung vorgestellt. Durch den Einsatz von speziellen Schaltkreisen ist es möglich, Energie aus dem elektromagnetischen Feld eines Smartphones, auf der Basis von NFC, zu gewinnen. Es wurden umfangreiche Untersuchungen zu solchen Schaltkreisen mit Energy Harvesting Funktion durchgeführt. Die Ergebnisse ermöglichten den Aufbau eines neuartigen, energieautarken NFC-Messsystems, welches eine teils quantitative Bewertung von LFA-Teststreifen ermöglicht. Der generische Aufbau erlaubt auch den Einsatz für eine Vielzahl weiterer Sensoren.

### Abstract

In small, electronic, energy self-sufficient point-of-care tests, there is a challenge in the energy supply. A possible solution is presented using the example of a measuring system for LFA test strips. By using special integrated circuits, it is possible to extract energy from the electromagnetic field of a smartphone, based on NFC. Extensive research has been conducted on such ICs with energy harvesting functionality. The results enabled the construction of a novel, self-sufficient NFC measurement system which allows a partial quantitative evaluation of LFA test strips. The generic design also enables use for a wide range of other sensors.

## 1 Einleitung

Die Energieversorgung von kleinen, mobilen, energieautarken Geräten stellt oft eine Herausforderung dar. Bei Sensoren und Messsystemen werden daher Entwicklungen mit niedrigem Energiebedarf (*ultra low power*, *ULP*) immer verbreiteter. Doch die klassischen Energiequellen wie Batterien oder Akkumulatoren haben eine begrenzte Einsatzzeit. Sie erfordern in unterschiedlichen Abständen eine Wartung zum Austausch oder Aufladen und können ein Problem bei der Entsorgung darstellen.

Durch die immer weitere Reduzierung des Leistungsbedarfs von ULP-Systemen ist es aber auch möglich geworden, alternative Energiequellen zur Versorgung zu verwenden. Die Umwelt bietet zum Beispiel mit Energie aus Solar, thermischen Quellen, mechanischen Vibrationen oder elektromagnetischen Feldern verschiedene Möglichkeiten, Sensoren energieautark zu betreiben. Diese Energiegewinnung aus der Umgebung (*energy harvesting*, *EH*) findet auch durch das Internet der Dinge (*internet of things*, *IOT*) ständig wachsende Bedeutung [1].

Im Gesundheitswesen, besonders in der patientennahen Labordiagnostik (*Point-of-care testing*, *PoCT*), spielen energieautarke Geräte eine zunehmend größer werdende Rolle [2]. Eines der wichtigsten Hilfsmittel von PoCT ist die *lateral flow assay* (LFA) Methode. LFA-Teststreifen er-

möglichen einen schnellen Nachweis von Substanzen in einer Flüssigkeit [3].

Ursprünglich lieferten die Tests nur eine binäre Aussage (schwanger/nicht schwanger, infiziert/nicht infiziert, etc.). Entwicklungen gehen aber dahin, bei anderen Tests quantitative Aussagen zu erhalten, wie in [4] oder [5] vorgestellt. Es soll damit die genaue Konzentration eines Stoffes ermittelt werden. Dafür ist in der Regel eine elektronische Auswertung erforderlich. Die Notwendigkeit von großen Laborgeräten konnte schon reduziert werden, sodass es mittlerweile auch mobile Auswertegeräte für LFA-Teststreifen gibt [6]. Diese benötigen allerdings eine Batterie, was je nach Anwendungsfall unerwünscht oder mit Aufwand verbunden ist. Abhilfe schafft energieautarke Sensorik mit EH.

Eine der am meisten verwendeten EH-Technologien ist die Nutzung von elektromagnetischen Feldern ([7]), wie beispielsweise bei *radio-frequency identification* (RFID). Hierbei bietet die Nahfeldkommunikation *Near Field Communication*, *NFC* bei 13,56 MHz ein breites Anwendungsfeld. Gegenüber anderen Technologien ist hier die verfügbare Energie am größten [8]. Große Verbreitung findet NFC in Verbindung mit EH in Chipkarten zur Zugangskontrolle oder zum kontaktlosen Bezahlen.

Beim PoCT hingegen wurde in tragbaren Geräten bisher meistens kein EH durch elektromagnetische Felder genutzt

[2]. Bei stationären Geräten könnte aber diese Art von EH einen entscheidenden Energievorteil bringen [7]. In [9] wurde ein Messsystem zur Erfassung von Temperatur und Feuchtigkeit vorgestellt, welches energieautark durch EH mit einem NFC-fähigem Smartphone betrieben werden kann. Eine weitere NFC-Smartphone-Anwendung demonstriert die EH-Verwendung zum Betrieb zweier LEDs zum Auslesen von LFA-Teststreifen [10]. Die verfügbare Leistung durch das EH wurde dabei mit 6–7 mW angegeben.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines NFC-Messsystems zum energieautarken Auslesen von LFA-Teststreifen. Der Fokus liegt dabei auf der Untersuchung der EH-Fähigkeit verschiedener kommerziell verfügbarer NFC-Schaltkreise mit EH-Funktion. Die Untersuchungen bilden die Grundlage für den Entwurf eines Messsystems, welches eine prototypische Sensorik verwendet, um LFA-Teststreifen quantitativ bewerten zu können.

## 2 Energieübertragung mittels NFC

Für ein energieautarkes Messsystem spielt die stabile Energieversorgung eine entscheidende Rolle. Das in dieser Arbeit entwickelte System verwendet EH aus dem elektromagnetischen Feld eines Smartphones mit NFC. Die Energiemenge ist dabei von der Art der Kommunikation abhängig.

