

# **Abschlussbericht – Teil 1**

## **Kurzbericht**

(zur vertraulichen Behandlung)

**Vorhabenbezeichnung:**            **Multifunktionales, nanoelektronisches Warnsystem für Umweltdaten in einer mechanischen Uhr – MoNaUhr**

**Förderkennzeichen:**            **16ES0952**

**Bewilligungszeitraum:**            01.03.2019 – 28.02.2022  
(verlängert bis 31.08.2022)

**Zuwendungsempfänger:**            **ADZ NAGANO GmbH Gesellschaft für Sensortechnik**  
Bergener Ring 43  
01458 Ottendorf-Okrilla

**Teilprojektleiter:**                **Hannes Georgi**  
  
**ADZ NAGANO GmbH Gesellschaft für Sensortechnik**  
Bergener Ring 43  
01458 Ottendorf-Okrilla  
Tel: 035205 5969 82  
Email: [georgi@adz.de](mailto:georgi@adz.de)

**Berichterstatter:**                **Hannes Georgi & Uwe Kostudis**  
  
**ADZ NAGANO GmbH Gesellschaft für Sensortechnik**

## 1. Ursprüngliche Aufgabenstellung, wissenschaftlicher und technischer Stand

Mit der rapide zunehmenden Digitalisierung und Miniaturisierung in vielen Bereichen des Lebens nehmen die Bedeutung und das Marktpotenzial kleiner mobiler elektronischer Geräte rasant zu. Gefragt sind energie- und platzsparende miniaturisierte Funktionseinheiten, die im täglichen Umgang Messwerte erfassen, verarbeiten und übertragen oder anzeigen können und sich möglichst mit der notwendigen Energie selbst versorgen.

Gegenwärtig sind viele mobile Kleingeräte am Markt, die Werte erfassen (z.B. Herzfrequenz, Schrittzähler, Aufenthaltsort) und diese anzeigen (Displays) oder drahtlos meist via Smartphone übertragen können.

Die Energieversorgung erfolgt hier entweder über kleine Batterien oder aufladbare Akkumulatoren. Die Energie zur Aufladung wird zum großen Teil über Netz-gekoppelte Ladegeräte bezogen.

Zur Anzeige der Werte werden zum allergrößten Teil Displays mit Flüssigkristallen oder OLED verwendet. In diesen Fällen stellt das Display ein konstruktiv eigen-ständiges Bauteil dar, welches durch den unterhalb liegenden CMOS- oder OTFT-Schaltkreis zu komplex für die angedachte Zielstellung ist.

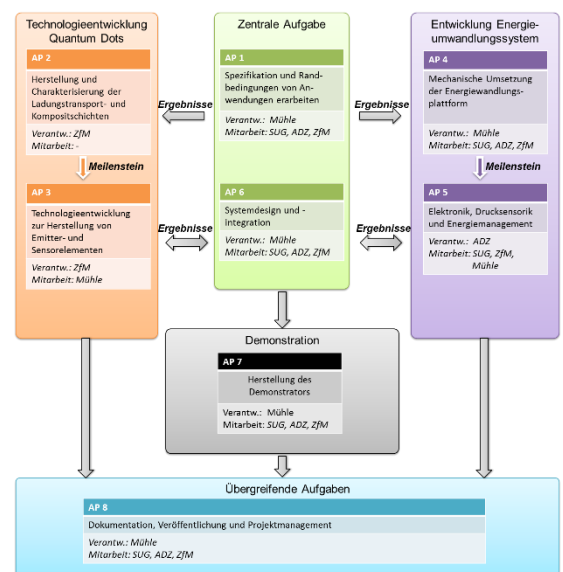
Die Neuheit des in diesem Projekt verfolgten Lösungsansatzes beruht im Wesentlichen auf folgenden Komponenten:

- Anwendung von Quantum-Dot-Schichtsystemen in technischen Geräten
  - Die multifunktionale Verwendung von Quantum-Dot-Schichtsystemen für
  - die Elektrolumineszenz;
  - die messtechnische Erfassung des anliegenden UV-Spektrums mittels QDs;
- die Wandlung von Photonenstrom in elektrischen Strom (Solarzelle) mittels QDs;
- Schaffung eines miniaturisierten mobilen Energiewandlersystems, zur kurzfristigen Energieversorgung des Elektronikmoduls (hier über die Lünette einer mechanischen Uhr)

Für ADZ als Projektpartner stand insbesondere das Energiewandlersystem sowie das damit einhergehende Konzept zum Energieharvesting, Energiespeicherung sowie Q-Dot Ansteuerung im Fokus.

## 2. Ablauf des Vorhabens

Für den Projektablauf wurde im Vorfeld neben der organisatorischen Abstimmung zu Inhalten und später konkretisierten Arbeitspaketen auch ein Netzplan für die übergeordneten Vorgänge erstellt. Dieser sollte für alle Projektbeteiligten einen möglichst guten Überblick über die Arbeitsinhalte und Informationsflüsse geben.



Im weiteren Projektverlauf wurden durch persönliche und später virtuell stattfindenden Treffen die Arbeitsinhalte und Aspekte der Zusammenarbeit besprochen und nächste Schritte abgestimmt. Durch die Pandemie, welche im Frühjahr 2020 begann und bis weit ins 2022 angehalten hat, wurde sowohl die termingerechte als auch inhaltliche Bearbeitung der Aufgaben massiv beeinträchtigt. Teils konnten die Treffen nicht wie geplant abgehalten werden, teils waren Materialien nicht oder nur sehr eingeschränkt beschaffbar. Durch die Verkettung von mehreren dieser vorgenannten Punkte konnten und wurden bis zuletzt nicht alle Punkte aus dem Projekt umfassend bearbeitet und abgeschlossen werden.

### **3. Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen**

Als wesentliche Ergebnisse im Rahmen dieses Projektes sind Ansätze für den miniaturisierten Aufbau der Gesamtelektronik entstanden. Zudem wurde Erkenntnisse und Daten gesammelt, um für das Thema Energieharvesting auf Grundlage miniaturisierter Generatoren erste Erfahrungen zu machen. Diese Daten bestimmen ganz wesentlich die Möglichkeiten für die integrierbarere Elektronik, Datenverarbeitung und deren Signalisierung. Für diese Tests und Datengewinnung wurden Adapter gefertigt sowie eine Ansteuerung für die Generatoren entworfen und getestet. Die Kleinheit der Generatoren brachte dabei Probleme in Bezug auf die Ansteuerung, Adaptierung sowie Ausrichtung mit sich.

In Bezug auf die Zielstellung die Ansteuerung von Q-Dots zur Signalisierung von Zuständen, ergaben sich im Rahmen erster Tests und Abschätzung zur notwendigen Energiemenge und Möglichkeiten diese zu erzeugen bzw. zu speichern, Abstimmungsbedarf zwischen ADZ und den Forschungseinrichtungen. So wurde bereits zu einer relativ frühen Phase klar, dass die benötigte Energiemenge für die Leuchtstärke / Fläche der zu aktivierenden Q-Dot sowie der nötigen Elektronik nicht durch die Möglichkeiten und Vorgaben (keinen Einsatz von Lithium-Ionen-Technologie) zur Energiespeicherung, gedeckt werden können. Weitere Tests und Reduzierung der Strommenge und Leuchteffekten waren nötig.

Final konnten diese Tests und Funktionalitäten im Rahmen des Projekts nicht umfassend und vollends ausgeführt werden. Die Abstimmung mit der Forschungseinrichtung gestalteten sich zuweilen nicht einfach. Auch weil die Bereitstellung von Muster der Q-Dot Strukturen eine gewisse Zeit in Anspruch genommen haben.

28.02.2023 

Datum, Hannes Georgi  
Leiter Entwicklung, Projektleitung

28.2.23 

Datum, Uwe Kostudis  
Elektronikentwurf, Berichterstatter

## **Abschlussbericht – Teil 2**

### **Eingehende Darstellung**

(zur vertraulichen Behandlung)

**Vorhabenbezeichnung:**            **Multifunktionales, nanoelektronisches Warnsystem für Umweltdaten in einer mechanischen Uhr – MoNaUhr**

**Förderkennzeichen:**            **16ES0952**

**Bewilligungszeitraum:**            01.03.2019 – 28.02.2022  
(verlängert bis 31.08.2022)

**Zuwendungsempfänger:**            **ADZ NAGANO GmbH Gesellschaft für Sensortechnik**  
Bergener Ring 43  
01458 Ottendorf-Okrilla

**Teilprojektleiter:**                    **Hannes Georgi**  
  
**ADZ NAGANO GmbH Gesellschaft für Sensortechnik**  
Bergener Ring 43  
01458 Ottendorf-Okrilla  
Tel: 035205 5969 82  
Email: [georgi@adz.de](mailto:georgi@adz.de)

**Berichterstatter:**                    **Hannes Georgi & Uwe Kostudis**  
  
**ADZ NAGANO GmbH Gesellschaft für Sensortechnik**

## 1. Vorwort und Einordnung

Der vorliegende ausführliche Sachbericht zum oben benannten Förderthema beschreibt und vergleicht den erreichten Arbeitsstand der für ADZ relevanten Arbeitspakete mit dem laut anfänglicher Projektplanung beschriebenen Zielen. Die inhaltliche Verknüpfung der Arbeitspakete untereinander ist in diesen Beschreibungen und Darlegungen nicht mehr eindeutig abbildbar. Vielmehr müssen die technischen Inhalte und erreichten Ziel teils aus unterschiedlichen Arbeitspaketen verknüpft werden.