### 2.1 NFC-Kommunikation

Hauptsächlich dient NFC zur Gewährleistung eines unkomplizierten und schnellen Datenaustauschs zwischen zwei Geräten. Um das zu erfüllen, gibt es den gemeinnützigen Branchenverband NFC Forum, mit dem Ziel, die Verwendung von NFC voranzutreiben und eine Kompatibilität von Geräten verschiedener Hersteller untereinander sicherzustellen. [11]

Eine Kommunikation findet immer zwischen einem Initiator (*initiator*) und einem Zielgerät (*target*) statt. Das NFC Forum unterscheidet verschiedene Kommunikationsarten. Eine nutzbare Energieübertragung findet im *Reader/Writer mode* statt. Dabei wird der Initiator als Lesegerät (*reader*) und das Zielgerät als NFC-Tag (*tag*) bezeichnet.

Der NFC-Tag besitzt dabei keine eigene Energieversorgung und wird nur durch das EH aus dem Feld des Lesegeräts betrieben. Die Kommunikation wird von einem integrierten Schaltkreis, dem Tag-IC übernommen. Spezielle Tag-ICs bieten die Möglichkeit, einen Teil der gewonnenen Energie für Nachfolgeschaltungen zu Verfügung zu stellen. Diese Funktion wird für das entwickelte Messsystem verwendet.

### 2.2 Messung der EH-Funktion

Das Ziel der Messungen war, die durch EH verfügbare Leistung eines Tag-ICs bei der Verwendung verschiedener Smartphones zu charakterisieren. Diese Leistung ist von mehreren Parametern abhängig, deren Optimierung jeweils einzelne Vorbetrachtungen notwendig machen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden folgende Parameter berücksichtigt:

- Art des Tag-ICs
- Sendeantenne des Smartphones
- Empfangsantenne des NFC-Tags
- Abstand und Ausrichtung der Antennen
- Belastung des EH-Ausgangs

#### 2.2.1 Tag-IC

Mittlerweile bieten mehrere Hersteller Tag-ICs mit EH-Funktion an. In [8] werden entsprechende Schaltkreise aufgelistet. Darüber hinaus gibt es noch eine Vielzahl von weiteren Tag-ICs. Die Schaltkreise haben einige Gemeinsamkeiten. Ein zentrales Element ist nicht flüchtiger Speicher (meist EEPROM), welcher über NFC und einer weiteren seriellen Schnittstelle gelesen und beschrieben werden kann. Ebenso besitzen alle ICs einen Interrupt-Ausgang, welcher in den meisten Fällen konfigurierbar ist. Über diesen ist es möglich, einen Schreibvorgang über NFC zu signalisieren. Für die EH-Messungen wurden Schaltkreise gewählt, welche einen minimalen Funktionsumfang besitzen, um eine höchstmögliche Energie-Effizienz zu gewährleisten. Die untersuchten Tag-ICs sind:

- M24LR04E-RMN6T/2 (alias M24LR) von ST
- ST25DV04K-IER6S3 (alias ST25DV) von ST
- NT3H2111W0FT1X (alias NTAG) von NXP

#### 2.2.2 Sendeantenne Smartphone

Die Form der Sende(TX)-Antenne ist durch das verwendete Smartphone festgelegt. Eine eigene und umfangreiche Untersuchung von Smartphones der Jahre 2017 bis 2019 hat ergeben, dass die Antennenform in vielen Fällen grundsätzlich rechteckförmig ist aber teils kleinere Variationen an den Ecken aufweist. Die Position der Antenne im Smartphone ist für jedes Gerät unterschiedlich. Ebenso streuen die Antennenflächen sehr stark und variieren von  $<1000 \text{ mm}^2$  bis  $>3000 \text{ mm}^2$ . Dabei sind kleinere Antennen meist länglicher.

Bei den TX-Antennen für die spätere Messung musste dann auf Smartphones und Tablets zurückgegriffen werden, welche vorhanden waren (**Tabelle 1**).

Gerät	Release	Antenne		
		Breite [mm]	Höhe [mm]	Fläche [mm <sup>2</sup> ]
ASUS Nexus 7	Jul. 2013	60,9	58,4	3557
LG Nexus 5	Nov. 2013	48,1	62,7	3014
LG Nexus 5X	Okt. 2015	35,1	23,4	820
OnePlus 7T	Okt. 2019	44,4	18,7	828

**Tabelle 1** Für die EH-Messung verwendete NFC-Geräte

#### 2.2.3 Empfangsantenne NFC-Tag

Die Geometrie der Empfangs(RX)-Antenne ist relativ frei wählbar. Aus diesem Grund wurde die Kopplung zweier Rechteckantennen mathematisch beschrieben. Die Antennen wurden dafür als rechteckförmige Leiterschleifen modelliert und anschließend der magnetische Fluss als Maß der Kopplung ermittelt. Eine Betrachtung der Feldverteilung

lung hat gezeigt, dass TX- und RX-Antenne idealerweise die gleiche Geometrie haben sollen, deren Mittelpunkt genau übereinander liegen und deren Abstand zueinander klein ist. Für kleinere RX-Antennen gilt dies genauso. Wird die RX-Antenne hingegen größer, so kann es hilfreich sein, den Abstand zu vergrößern, damit die Kopplung nicht sinkt.

Da die Varianz der TX-Antennen in Smartphones so groß ist und idealerweise RX- und TX-Antenne die gleichen Abmaße haben sollten, wurde sich dafür entschieden, mit drei verschiedenen RX-Antennen zu testen. Weiterhin wurde sich bei der Wahl der Geometrie an den Antennenklassen aus ISO/IEC 14443 orientiert. Für die Messungen konnte sich somit für folgende Antennen geometrien entschieden werden:

- $(40 \times 25) \text{ mm} \rightarrow \text{Class 4; } 1000 \text{ mm}^2$
- $(40 \times 50) \text{ mm} \rightarrow \text{Class 3; } 2000 \text{ mm}^2$
- $(40 \times 75) \text{ mm} \rightarrow \text{Class 1; } 3000 \text{ mm}^2$

Um die verschiedenen Antennen geometrien realisieren zu können, müssen diese entworfen werden. Die Hersteller der Tag-ICs NXP und ST liefern dafür Application Notes wie [12] oder [13]. In diesen Anwendungshinweisen wird Schritt für Schritt erklärt, was beim Antennenentwurf zu beachten ist.

#### 2.2.4 Abstand und Ausrichtung der Antennen

Da die vorherige Betrachtung der Feldverteilung gezeigt hat, dass die Ausrichtung der Antennen entscheidend ist, wurden entsprechende Halterungen selbst entworfen und 3D-gedruckt. Deren Design ermöglicht es, den NFC-Tag in verschiedene Höhen einzuschieben, wobei die Mittelpunkte beider Antennen immer übereinander liegen. Da die Antennen-Orientierungen der verwendeten Smartphones nicht gleich sind, lässt sich die Halterung in  $90^\circ$ -Schritten drehen. Dadurch ist jeweils eine optimale Kopplung sichergestellt und Messwerte sind reproduzierbar.

Alle Messungen wurden in sieben verschiedenen Abständen, beginnend bei 5 mm Abstand zwischen Smartphone und NFC-Tag, bis zu 35 mm in 5 mm-Schritten, durchgeführt.

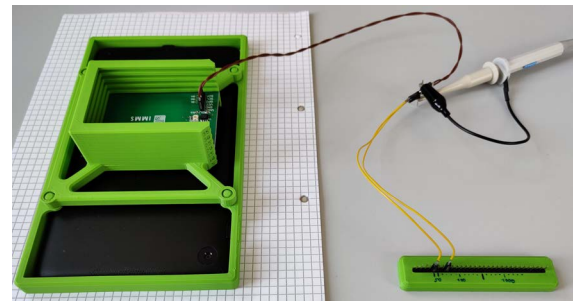
#### 2.2.5 Belastung des EH-Ausgangs

Um die übertragene Leistung zu messen, muss der EH-Ausgang des NFC-Tags belastet werden. Mit verschiedenen Widerstandswerten lassen sich unterschiedliche Lastbedingungen erzeugen. Es wurden 28 Lasten zwischen  $50 \Omega$  und  $10 \text{ k}\Omega$  ausgewählt. Bis  $800 \Omega$  sind diese in  $50 \Omega$ -Schritten verteilt und ab  $2 \text{ k}\Omega$  in  $1000 \Omega$ -Schritten. Mit den angeschlossenen Widerständen ist es möglich, durch eine einfache Spannungsmessung die übertragene Leistung zu berechnen.

#### 2.2.6 Versuchsaufbau

Der Spannungsverlauf am EH-Ausgang ist nicht konstant. In regelmäßigen Abständen moduliert das Smartphone das Feld, um mit dem NFC-Tag zu kommunizieren. In dieser Zeit bricht die Spannung je nach Last teilweise ein. Um diese zeitlichen Schwankungen zu berücksichtigen, wird

die Spannung über dem angeschlossenen Lastwiderstand mit einem Oszilloskop gemessen. Dazu wird, als Maß für die Leistung, die RMS-Funktion verwendet und über mehrere Sekunden gemittelt. **Bild 1** zeigt den Messaufbau.



**Bild 1** Messaufbau für die EH-Messung

Links im Bild ist die Halterung für Smartphone und NFC-Tag zu sehen. Die braune Leitung führt den EH-Ausgang und Masse vom NFC-Tag weg. Weiterhin ermöglicht sie den Anschluss verschiedener Widerstände (unten rechts) und dem Tastkopf des Oszilloskops (oben rechts). Die 28 Widerstände können durch Umstecken der gelben Leitung in der Stiftleiste eingestellt werden.

### 2.3 Auswertung der EH-Messung

Für die Auswertung ist es erforderlich, die fünf verschiedenen Parameter der Messung zu unterscheiden, welche zuvor erörtert wurden.

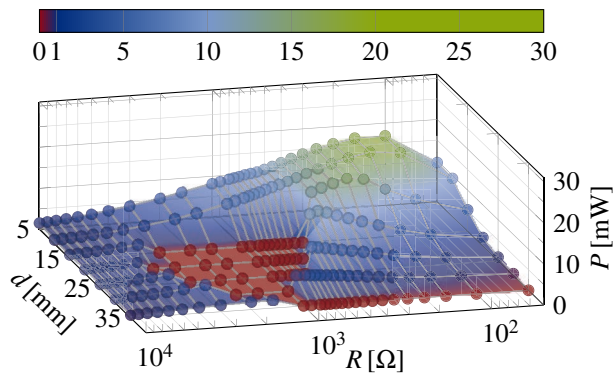
Von Interesse ist die übertragbare Leistung der verschiedenen Konfigurationen. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, aus gemessener Spannung und Lastwiderstand gleich die Leistung zu berechnen. Das ist direkt möglich, weil die RMS-Spannung gemessen wurde. Auf eine explizite Darstellung der Spannung kann verzichtet werden. Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass die Spannung im Normalfall zwischen 2 V und 3 V variiert, je nach angeschlossener Last. Für sehr niederohmige Zustände bricht die Spannung aber ein. Eine Spannung von weit über 3 V tritt in der Regel nicht auf.

#### 2.3.1 Darstellungsmöglichkeiten

Für eine Konfiguration aus TX- und RX-Antenne ist es möglich, die übertragene Leistung in Abhängigkeit von Abstand und Widerstand darzustellen. Dies führt zu einer Art dreidimensionalem Streudiagramm. In dem Diagramm werden die einzelnen Datenpunkte dargestellt und durch eine Fläche verbunden. **Bild 2** zeigt ein Beispiel hierfür.