Zusammenfassend kann formuliert werden, dass die wesentlichen Projektziel erreicht werden konnten. So konnte in den ADZ Arbeitspaketen die Ansteuerung und Erprobung der Mico-Generatoren erprobt werden. Die für die Energiespeicherung nötige und anzupassende Harvesterschaltung liegt in den Grundzügen vor. Die Speicherung einer Energiemenge in Feststoffenergiespeicherbausteinen. Das Schaltungskonzept für die Einbindung eines externen Drucksensors, dessen Datenverarbeitung basierend auf einem Algorithmus, die Anbindung und Ansteuerung von Leuchtelementen (Q-Dots) sowie die Einbindung externer Taster ist vorhanden. Grundlegende funktionale Tests in Bezug auf das Energieniveau konnten durchgeführt werden. Der Aufbau eines vollständig funktionsfähigen Uhren-Demonstrators konnte im Rahmen der Projektlaufzeit nicht realisiert werden.

## 2. wissenschaftlich-technische Ergebnisse sowie Vergleich zwischen Planung und Realisierung

<b>AP 1.3</b>	<b>Spezifikation und Randbedingungen von Anwendungen erarbeiten</b> <b>1.3 Spezifikation Elektroniksystem</b>
<b>Zielstellung:</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Machbarkeitsstudie auf Basis des Pflichtenheftes (aus AP1.1) unter Berücksichtigung folgender Aspekte:<ul style="list-style-type: none"><li>○ Druckbereich</li><li>○ Energiebilanz</li><li>○ Schwellwert/einstellbare Größen</li><li>○ Bauraum, Bauteilauswahl bzw. Spezifikation, Komponentenauswahl</li><li>○ Elektronische Ankopplung der optischen Signal-ausgabe</li><li>○ Elektronische Ankopplung der akustisch/mechanischen Signalausgabe</li><li>○ Softwarealgorithmen zur Aus- und Bewertung der Umgebungsbedingungen, Funktionsumfang</li><li>○ Materialeigenschaften</li><li>○ EMV Eigenschaften bzw. Beachtung der Umgebungsbedingungen (z.B. Temperaturbereiche, Feuchtigkeit, ...)</li></ul></li></ul>
<b>Zielerreichung:</b>	<p>Im Rahmen der ersten Untersuchungen und Bewertungen der durch das Pflichtenheft bzw. den Anforderungskatalog formulierten Funktionen, wurde bei ADZ die Recherche bzgl. verfügbarer Generatoren, Energiespeichersysteme und Energieharvesteroptionen durchgeführt. Als Ergebnisse dieser Recherche wurden Micro-Generatoren sowie mögliche nicht auf Lithium-Ionen-Technologie basierende Energiespeicher identifiziert.</p> <p>Weitere Recherchen waren nötig, um die Energie aus den Generatoren auch in den Speicherelementen speichern zu können, also Harvestersysteme zu untersuchen. Die Anforderungen an diese Harvestersysteme stellen insofern eine Herausforderung dar, als dass es galt die äußerst geringen Energiemengen aus den Generatoren mit möglichst hoher Effizienz verarbeiten sprich speichern zu können. Die Ansteuerung der dafür erforderlichen Sensoren sowie Regelung des Ladens stellen hierbei eine besondere</p>

Herausforderung dar. Insbesondere galt es die äußerst niedrigen Ströme und Spannungen zu verarbeiten.

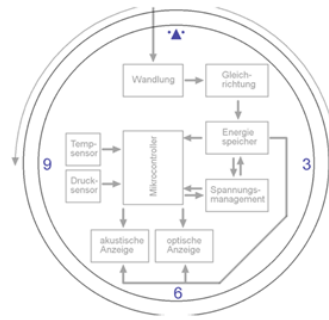


Abbildung 1 Grobkonzept und Blockabbildung für die Funktionsblöcke, für späteres Leitplattendesign

Um sinnvoll und plausible Tests durchführen zu können und die theoretischen Betrachtungen mit realen Messungen zu untersetzen, musste eine Ansteuerung für die zu erwartende spätere Aktivierung der Mechanik gefunden werden. Da in der späteren realen Anwendung nicht von einem dauerhaften Impuls durch die menschliche Hand an der Uhr zu erwarten ist, musste versucht werden die Möglichkeiten einer manuellen Bewegung und Betrieb an der Uhr nachzustellen. Da es hierfür keine Modelle oder Standardkurven gibt, wurde versucht dies durch eigene Messungen zu untersetzen. Eine entsprechende Vorrichtung muss erdacht und prototypisch realisiert werden.

Nachfolgend ist ein 3D-Model eines Micro-Generators abgebildet.

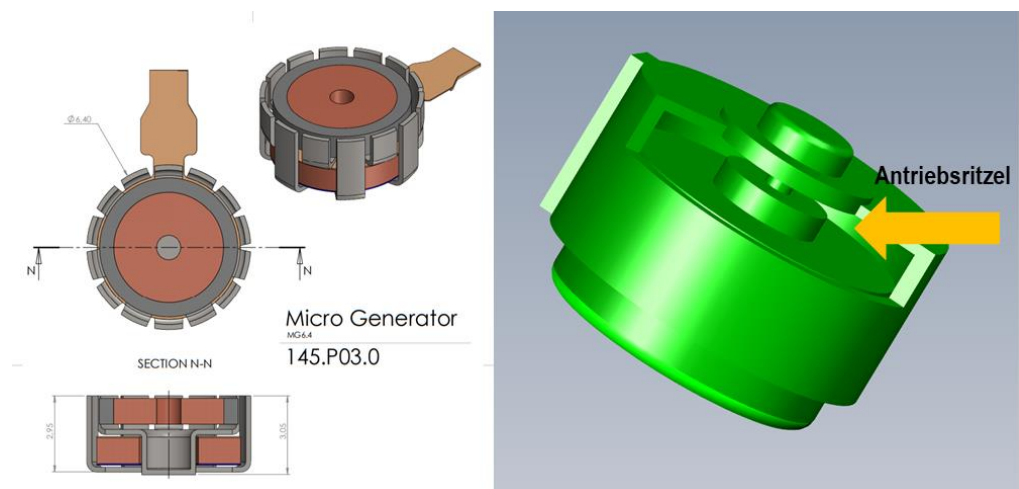


Abbildung 2 Generatorvariante 6.4 und 4.6

#### Generatorvariante d 6.4mm

Rotorritzel mit Spannange d1.8 fassbar, Stator mit Spannange d6.4 fassbar, Verformung der Statorschenkel, Flex-PCB reduziert Spanntiefe – Tauchtiefe des Rotors bestimmt Reitstock

#### Generatorvariante d 4.6mm

Rotorritzel im Gehäuse gefasst, Krafteinleitung über Zahnrad erforderlich, Stator mit Spannange d4.6 fassbar, keine Verformung der Statorschenkel, Flex-PCB reduziert Spanntiefe – Tauchtiefe des Rotors fix (Gegenlager im Gehäuse)

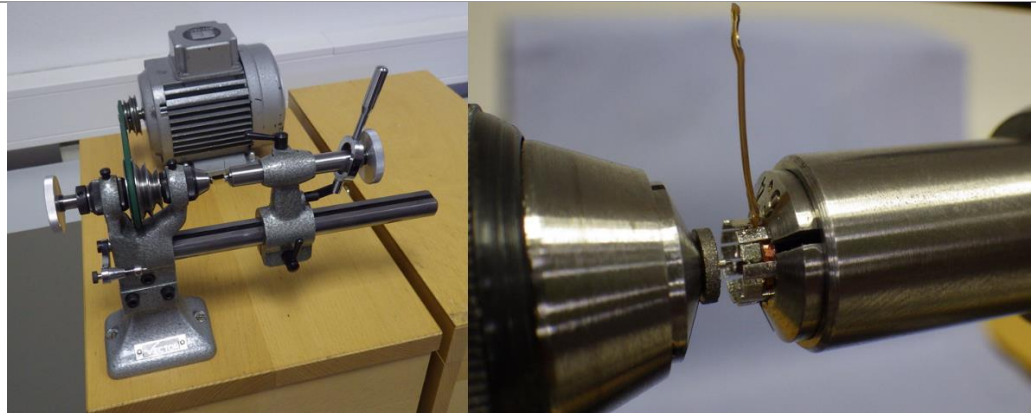


Abbildung 3 Uhrmacherdrehbank und Adaptierung Micro-Generatoren

Für die Ansteuerung und für erste Tests der Micro-Generatoren wurde versucht mittels einer Uhrmacherdrehbank, welche einen langsamen Anlauf mit hoher Trägheit ermöglicht, die ersten Generatoren in Betrieb zu nehmen. Der notwendige Unterbau sowie Adaptierung für das Fassen der Generatoren erschwerten jedoch diesen Test und ermöglichten letztlich keinen sauberen und reproduzierbaren Aufbau und Datenerfassung.

Es wurde nachfolgend mit einem durch einen Arduino ansteuerbaren Schrittmotor versucht eine schrittweise Ansteuerung und Drehbetrieb der Generatoren nahe am späteren Einbau zu testen. Hierdurch sollte es auch ermöglicht werden, mehrere Generatoren synchron anzutreiben. Über einen laserbasiertes Messprinzip / Messgerät (UNI-T UT372) wurde dabei die tatsächlich anliegende Drehzahl bestimmt.

Mithilfe der entworfenen Mechanik sollte es möglich sein, bis zu 4 Generatoren gleichzeitig und weitgehend synchron zu betreiben. Somit soll der realitätsnahe Betrieb einer Uhrenlunette dargestellt werden, wie er für die spätere Uhr angedacht ist.

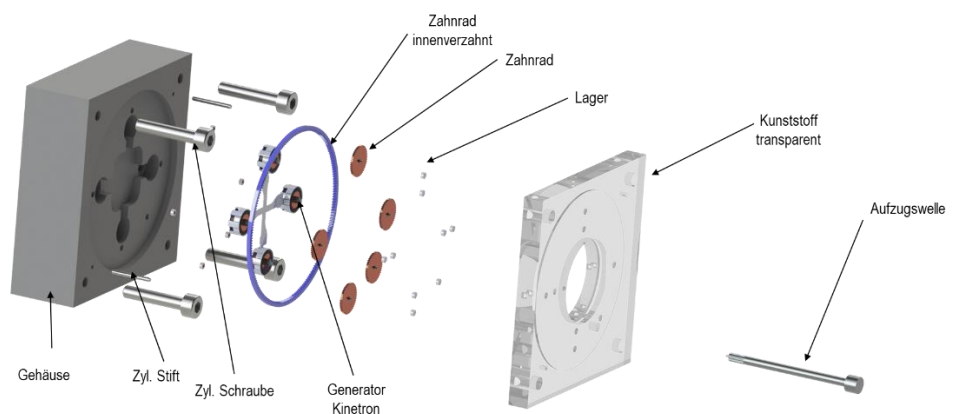


Abbildung 4 3D Model für die Generatoransteuerung, 4 Generatoren





Abbildung 5 Versuchsanordnung mit Arduinoansteuerung

Für die Aufgabe des Energieharvestings, also dem „Einsammeln“ der Energie und Bereitstellen für einen Speicher, wurde ebenfalls Recherche betrieben. Als möglicher Kandidat wurde eine LTC3109 Baustein identifiziert. Für diesen waren Testkits verfügbar. Diese wurden beschafft und es wurde versucht diesen einsatzfähig zu machen.

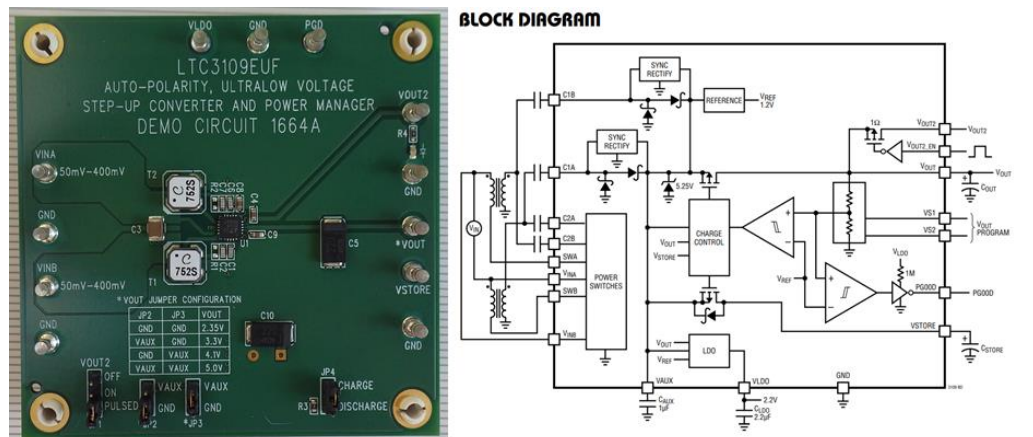


Abbildung 6 LTC3109 Harvester

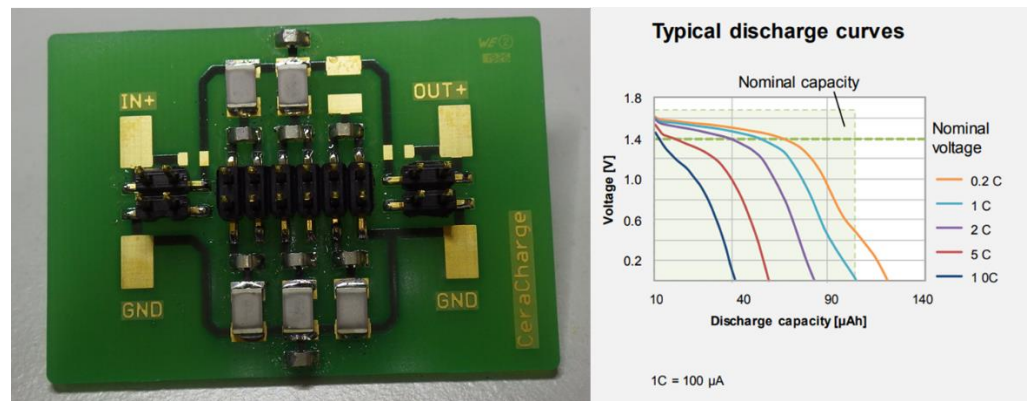


Abbildung 7 Energiespeicher, SMD Festkörperbatterie "CeraCharge", Prototypensetup



	<p>Für eine der letzten Aufgabe galt es ein Speichermedium für die Energie zu bekommen, welche nicht auf Lithium-Ionen Technologie basiert. Diese war eine explizite Forderung von Fa. Mühle.</p> <p>Die Baugröße dieser Festkörperspeicher in der Bauform 1812 (ca. 4.4x3.0x1.1mm) stellt dabei eine Herausforderung für die spätere Integration in den in der Uhr zur Verfügung stehenden Bauraum dar. Der prototypische Aufbau sollte hier zum grundsätzlichen Funktionsnachweis dienen. Die Nennspannung von 1,4V mit einer Nennkapazität von 100µAh wurden als grundlegende Daten für die Auslegung und Bestimmung der Anzahl der Bauelemente herangezogen. Wesentliche Leistungsparameter waren vorgegeben.</p> <p>Erste Muster von CeraCharge standen zur Entwicklung zur Verfügung, mittlerweile ist der neuartige Energiespeicher serienverfügbar.</p> <p>Da zum originalen Zeitpunkt noch keine finale Vorgabe in Bezug auf konkrete Funktionen in der Uhranwendung vorlagen, sondern lediglich grobe Ideen welche Funktionen denn wie in der Uhr realisiert werden könnten, konnte auch zu diesem Zeitpunkt noch keine genauere Analyse und Bewertung von vorhandenen Energiemengen und benötigten erfolgen. Erste Bewertungen zwischen den durch die Q-Dots etwa bekannten nötigen Energiemengen und den durch die Generatoren und Speicher bereitstellbaren, ergab bereits frühzeitig eine mögliche Diskrepanz zwischen diese Werten. Die Auswahl oder die Recherche hinsichtlich passender Drucksensoren wurde etwas verschoben und erfolgte zu einem späteren Zeitpunkt.</p> <p>Ein Teil der Arbeiten in diesem AP waren als Vorarbeit zu späteren APs (AP5) bereits erfolgt.</p>
--	--

<b>AP 4.3</b>	<b>Mechanische Umsetzung der Energiewandlungsplattform</b>  <b>4.3 Auslegung Energiebilanz</b>
<b>Zielstellung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zuarbeiten bzw. begleitende Auslegung der Energiebereitstellung und-speicherung, ggf. Test und Validierung</li> </ul>
<b>Zielerreichung:</b>	<p>Die Einleitung der Drehkraft in der ersten Phase erforderte eine Anpassung der entsprechenden Vorrichtung und des mechanischen Aufbaus der Adaptierung. Hintergrund ist eine zu große Kraft durch den Schrittmotor. Diese führte bei sich leicht blockierten Generatoren oder Lünettenadapter zum Brechen des Adapters. Auch eine nicht 100%ig zentrierte Einleitung der Drehbewegung war mit ursächlich für die Beschädigung. Abhilfe wurde durch eine Art Kupplung im „Antriebsstrang“ zwischen Prototyp der Lünettenadapters mit den integrierten Generatoren und dem Schrittmotor geschaffen. Zum Einsatz kam eine „Faltenbalgkupplung“.</p>