Das Diagramm stellt alle Messwerte für eine Konfiguration dar und gibt somit einen sehr guten Überblick über die Performance des jeweiligen Schaltkreises. Um aber alle Messwerte eines Tag-ICs darstellen zu können, müsste jede Kombination aus TX- und RX-Antenne aufgetragen werden. Dies würde zu zwölf Diagrammen für nur einen Schaltkreis führen. Doch erst mit Hilfe der dann 36 Darstellungen ist eine anschauliche Interpretation möglich.

Bei allen roten Punkten wurde keine Leistung übertragen. Beim Übergang von dunkelblau über hellblau zu grün ist immer mehr Leistung verfügbar. Idealerweise sind für einen Tag-IC so wenig wie möglich rote Bereiche. Weiter-



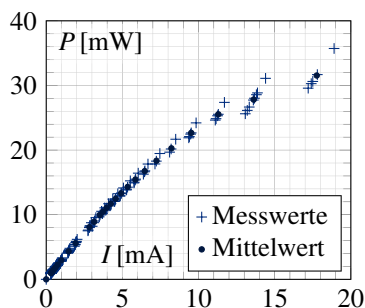
**Bild 2** Beispiel für eine Darstellung

hin sollte die Oberfläche stetig sein und nicht durch „Täler“ unterbrochen sein. In Bild 2 ist ein solches Tal zu sehen.

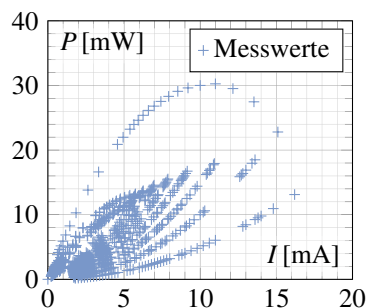
Ausgehend von der 3D-Darstellung lassen sich weitere Möglichkeiten ableiten. Ziel sollte es sein, auf eine dreidimensionale Darstellung zu verzichten und die Anzahl der Diagramme für einen Tag-IC zu reduzieren. Dies ist natürlich nur möglich, wenn verschiedene Parameter zusammengefasst werden.

Eine zweidimensionale Darstellung auf Basis von Bild 2 lässt sich auf mehrere Arten realisieren. Eine Möglichkeit ist die Projektion aller Datenpunkte auf die  $P$ - $d$ -Ebene, was einer Seitenansicht von links entspricht. Daraus ließe sich die optimale Entfernung einer Konfiguration ablesen. Projiziert man alle Punkte hingegen auf die  $P$ - $R$ -Ebene, so lässt sich der optimale Lastwiderstand ablesen. Beide der Projektionen haben allerdings wieder den entscheidenden Nachteil, dass für jede Kombination aus TX- und RX-Antenne ein eigenes Diagramm entsteht. Dies erschwert wieder den Vergleich.

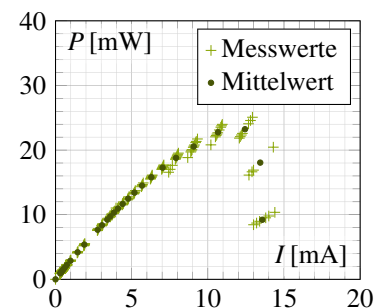
Eine weitere Reduktion der Diagramme, also eine Zusammenfassung verschiedener Konfigurationen ist nur möglich, wenn mehrere Parameter annähernd konstant bleiben. Für die verschiedenen Tag-ICs können das unterschiedliche Parameter sein. Bestenfalls würde die übertragene Leistung nur vom angeschlossenen Lastwiderstand abhängen und bei zu schwachem Feld einfach nicht vorhanden sein. Diese Vermutung kann aufgrund der Untersuchungen in [14] getroffen werden. Bei den Untersuchungen von NXP stellt sich eine Abhängigkeit der übertragenen Leistung vom entnommenen Strom ein. Es entsteht also ein  $P(I)$ -Diagramm.



**Bild 3**  $P(I)$ -Diagramm M24LR



**Bild 4**  $P(I)$ -Diagramm ST25DV



**Bild 5**  $P(I)$ -Diagramm NTAG

### 2.3.2 Verfügbare Leistung

Für eine Darstellung  $P(I)$  dürfte die Konfiguration aus TX- und RX-Antenne keine Rolle spielen. Um die Vermutung zu bestätigen, wurden alle Datenpunkte ( $R$ ;  $U$ ) zu ( $I$ ;  $P$ ) umgerechnet. Alle zwölf Konfigurationen der Antennen und alle sieben Entfernungen sind in einem Diagramm aufgetragen. Zusätzlich wurden für jeden Widerstandswert die Mittelwerte der einzelnen Messungen berechnet (falls Leistung übertragen wurde). In Bild 3, Bild 4 und Bild 5 sind die Ergebnisse dargestellt.

Beim M24LR und NTAG gibt es einen festen Zusammenhang zwischen Strom und Leistung. Beim ST25DV ist eine solche Abhängigkeit nicht vorhanden. Der M24LR kann Leistungen über 30 mW zur Verfügung stellen. Allerdings ist das nur in wenigen Konfigurationen der Fall. Wenn der Tag-IC mehr als 15 mA Strom bereit stellen muss, kann keine eindeutige Aussage mehr über die Leistung getroffen werden. Der Zusammengang bis 15 mA ist fast linear. Beim NTAG liegen fast alle Messpunkte auf einer Kurve. Bis zu 12 mA existiert ein annähernd linearer Zusammenhang. Anschließend fällt die Leistung rasant ab und die Messwerte verschwimmen.

### 2.3.3 Erkenntnisse

Es konnten folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Der ST25DV weist ein nicht erklärbares Verhalten auf. Er ermöglicht nur eine Nutzung der EH-Funktion bei nieder- und hochohmigen Lasten.
- M24LR und NTAG haben eine interne Regelung der Ausgangsspannung. In Abhängigkeit des Stromes stellt sich unabhängig von den Antennenkonfigurationen eine vorhersehbare Spannung ein. Beim ST25DV ist dies nicht der Fall.
- Die EH-Funktion des M24LR funktioniert bei Entfernungen größer als 2 cm zwischen TX- und RX-Antenne nicht mehr. Bei einigen Testgeräten lag die verfügbare Leistung mit dem M24LR deutlich unter dem Durchschnitt.
- Als zuverlässigster Tag-IC hat sich der NTAG herausgestellt. Dieser kann je nach Konfiguration bis zu 22 mW (bei 12 mA) zur Verfügung stellen.

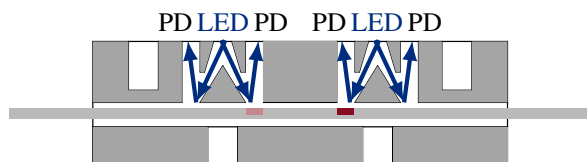
Da sich der NTAG von NXP als geeignetster Tag-IC herausgestellt hat, wird dieser für den Aufbau des Messsystems verwendet. Als Antenne für den NFC-Tag wird die vermessene Class 3 Antenne verwendet.

### 3 Entwicklung des Sensorsystems

Die quantitative Auswertung von LFA-Teststreifen geschieht oftmals optoelektronisch. Ein Kamera-Sensor erfasst dazu die Intensität der Linien auf dem Streifen. [10] Für ein energieautarkes System ist dies keine Option, weil aus den EH-Messungen hervorgeht, dass die zur Verfügung stehende Leistung typischerweise nicht mehr als 20 mW beträgt.

#### 3.1 Messprinzip

Ein LFA-Teststreifen besteht aus mehreren Bereichen. Für die Messung relevant sind die Bereiche von Testlinie und Kontrolllinie. Bei einer erfolgreich ausgeführten Messung kann über die Intensität der Testlinie ein Rückschluss auf die Konzentration des zu untersuchenden Substrats in der Flüssigkeit geschehen. Das Messprinzip ist in **Bild 6** schematisch dargestellt.



**Bild 6** Blende für LFA-Messung

Der LFA-Teststreifen wird in ein Blendenbauteil eingelegt. Mit Hilfe von Leuchtdioden (LEDs) werden die beiden Linien (in rot dargestellt) beleuchtet. Anschließend erfassen Photodioden (PDs) das reflektierte Licht. Die Beleuchtung erfolgt dabei so, dass Licht nur über Reflexion am Teststreifen, aber nicht auf direktem Weg, zur Photodiode gelangen kann. Je größer die Intensität der Linie ist, desto kleiner wird der durch die Photodioden generierte Strom. Die Messung der Konzentration ist somit auf eine Strommessung zurückzuführen.

Weiterhin werden nicht nur die beiden Linien beleuchtet, sondern auch ein Weißbereich des LFA-Streifens daneben (wo sich keine Linie ausbildet). Der dadurch ermittelte Strom dient als Referenz für die Messung. Bei der Auswertung wird das Verhältnis aus Weißbereichsstrom zu Linienstrom gebildet. Dieses liefert dann eine Aussage über die gemessene Konzentration.

Die Strommessung geschieht mit Hilfe von Kapazitäten und einem Mikrocontroller ( $\mu C$ ). Der Fotostrom der Photodioden wird durch jeweils einen Kondensator aufintegriert. Die Strommessung lässt sich somit auf eine Spannungsmessung zurückführen, welche mit dem Analog-Digital-Wandler eines  $\mu C$ s einfach möglich ist.

Bleiben die LEDs dauerhaft an, so fließt ständig ein Fotostrom und die Spannung über der Kapazität würde immer weiter steigen. Erreicht sie die Versorgungsspannung, kommt die Messung in die Sättigung und es ist kein Rückschluss auf den Strom mehr möglich. Für die Strommessung ist es somit entscheidend, die Kapazität nur eine definierte Zeit (welche kleiner ist als die Sättigungszeit) zu laden.

Eine Möglichkeit ist es, den Weißbereich als Abbruchbedingung zu verwenden. Da die Linie nicht heller ist als

die Nitrocellulose-Membran, kann die Kapazität des Weißbereichs bis zu einer definierten Spannung geladen werden. Die Spannung über der Kapazität der Testlinie oder Kontrolllinie ist dann in jedem Fall kleiner-gleich der definierten Spannung. Damit kann gewährleistet werden, dass die Messung nicht in Sättigung gerät. Die Detektion der Spannung über der Weißbereichskapazität kann mit einem Komparator geschehen.

#### 3.2 Herausforderungen Energieautarkheit

Das beschriebene Messprinzip wurde zuerst nicht energieautark getestet, um die Funktionalität zu überprüfen. Bei der Überführung in ein energieautarkes System gab es zwei Hürden zu überwinden.

Aus den EH-Messungen war bekannt, dass die Spannung abhängig vom Laststrom ist. Damit ist es nicht möglich, reproduzierbare Messungen durchzuführen. Die Spannung muss daher zuvor auf einen festen Wert geregelt werden. Das zweite Problem ist die zur Verfügung stehende Energie. Für die Messung ist es notwendig, dass die LED circa 50–100 ms lang leuchtet. Der LED-Strom betrug bei den Messungen etwa 5 mA. Die zur Verfügung stehende Energie reicht dafür nicht aus.