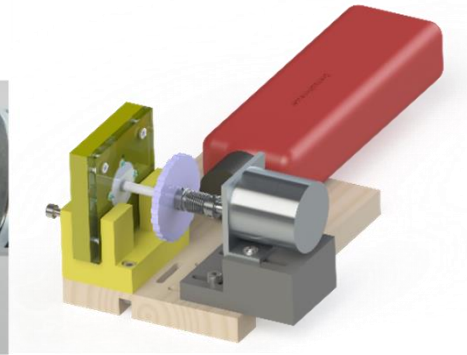
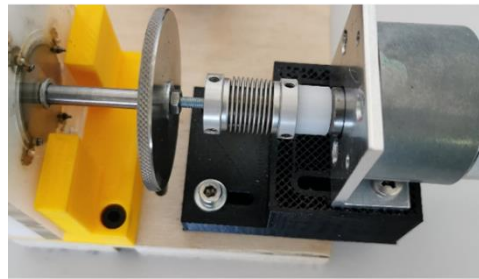


Abbildung 8 Adapter mit integrierter Kupplung zum Antrieb

Für die realisierte Umsetzung in diesem AP wurden die in den Vorbetrachtungen gemachten Recherchen umgesetzt und Tests durchgeführt. Die Tests befassten sich dabei insbesondere mit der Fragestellung in welcher Form die Micro-Generatoren die Energie bereitstellen. Welche Energiemengen zu erwarten sind und welche Güte diese hat. Welche Spitzenwerte sind zu erwarten, und wie kann eine Harvester- und Speicherschaltung hier realisiert werden, um die Energie mit möglichst hoher Effizienz zu einem Speichermedium zuzuführen.



Abbildung 9 Übersicht Verdrahtungsvarianten für 1 - 4 Generatoren

Für den möglichen seriellen oder parallelen Betrieb der Generatoren wurde eine Anzahl an entsprechenden Verdrahtungsträger erstellt. Nachfolgend wurden versucht diese unterschiedlichen Beschaltungen der Generatoren in Betrieb zu testen.

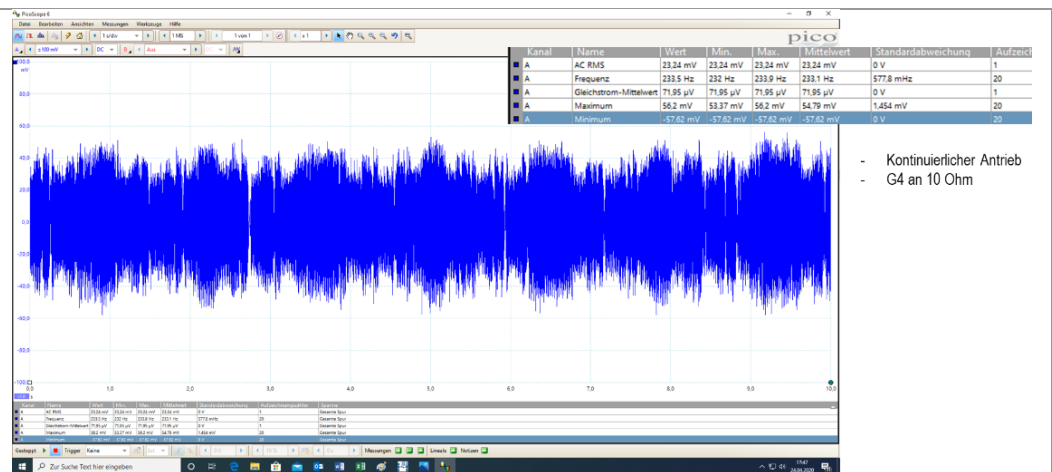


Abbildung 10 Beispiel Generatorerzeugung, Spannung

In einem Dauertestversuch mit den Generatoren zeigten sich unterschiedliche Spannungskurven auf dem Oszilloskop. Als Ergebnisse musste konstatiert werden, dass es eine Reihe von Themen bei einer möglichen späteren Integration dieser Generatoren in einer Uhr und mit den gegebenen Nebenbedingungen zu lösen gilt. So muss bewerkstelligt werden, dass die Generatoren möglichst synchron laufen, um so möglich wenige Phasenversatz der erzeugten Wechselspannung zu bekommen. Zudem muss die Harvesterschaltung so in Anpassung gebracht werden, dass ein Optimum der Energiemenge in die Speicher übertragen werden kann. Zudem ist die in den Test erforderliche Zeit zum Füllen der Energiespeicher zwischen 50 und 100 Sekunden für die reale Anwendung in einer Uhr nicht benutzerfreundlich und praktikabel.

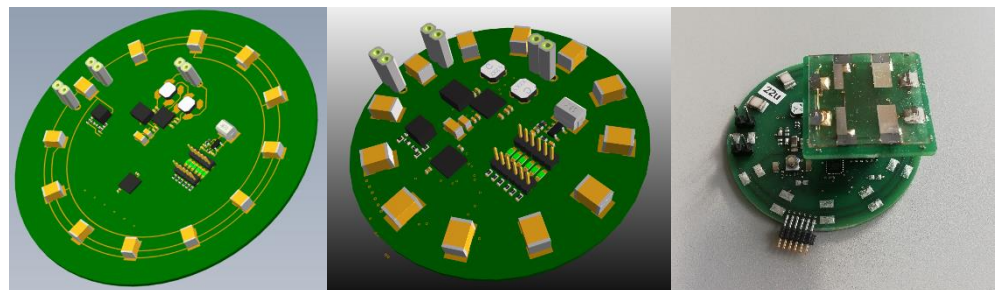


Abbildung 11 erstes 3D Model und Foto, Prototypen Testleiterplatte

Für die ersten funktionalen Tests der Schaltungsstrukturen und zum Test der Ansteuerung von Q-Dot Musterstrukturen über das Modul des Energieharvestings sowie der angeschlossenen Generatoren, wurde eine Prototypenleiterplatte entworfen und realisiert.

Für die mögliche Integration wurde erste Übersichtsschaltpläne entwickelt. Diese wurden in funktionale Blockschaltbilder untergliedert:

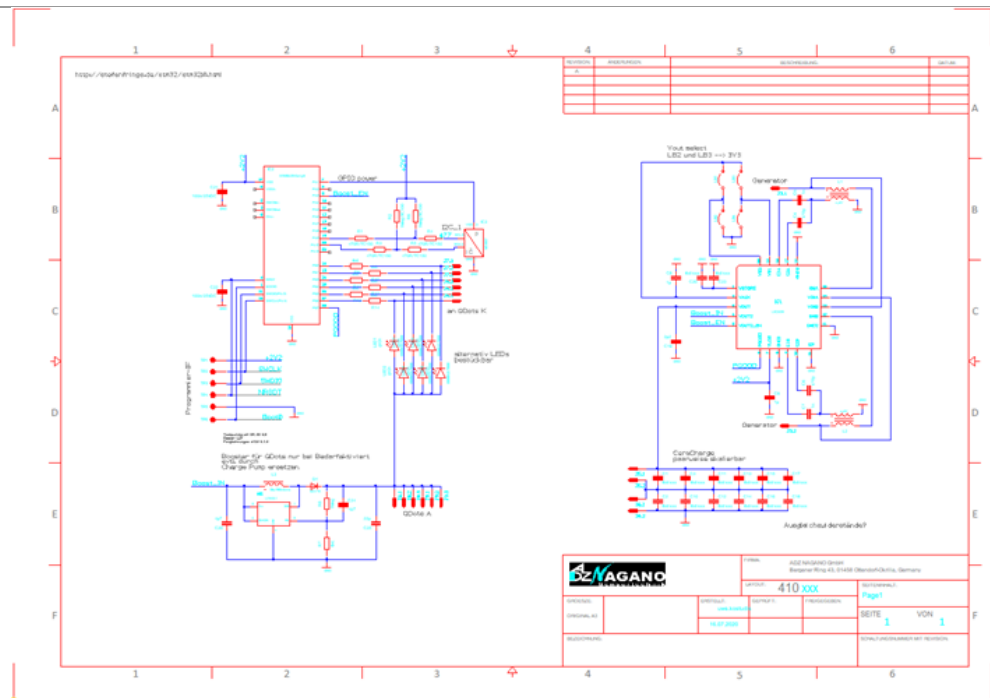


Abbildung 12 Gesamt-/Übersichtsschaltplan

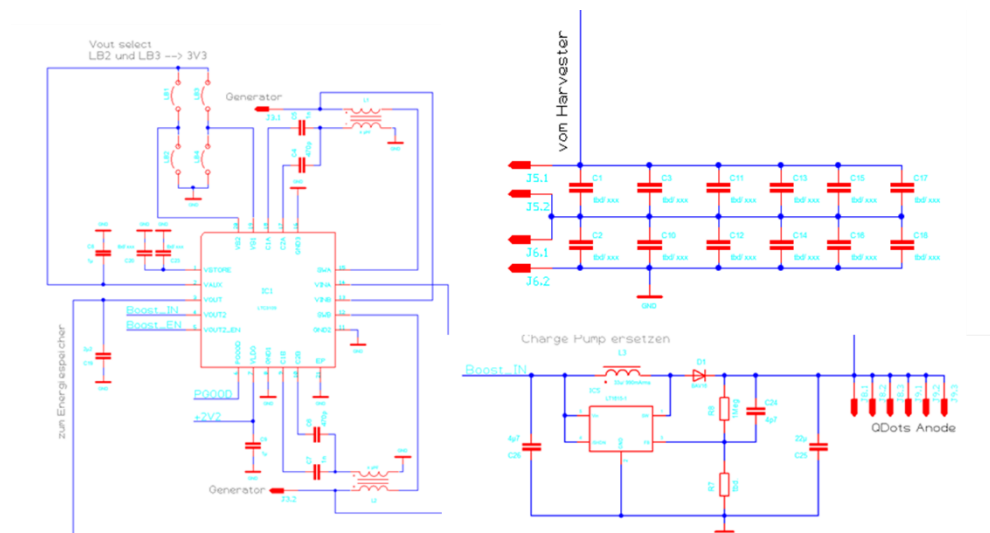


Abbildung 13 Harvester-schaltung (o.li), Energiespeicherschaltung (o.re.) und Boosterschaltung (u.re.)

Die Boosterschaltung war erforderlich, um die Q-Dots im Moment einer notwendig Signalisierung in einem Spannungsbereich von 4-6V betreiben zu können und damit ein wahrnehmbares optischen Signal zu erzeugen. Die interne  $\mu$ C-Betriebsspannung wurde aus Energiesparnotwendigkeiten heraus auf 3.3V definiert. Mit dieser Spannung sind keine optischen Signal von den Q-Dots zu erwarten.

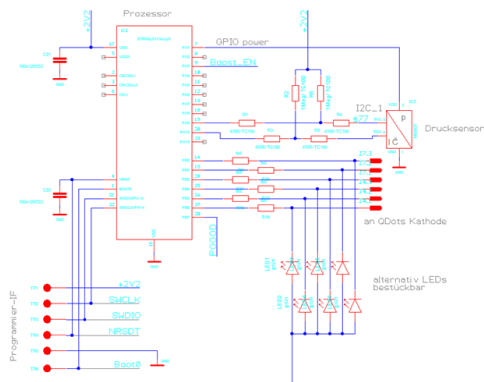
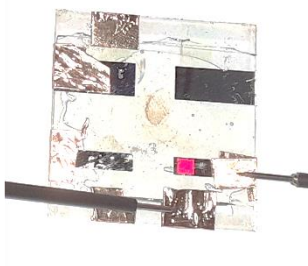
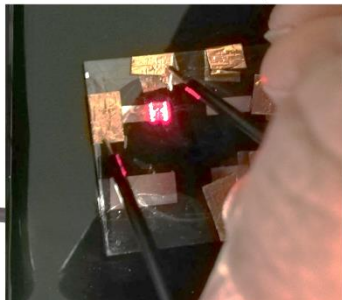
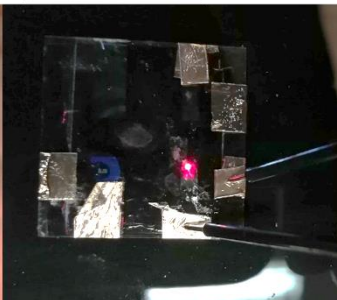


Abbildung 14 Teilschaltung µC für die Gesamtkontrolle

Als Teil der „mechanischen Bewertung“ wurde auch eine Analyse des potentiell zur Verfügung stehenden Bauraums im Uhrengehäuse sowie die benötigten Bauelemente durchgeführt. Als Ergebnis wurde definiert, dass für bestimmte Bauelemente der Platz nicht ausreichend wird und kleinere Bauformen in Erwägung zu ziehen sind. eine Reduzierung der Dicke des Leiterplattenträgermaterials wurde ebenfalls diskutiert.

Ein Teil der Arbeiten in diesem AP waren als Vorarbeit zu späteren APs (AP5) bereits erfolgt.

<b>AP 5.1</b>	<b>Elektronik, Drucksensorik, Signalgeber und Energiemanagement</b> <b>5.1 Drucksensor</b>
<b>Zielstellung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recherche, Auswahl und Einarbeitung eines relevanten, am Markt käuflichen Drucksensors</li> <li>• Erarbeitung eines Druckmesssystems, welches den Anforderungen im Pflichtenheft gerecht wird</li> <li>• Packagingkonzept für Drucksensor erarbeiten</li> </ul>
<b>Zielerreichung:</b>	<p>Im Kontext der Evaluierung und Bewertung der möglichen Signalisierung durch leuchtende Q-Dots wurden Muster dieser bereitgestellt. Erste Tests wurde mit stationärer Spannungsversorgung durchgeführt.</p> <div data-bbox="453 1563 1442 1899"> <div data-bbox="453 1563 762 1899"> <p>DUT1 am 9. März 2020</p>  </div> <div data-bbox="762 1563 1104 1899"> <p>DUT1 am 24. April 2020 Fläche leuchtet nicht mehr homogen</p>  </div> <div data-bbox="1104 1563 1442 1899"> <p>DUT2 am 24. April 2020</p>  </div> </div> <p>Abbildung 15 Degradierung der erten Q-Dot Muster</p> <p>Beim Test dieser ersten Muster wurde sichtbar, dass zu diesem Zeitpunkt keine verlässlichen leuchtenden Q-Dots zur Verfügung stehen. Das degradierende Verhalten</p>

dieser ersten Muster offenbarte, dass die Handhabung dieser Strukturen wichtig für die Langlebigkeit und Zuverlässigkeit zu sein scheint.

Parallel wurden weitere Untersuchungen und Tests in Bezug auf die Harvestereigenschaften durchgeführt. Es konnten Erregerkurven für den Ladebetrieb ermittelt werden.

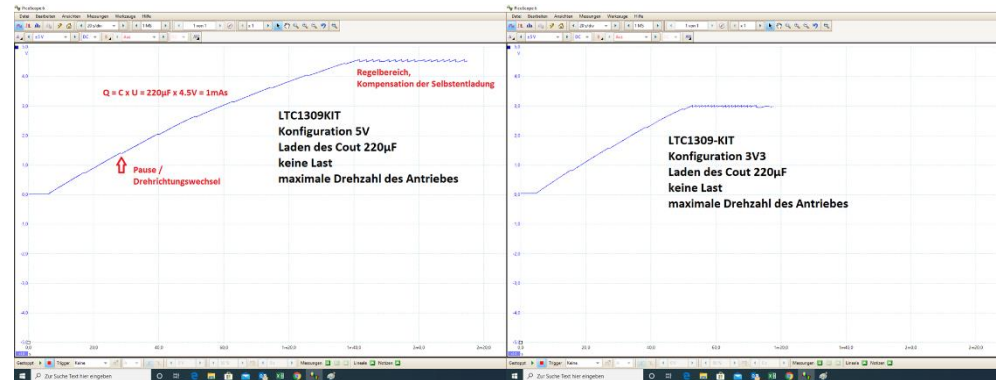


Abbildung 16 Erregerkurven für Ladebetrieb am Harvester

Für die Bewertung und Abschätzung in Bezug auf das Energiemanagement wurde eine erste Recherche hinsichtlich einsetzbarer Schaltkreise vorgenommen.

Es wurde mit Abwägung unterschiedlicher Eigenschaften wie auch der Marktverfügbarkeit die Auswahl auf STM32L getroffen. Die Wahl fiel auf diesen Baustein, da auch ADZ intern hierzu unterschiedliches Vorwissen zum Betrieb und Handhabung vorlagen.

Hersteller	STM	OnSemi	Atmel	LAPIS	ADI	Renesas
Typ	STM32L031x4	RSL10SIP	ATtiny43U	ML610Q482	ADUCM3027	R7F0E01082CFM
Registerbreite [bit]	32	32	8	8	32	32
Prozessortyp	Cortex-M0	Cortex-M3	AVR	nX-U8/100	Cortex-M3	CM0+
Speisung [V]	1.8 ... 3.6	1.1 ... 3.3	0.7 ... 5.5	1.1 ... 3.6	1.74 ... 3.6	1.62 ... 3.6
Takt [MHz]	32k ... 32M	48 MHz	0 ... 4 MHz	4 MHz	26 MHz	64MHz
32kHz-Option	x	x	---	x	x	RTC
Flash [Kbyte]	16	384	4	64	128	256
RAM [KByte]	8	76	0.25	4	64	128
Gehäusety	WLCSP 25	SIP	QFN20	SIP / SMD	WLCSP	QFN56 / WLCSP
Gehäusemaß	2.1x2.5	8x6x1.5	4x4x0.8	9x9x1 / die	2.8x2.8x0.3	4x7x0.8
I2C	1	0	1 USI	1	1	2
SPI	2	2	(1 USI)	1	3	2
UART	2	1	(1 USI)	1	1	1
Timer	8	?	2	4 (8bit)	3	12
ADC	12bit	14bit	10bit	---	12bit	14
Komparator	2 (ab 1.65V)	---	1	1 (ab 1.8V)	---	---
Besonderheiten		bluetooth (deaktiviert)	interner Booster für 0.7 ... 1.8V			

Abbildung 17 Übersicht zu Low-Power  $\mu$ Cs

Weitere Betrachtungen zum Energiemanagement und Energiehaushalt wurden in späteren APs vertieft und betrachtet. Die nötigen Vorarbeiten in diesem AP wurden erforderlich, um den Platzbedarf auch auf der Leiterplatte bewerten zu können und damit in weitere Abstimmung zum Uhrengehäusekonzept mit SUG und Fr. Mühle gehen zu können.