Es ist also notwendig, dass für die LED Energie zwischengespeichert wird. Dafür eignet sich ein Kondensator. Bei der Regelung der Versorgungsspannung ist zu beachten, dass für die LED eine Spannung von über 2,8 V notwendig ist. Es wird daher ein Aufwärtswandler benötigt, weil die EH-Spannung geringer sein kann. Bei der Energiespeicherung muss ein Kondensator geladen werden. Der Ladevorgang sollte dabei mit angepassten Strom erfolgen aber auch nicht lange dauern. Daher eignet sich eine Konstantstromquelle. Auch zur Einstellung des LED-Stroms ist eine Stromquelle notwendig. Es wurden verbesserte Howland-Stromquellen verwendet.

#### 3.3 Schaltungsentwurf

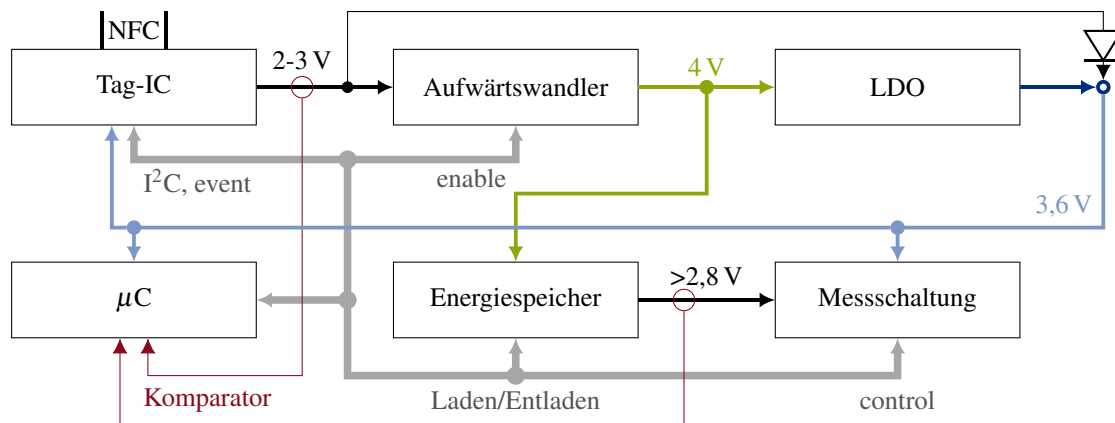
Mit diesen Erkenntnissen konnte die Schaltung entworfen werden. **Bild 7** zeigt die Systemübersicht.

Ausgangspunkt der Schaltung ist ein Tag-IC mit EH-Funktion. Er stellt die Energie für die komplette Schaltung bereit. Die geharvestete Spannung beträgt je nach Stromaufnahme zwischen zwei und drei Volt. Diese Spannung wird durch einen Aufwärtswandler zu 4 V gewandelt und dient als Referenzspannung für den Energiespeicher. Weiterhin wird durch einen nachgeschalteten LDO die Spannung, zur Versorgung aller weiteren Komponenten, auf 3,6 V stabilisiert.

Die Steuerung des Messablaufs und das Energiemanagement werden von einem ULP- $\mu C$  übernommen. Im normalen Betrieb ist die Spannung des Tag-ICs größer als 2 V. Über einen hochohmigen Spannungsteiler und Komparator detektiert der  $\mu C$ , wenn die Spannung unter 2 V fällt und schaltet den Aufwärtswandler aus, um Energie zu sparen. Damit der  $\mu C$  anläuft ist eine Überbrückungsdiode notwendig, welche die Spannung direkt an den  $\mu C$  weiterleitet. Um den Spannungsabfall gering zu halten, sollte dafür eine Schottky Diode verwendet werden.

Die für die Messung benötigte Energie muss vorher in





**Bild 7** Systemübersicht des energieautarken Sensorsystems

Kondensatoren gespeichert werden. Die Prüfung des Ladestandes übernimmt ebenfalls der  $\mu\text{C}$ . Dazu wird über einen hochohmigen Spannungsteiler mittels Komparator detektiert, ob die Speicherkondensatoren auf 4 V aufgeladen sind. Ist das der Fall, kann eine Messung beginnen. Die Kommunikation zwischen Tag-IC und  $\mu\text{C}$  für den reinen Datenaustausch geschieht über I<sup>2</sup>C. Ebenso kann der Tag-IC verschiedene Events (zum Beispiel Lesevorgang über NFC beendet) detektieren und als Interrupt an den  $\mu\text{C}$  senden.

Das fertiggestellte Messsystem ist in **Bild 8** zu sehen.



**Bild 8** Fertiggestelltes Messsystem

Im Gegensatz zu **Bild 6** wird der Streifen nicht direkt in das Blendenbauteil eingelegt, sondern befindet sich in einer Cartridge. Durch den abgenommenen Deckel sieht man im vorderen Teil die eingeschobene Antenne und in der Rückseite die Hauptplatine. Unter der silbernen Abdeckung befindet sich der Blendentunnel. Dieser beinhaltet das PCB für die LEDs und Photodioden.

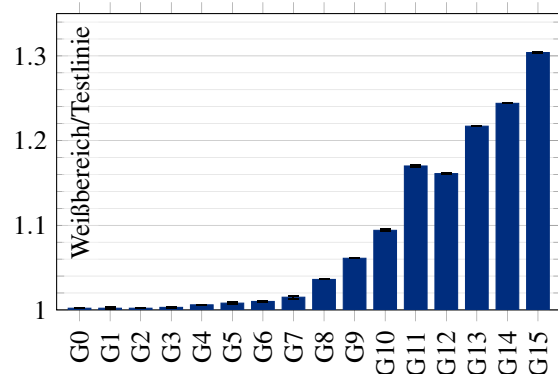
### 3.4 Messungen

Im Folgenden wird nun das entstandene energieautarke Messsystem mit einer batteriebetriebenen Version verglichen. Für die Messungen stehen vorgefertigte LFA-Teststreifen zur Verfügung. Bei diesen sind die Testlinien und Kontrolllinien aufgedruckt und kommen nicht durch Immunreaktionen zustande. Ausgewertet wird jeweils nur

die Testlinie, weil deren Intensität entscheidend ist. Bei der Kontrolllinie reicht eine binäre Aussage, ob sie vorhanden ist oder nicht.