Für die nötige Integration eines Drucksensors wurde ebenfalls eine Recherche durchgeführt. Ausgewählt wurde ein TEMS5837 integrierter Drucksensor mit I2C Interface und abgeglichenem Signal für die Erfassung von kleinen und kleinsten Drücken.



Der Drucksensor muss im Uhrengehäuse niedergehalten werden. Dies wird voraussichtlich durch eine darüber liegende Leiterplatte bewerkstelligt.

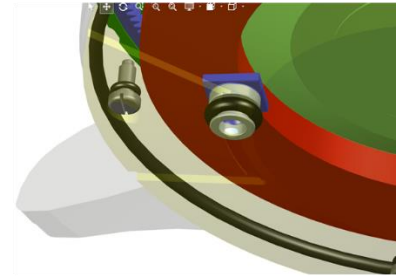
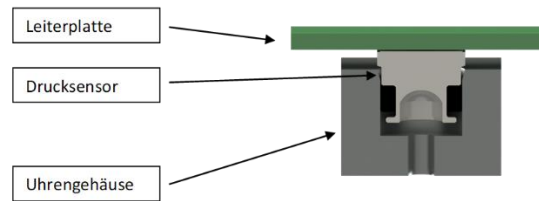


Abbildung 18 Integration Drucksensor in Uhrengehäuse

Das Konzept zur Integration und zum Packaging des Drucksensor erforderten eine enge Zusammenarbeit mit SUG, um die Geometrie und die Einbaumöglichkeiten des miniaturisierten Drucksensors im Uhrengehäuse zu bestimmen. Hier war es für ADZ erforderlich die Möglichkeiten und Optionen hinsichtlich der Uhrengehäusefertigung zu verstehen, und in Zusammenarbeit mit SUG eine geeignete Position für den Sensor zu finden. Diese Positionierung musste auch so abgestimmt werden, um die elektrische Kontaktierung auf die Hauptplatine zu ermöglichen. Abstimmungen auf das Wie und Wodurch dieser Kontaktierung waren hier zudem auch mit dem TU notwendig.

AP 5.3	5.3 Energiemanagement
<b>Zielstellung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Darstellung der Energie- und Informationsflüsse</li> <li>• Konzeption und Auslegen des Speichermediums</li> <li>• Auswahl Energiespeicher (z.B. Li-Ionen Akku, Supercap)</li> <li>• Bereitstellen eines passenden Energiepuffers</li> <li>• Charakterisierung der Puffereigenschaften</li> <li>• Funktionsnachweis</li> </ul>
<b>Zielerreichung:</b>	<p>Der Schaltungsentwurf wurde basierend auf dem zu Projektbeginn erarbeiteten o.g. Blockschaltbild zu den Informations- und Energieflüssen umgesetzt.</p> <p>Nach der von den Projektpartnern getroffenen Einigung zur Zielapplikation wurde auf Seiten der Aktorik der Fokus beispielhaft auf die von den Projektpartnern selbst entwickelten Quantum-Dots gelegt. Weitere kommerziell verfügbare Aktoren, wie akustische oder taktile, sind über die gewählte Busstruktur integrierbar.</p> <p>Die Energieversorgung des Gesamtsystems wurde in mehreren Spannungsdomänen angelegt. Der Harvester versorgt sich aus den angeschlossenen Mikrogeneratoren selbst und stellt für den Mikrorechner eine mittels Kondensatoren kurzzeitig gepufferte 3.3V-Betriebsspannung bereit. Er übernimmt außerdem das Lademanagement der CeraCharge-Speicher. Diese basieren auf einer neuartigen Festelektrolyttechnologie und erfüllen somit die Forderung des Projektpartners Mühle nach Ausschluss gängiger Lösungen mit Flüssigelektrolyt. Das benötigte Spannungsniveau wird durch Reihenschaltung zweier CeraCharge-Elemente erreicht. Die Batteriekapazität kann</p>

durch Parallelschaltung erhöht werden. Dies erfolgt vorteilhaft ohne das bei Li-Zellen erforderliche Management auf Zellebene. Beim Übergang vom Labordemonstrator zur uhrenintegrierbaren Lösung wurde die verwendete Zellenzahl aus Bauraumgründen wieder auf das Minimum zweier Zellen reduziert. Die Integration weiterer Speicherelemente in die Wandung des Uhrengehäuses ist möglich, bleibt aufgrund sehr hohen konstruktiven Aufwandes aber einer Produktentwicklung vorbehalten.

Der Harvesterschaltkreis steuert selbständig das Lade-/Entlademanagement der Festelektrolytspeicher, so dass die Pufferkapazität auf die Überbrückung minimaler Spannungseinbrüche beschränkt werden kann.

Im weiteren Verlauf wurden Übertragungskennlinien zwischen der durch die Generatoren erzeugten Spannung und der Harvesterschaltung aufgenommen und das mögliche Ladeverhalten bewertet.

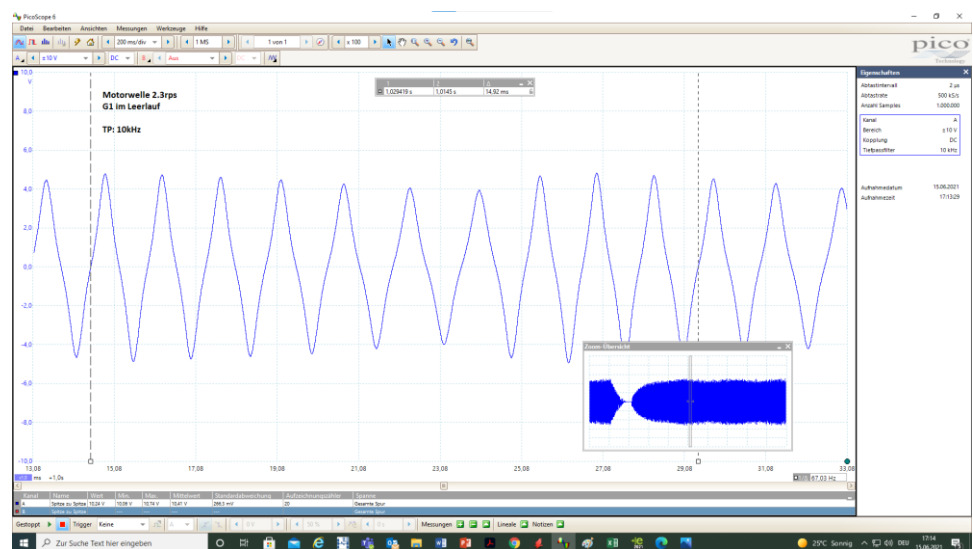


Abbildung 19 Übertragungskennlinie Harvester

Eine Anpassung der Schaltung zeigte sich hier erforderlich, da in der initialen Konfiguration keine Ladestrom gemessen werden konnte.

Mit erfolgter erster Anpassung konnten minimale Ladeströme nachgewiesen werden.

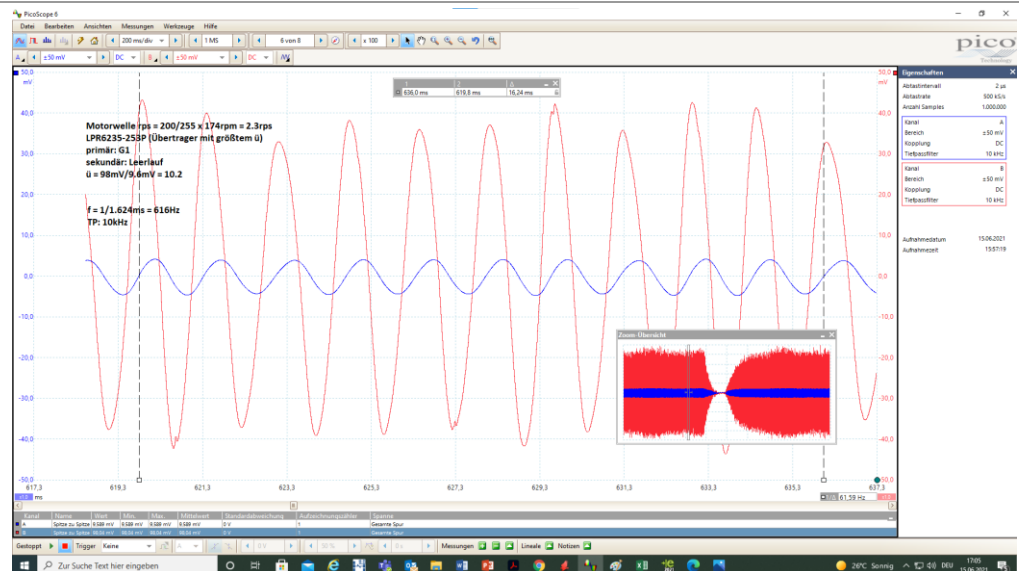


Abbildung 20 Kennlinie nach Anpassung der Harvesterschaltung / Ladeschaltung

Steht ein optisches Signal zur Ausgabe an, wird mit einem Boost-Converter für die Betriebsdauer der Quantum-Dots eigens eine erhöhte Versorgungsspannung von 4.5V erzeugt. Einerseits können die Dots so möglichst verlustarm betrieben werden, zum anderen ist eine einfache Anpassung an sich im Laufe der Fortentwicklung ändernde Betriebsspannungen der Quantum-Dots möglich.

Zur Maximierung der Betriebsdauer wird zur Steuerung der gesamten Schaltung ein Mikrocontroller mit für die Aufgaben angepasster Komplexität und ultra-niedrigem Energieverbrauch eingesetzt. Der Test der Einzelbaugruppen im Zusammenspiel war aufgrund des mangelnden Fortschritts bei der Softwareerstellung noch nicht möglich.

<b>AP 5.4</b>	<b>5.4 Auswerteelektronik</b>
<b>Zielstellung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Grobkonzept (Energiebilanzbewertung, Funktionsumfang, Integration und Implementierung der Algorithmen)</li> <li>Platzbedarfsabschätzung in der Fläche und im Raum</li> <li>Feinkonzept (Bauteilauswahl, Funktionsnachweis, Baugrößen)</li> <li>Stromlaufplan</li> <li>Leiterplattenlayout (inkl. Optimierung und Anpassung an bauliche Gegebenheiten)</li> <li>Multifunktionsintegration mehrerer Funktionsblöcke</li> <li>Test und Validierung (Energiebilanz, Funktionsumfang, Algorithmen)</li> <li>Stabilitätsuntersuchung / Bewertung unter Realumgebungsbedingungen (z.B. Temperaturwechsel, Feuchtigkeit, etc.)</li> <li>Festlegung und Bewertung der Aufbau- und Verbindungstechnik im Gesamtkonzept (Zuverlässigkeit, Langlebigkeit, Prozesssicherheit, ...)</li> </ul>
<b>Zielerreichung:</b>	<p>Das Schaltungskonzept wurde in drei Stufen umgesetzt.</p> <p>Der erste, als bestückte Leiterplatte realisierte Entwurf beinhaltet den maximalen definierten Funktionsumfang und entspricht den Forderungen an eine gut testbare Laborplatine. Gleichwohl wurde bereits hier auf einem Durchmesser von 50mm die spätere Bauform vorweggenommen und der später verfügbare Bauraum nach</p>

Möglichkeit berücksichtigt. Da die Eignung und Dimensionierung zahlreicher Bauelemente noch nicht festgestellt war, wurden ggf. verschiedene Bauteilvarianten berücksichtigt, z.B. bei den Miniaturtransformatoren. Dieser Entwurf wurde gefertigt, bestückt und für erste Tests verwendet.

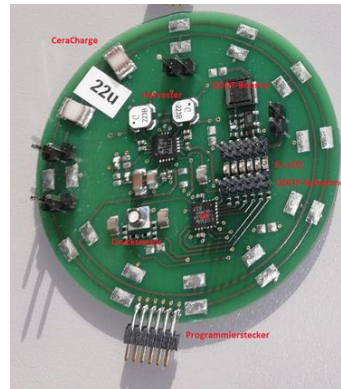


Abbildung 21 Erste Ausbaustufe / Variante Testschaltung

In einem zweiten Schritt und nach Abschluss der Bauraumdiskussion sowie der Festlegung des Anschlusskonzeptes der peripheren Elemente Drucksensor, Schalter und Anzeige erfolgte eine Reduktion auf die später im Demonstrator einzusetzenden Bauelemente, also der Wegfall von Bestückoptionen und Teststeckern sowie eine wo immer vertretbare Verwendung der minimal verfügbaren Bauform. Ziel war die Realisierung auf der finalen Kreisscheibe mit 36.6mm Durchmesser. Dieser Entwurf wurde nicht umgesetzt.

Im Verlaufe der Feinumsetzung und Ausverdrahtung des Entwurfes zeigte sich, dass eine maximale Miniaturisierung aller Bauelemente für die Einhaltung des Bauraumes nicht erforderlich war. So konnte bei passiven Bauelementen von der Bauform 0201 auf 0402 zurückgegangen werden. Dies und die damit verbundenen Strukturbreiten gestatteten die Umsetzung der Schaltung im Rahmen von Standardtechnologien der SMT-Montagetechnik. Weiterhin gelang es, die Anzahl der benötigten Leiterebenen von 4 auf 2 zu reduzieren. Gewählt wurde ein starrer Aufbau von 0.5mm Dicke. Damit liegt die Leiterplatte selbsttragend im Bauraum und wird von den benachbarten Bauteilen mechanisch gefangen. Dieser Entwurf wurde als finales Design gefertigt und bestückt.

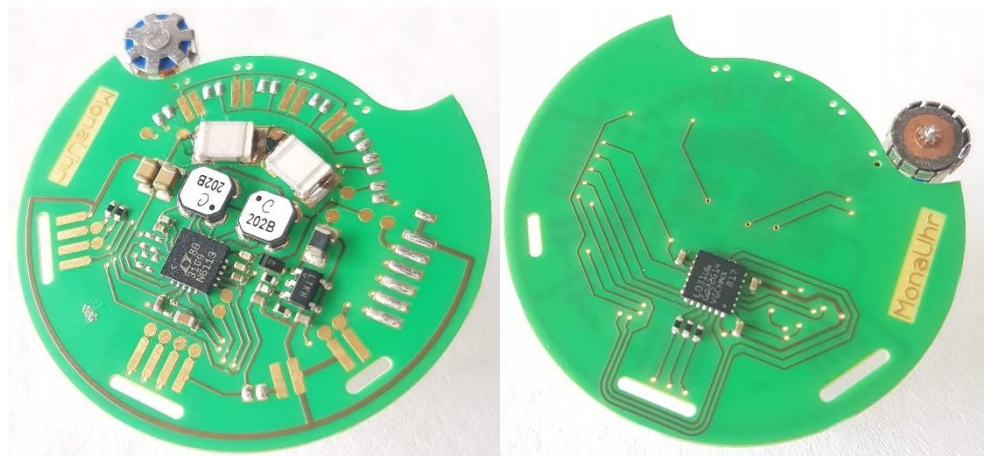
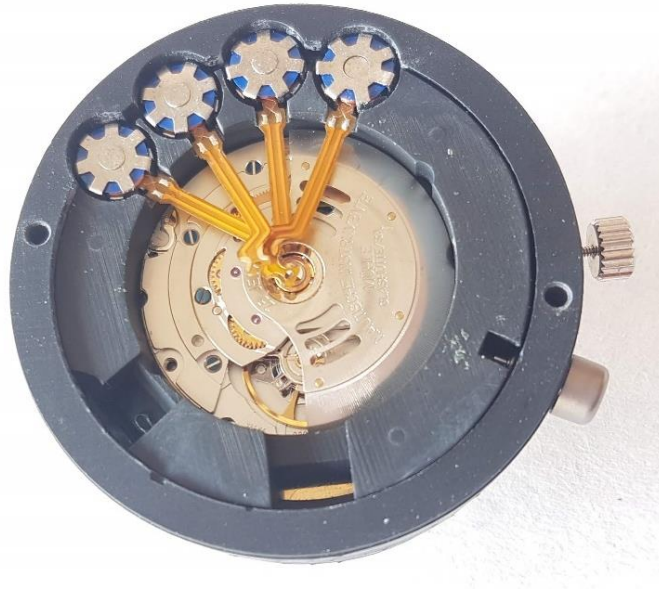


Abbildung 22 Vorder- und Rückseite der bestückten finalen Lösung, hier mit einem Generator

<b>AP 5.5</b>	<b>5.5 Algorithmenentwicklung</b>
<b>Zielstellung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erstellung Inbetriebnahmesoftware (embedded) und Auswertealgorithmen für luftdruckabhängige Warnfunktionalitäten</li> <li>• Anbindung der optischen und der mechanisch/akustischen Signalausgabe</li> <li>• Test- und Prüfroutinen zum Nachweis der Primärfunktionen</li> </ul>
<b>Zielerreichung:</b>	Für die Softwareentwicklung wurden alle benötigten Hardwareeigenschaften berücksichtigt und umgesetzt und die Funktion in der Entwicklungsumgebung bestätigt. Die im Programm umzusetzenden Abläufe wurden gemeinsam mit den Projektpartnern diskutiert und festgelegt. Die eigentliche Codierung des Programmablaufs als ausführbares Programm konnte jedoch noch nicht umgesetzt werden.