#### 3.4.1 Ausgangspunkt

Es stehen Teststreifen mit verschiedenen Intensitäten der Testlinie zur Verfügung. Diese reichen von G0 (komplett weiß) bis G15 (dunkelrot). Die Intensitäten bis G3 sind mit dem bloßem Auge nicht unterscheidbar. Um dies weiter zu überprüfen, wurden alle 16 Streifen mit 600dpi eingescannt. Es wurde ein Auswerteprogramm genutzt, um mittels LabVIEW die Intensitäten der jeweiligen Bereiche zu ermitteln. Aus diesen wurde anschließend das Verhältnis von Weißbereich zu Testlinie gebildet. **Bild 9** zeigt die Ergebnisse.



**Bild 9** Verhältnis der gescannten Linienintensitäten

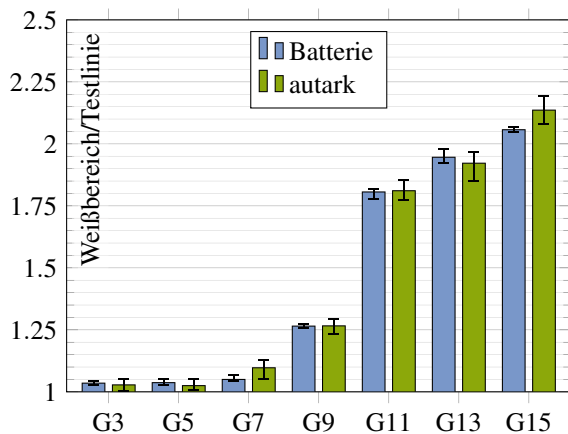
Man erkennt, dass die Streifen bis G3 mit dem Scanner nicht voneinander unterscheidbar sind. Die sonstigen Verhältnisse werden mit dunklerer Linie immer größer. Nur der Streifen G11 fällt aus dem Raster. Für die Messung mit dem Messsystem lässt sich vermuten, dass die Intensitäten bis G7 nicht eindeutig unterschieden werden können.

#### 3.4.2 Messsystem

Für den Vergleich des Messsystem zwischen energieautark und batteriebetrieben wurden als zu vermessende Streifen sieben Intensitäten ausgewählt: G3, G5, ..., G15. Bei allen Messungen wird jeder Streifen zehnmal vermessen. Zwi-

schen jeder Messung wird die Cartridge neu in den Messstunnel eingesteckt.

Im Idealfall unterscheiden sich die Messungen nicht. Praktisch gesehen wird allerdings ein Unterschied im Verhältnis von Weißbereich zu Linienintensität auftreten, weil die Optik-Platine neu positioniert wurde. Bei der Auswertung wurde auf den Weißbereich normiert, sodass sich für einen komplett weißen Streifen ein Verhältnis von eins einstellt. Dazu wurde jeweils als Referenz der komplett weiße Streifen vermessen. In **Bild 10** ist das Diagramm für die sieben unterschiedlichen Streifen dargestellt.



**Bild 10** Verhältnis der Linienintensitäten für unterschiedliche Streifen

Das Diagramm zeigt vier Eigenschaften:

1. Beide Varianten zeigen ein ähnliches Verhältnis für die verschiedenen Streifen. In den meisten Fällen sind deutliche Stufen zwischen den Streifen erkennbar. Nur bei geringen Intensitäten ist kein Unterschied erkennbar.
2. Die Fehlerbalken für die energieautarke Messung sind größer. Die Vermutung liegt nahe, dass dies aufgrund der EH-Versorgung kommt. Das ist aber nicht der Fall. Ursache hierfür ist der unterschiedliche Messablauf bei den beiden Messsystemen:  
Beim batteriebetriebenen wurde jeder Streifen direkt zehnmal hintereinander gemessen ( $10 \times G3$ ,  $10 \times G5$ , ...). Beim energieautarken allerdings die Streifen abwechselnd ( $1 \times G3$ ,  $1 \times G5$ , ...,  $1 \times G15$ ,  $1 \times G3$ , ...). Grund hierfür ist, dass erst beim energieautarken Messen festgestellt wurde, dass sich die Referenz (weißer Streifen) ändert, je öfter die Cartridge gewechselt wird. Die Fehlerbalken liefern also keine Aussage über die Zuverlässigkeit des Messprinzips, sondern zeigen einen mechanischen Schwachpunkt des Messstunnels auf.
3. Das Verhältnis bei G7 ist für die energieautarke Messung größer als batteriebetrieben und kann im Gegensatz dazu von G5 unterschieden werden.
4. Zwischen G9 und G11 ist ein großer Sprung. Dieses Verhalten ist das gleiche, wie mit dem Scanner (Bild 9) beobachtet werden konnte.

## 4 Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit der Entwicklung eines Messsystems zum Bewerten von LFA-Teststreifen. Das entstandene Messsystem funktioniert energieautark mittels EH aus dem NFC-Feld eines Smartphones. Er ermöglicht zudem eine teils quantitative Bewertung der LFA-Teststreifen.

Einen entscheidenden Anteil der Voruntersuchungen stellt die Betrachtung der Energieübertragung mittels NFC dar. Hierfür wurde zu Tag-ICs mit EH-Funktion recherchiert. Auf Grundlage dieser Recherche konnten drei mögliche Schaltkreisserien (M24LR, ST25DV, NTAG) für das Messsystem identifiziert werden. Diese wurden in umfangreichen Messungen mit vier verschiedenen Smartphones/Tablets, drei Antennengrößen und bei unterschiedlichen Entfernungen zwischen Lesegerät und NFC-Tag untersucht.

Als Ergebnis dieser Messungen hat sich die „NTAG I2C plus“-Serie von NXP als geeignetster Tag-IC herausgestellt. Er besitzt einen festen Zusammenhang zwischen Ausgangsstrom und Ausgangsspannung. In Abhängigkeit von den geometrischen Eigenschaften der Antennenanordnung kann mit allen vier Smartphones/Tablets eine Leistung zwischen 15 mW und 25 mW aus dem NFC-Feld entnommen werden.

Nach den Messungen wurde ein prototypisches Sensorsystem entwickelt. Verwendet wurde eine optoelektronische Messung der LFA-Streifen, basierend auf Reflexion.

Die schaltungstechnische Aufgabe bestand zum einen darin, die laststromabhängige Ausgangsspannung des Tag-ICs auf eine konstante Referenzspannung zu regeln. Zum anderen musste mit dem knappen Energiebudget des EHs die Messung der LFA-Teststreifen erfolgen. Hierzu wurde eine neue Messschaltung entworfen, welche zuerst die Energie speichert und anschließend definiert durch eine Howland-Stromquelle zur Verfügung stellt. Die Schaltung wurde auf drei PCBs realisiert.

Nach der erfolgreichen Inbetriebnahme des Systems wurden Vergleichsmessungen mit verschiedenen, vorgefertigten LFA-Teststreifen durchgeführt. Hierbei gab es eine Gegenüberstellung des energieautarken Messsystems mit einer batteriebetriebenen Version. Die Messung bestätigt, dass die energieautarke Spannungsversorgung die Messgenauigkeit nicht verschlechtert.

Für das Messsystem wäre der nächste Schritt, den mechanischen Aufbau zu verbessern. Ebenso müsste die Funktionalität mit echten Streifen überprüft werden.

## 5 Literatur

- [1] Sanislav, T.; Mois, G. D.; Zeadally, S.; Folea, S. C.: Energy harvesting techniques for internet of things (IoT). IEEE Access, 9, 39530-39549, (2021).
- [2] Soin, N.; Fishlock, S. J.; Kelsey, C.; Smith, S.: Triboelectric effect enabled self-powered, point-of-care diagnostics: Opportunities for developing assured and reassured devices. Micromachines, 12(3), 337, (2021).

- [3] Rasooly, A.; Herold, K. E.: Biosensors and Biodection. Methods and Protocols: Electrochemical and Mechanical Detectors, Lateral Flow and Ligands for Biosensors. Humana Press, S.169-172, (2009).
- [4] Lin, B.; Guan, Z.; Song, Y.; Song, E.; Lu, Z.; Liu, D.; An, Y.; Zhu, Z.; Zhou, L.; Yang, C.: Lateral flow assay with pressure meter readout for rapid point-of-care detection of disease-associated protein. Lab on a Chip, 18(6), 965-970, (2018).
- [5] Hamad, E. M.; Hawamdeh, G.; Jarrad, N. A.; Yasin, O.; Al-Gharabli, S. I.; Shadfan, R.: Detection of Human Chorionic Gonadotropin (hCG) Hormone using Digital Lateral Flow Immunoassay. In 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 3845-3848, (2018).
- [6] ams AG: ams und Senova arbeiten gemeinsam an Technologie zur Entwicklung schneller dezentraler „point-of-care“-Antikörpertests für Covid-19. ams. Abgerufen am 5. Februar 2022, von <https://ams.com/-/ams-senova-as73411>, (2020).
- [7] Kim, S.; Vyas, R.; Bito, J.; Niotaki, K.; Collado, A.; Georgiadis, A.; Tentzeris, M. M.: Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms. Proceedings of the IEEE, 102(11), 1649-1666, (2014).
- [8] Lazaro, A., Villarino, R.; Girbau, D.: A survey of NFC sensors based on energy harvesting for IoT applications. Sensors, 18(11), 3746, (2018).
- [9] Boada, M.; Lazaro, A.; Villarino, R.; Girbau, D.: Battery-less soil moisture measurement system based on a NFC device with energy harvesting capability. IEEE Sensors Journal, 18(13), 5541-5549, (2018).
- [10] Venkatraman, V.; Liedert, R.; Kozak, K.; Steckl, A. J.: Integrated NFC power source for zero on-board power in fluorescent paper-based lateral flow immunoassays. Flexible and Printed Electronics, 1(4), 044001, (2016).
- [11] NFC Forum: NFC-V Just Got Better – Here’s How. NFC Forum. Abgerufen am 5. Februar 2022, von <https://nfc-forum.org/nfc-v-just-got-better-heres-how/>, (2015).
- [12] NXP: NTAG Antenna Design Guide. NXP. AN11276, Version 1.8, Abgerufen am 23. Januar 2020, von <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN11276.zip>, (2018).
- [13] STMicroelectronics: How to design an antenna for dynamic NFC tags. STMicroelectronics. AN2972, Version 9, Abgerufen am 23. Januar 2020, von [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00232630-how-to-design-an-antenna-for-dynamic-nfc-tagsstmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00232630-how-to-design-an-antenna-for-dynamic-nfc-tagsstmicroelectronics.pdf), (2019).
- [14] NXP: Energy Harvesting with the NTAG I2C and NTAG I2C plus. NXP. AN11578, Version 1.0, Abgerufen am 30. Juni 2020, von <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN11578.pdf>, (2016).