<b>AP 7</b>	<b>7 Herstellung des Demonstrators</b>
<b>Zielstellung:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herstellung des elektronischen Sensor-/Aktorsystems (Elektronik, Drucksensor, mechanisch/akustischer Signalgeber, Energiespeicher)</li> <li>• Unterstützung bei Integration und Einbau der Komponenten</li> <li>• Anpassung der Hilfsmittel und Werkzeuge (elektrisch, elektronisch)</li> <li>• Programmierinterface (Integration in Fertigungsprozesse)</li> <li>• Funktionstest</li> <li>• Zuarbeiten der Konstruktionsunterlagen und Stromlaufpläne</li> <li>• Funktionsnachweise und Prüfungen sowie Test (Lebensdauer, Drift, Langzeitstabilität, EMV) → Zertifikate/Zulassungen?</li> </ul>
<b>Zielerreichung:</b>	Die Montierbarkeit aller Baugruppen wurde von den Projektpartnern in zahlreichen Diskussionen sowie mit konsequenter Nutzung von 3D-Konstruktionstechniken abgestimmt. Diktiert von den Montageabläufen einer mechanischen Uhr wurde vom ursprünglichen Konzept eines einzigen flexiblen Schaltungsträgers abgewichen und eine Variante aus Schaltungsträgern und Verbindungselementen gewählt. Dies bedingt Kontaktierungsschritte durch Leitleben und ggf. Löten im Rahmen der Fertigung. Hierfür erforderliche Aufnahmen und Hilfsmittel wurden zwischen den Projektpartnern abgestimmt.



*Abbildung 23 Gehäusedummy / Positionierhilfe mit maximaler Anzahl an Generatoren bestückt.*

Der Entwurf des Schaltungsträgers berücksichtigt Aspekte der sukzessiven Test- und Programmierbarkeit im Rahmen des Aufbaus durch zahlreiche Kontaktpunkte.

Das Programmierinterface ist zum Betrieb mit den vom Controllerhersteller bereitgestellten Werkzeugen ausgelegt und kann sowohl im Labor permanent als auch im Demonstrator durch Antasten kontaktiert werden.

Für die alle Entwicklungsstände einschließlich des Demonstrators wurden die branchenüblichen Designunterlagen, wie Gerber-Files, 3D-Modelle erzeugt.

Als Schwerpunkte für die Zuverlässigkeitseigenschaften des Demonstrators wurden das Alterungsverhalten der QDOTs über Lebenszeit auf gegenwärtigem Entwicklungsstand sowie die Stabilität der elektrischen Verbindungen zwischen Schaltungsträger und Peripherie identifiziert. Die Dauerhaftigkeit der CeraCharge-Energiespeicher über viele Ladezyklen muss noch nachgewiesen werden, wird vom Hersteller jedoch optimistisch eingeschätzt. Für die übrigen Bauelemente sind aufgrund der Herstellerangaben industrieübliche Einsatzzeiten zu erwarten.



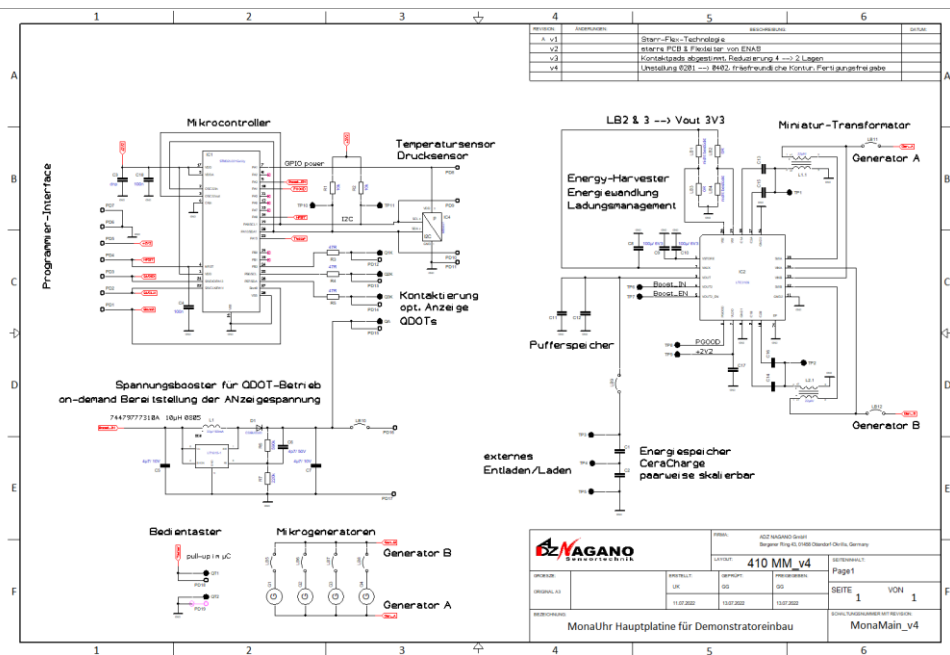


Abbildung 24 Schaltplan des finalen Designs

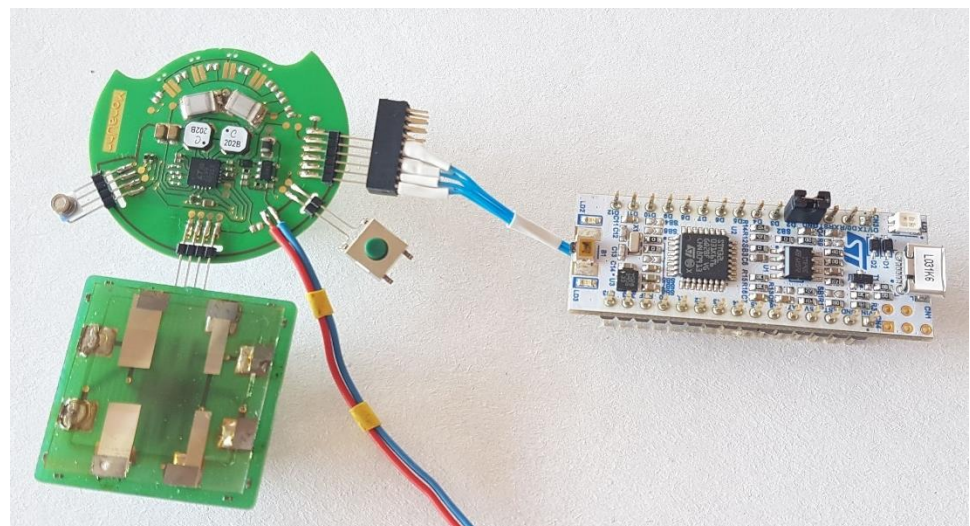


Abbildung 25 Finaler Schaltungsträger mit QDOT-Testaufbau, Eingabetaster, Druck- & Temperatursensor und Programmieradapter. Externe Speisung für Laborbetrieb.


Ein finaler Aufbau eines kompletten Demonstrators war im Rahmen der Projektlaufzeit nicht möglich.

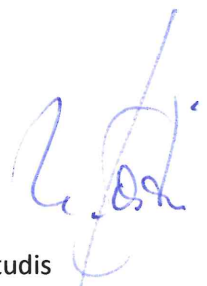
### 3. Verwertungsplan

- *Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises*

Im zahlenmäßigen Nachweis sind keine besonderen Auffälligkeiten kenntlich zu machen. Bemerkenswert ist ggf., dass die Personalkosten das geplante Budget leicht übersteigen, obwohl einen Teil der Projektziele nicht erreicht worden ist. begründet werden kann dies unter anderem damit, dass im Rahmen der Projektbearbeitung insbesondere im Themenfeld des Energieharvestings, sowie einzelner mechanischer Adaptierungen unerwartet größere Hindernisse aufgetreten sind, welche auch nicht auf kurzem Wege beseitigen liesen. Die Schaltungstechnischen Probleme in Bezug auf Energiespeicher und deren konkreter Einsatz, war so in der Komplexität nicht zum Zeitpunkt der Planung einschätzbar.

- *Die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten*  
Um die essenziellen Zielvorgaben auch seitens der Projektpartner und der beteiligten Forschungseinrichtungen zu bearbeiten und einer Zielerfüllung möglichst nahe zu kommen, war es erforderlich auch bzgl. der personellen Aufwendungen, teils mehr Einsatz zu erbringen. In Bezug auch auf die Gegebenheit um die neuheitlichen Q-Dots, deren Integration und Ansteuerung ergaben sich erhöhte Aufwendungen und Bearbeitungsaufwand.
- *Der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses – auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft – im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes*  
Der zu Projektbeginn aufgestellte Verwertungsplan, wird seitens ADZ NAGANO weiterhin als denkbar und realisierbar eingeschätzt. Die Erfahrungen in Bezug auf Themen des Energieharvesting könnten unter Umständen in besonderen Einsatzfeldern zum Einsatz kommen. Vermutlich nicht in der konkreten im Projekt erarbeiteten Lösung, aber Lösungsansätze können weiterentwickelt und eingesetzt werden.  
Inwiefern der Einsatz der Q-Dots in konkreten und zeitlich in absehbarer Zukunft realistisch ist, kann ADZ nur sehr begrenzt einschätzen. Die Marktfähigkeit und die Herstellprozesse zu dieser Technologie sowie die Skalierbarkeit und die Herstellkosten werden dort mittelfristig entscheidend sein.
- *Der während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen*  
Uhren oder der Einsatz von Q-Dots in ADZ-typischen Projekten oder Produkten als abgesonderte Einsatzfelder ist unwahrscheinlich. Eventuell kann in weiteren Projekten der konkrete Einsatz in anderen Einsatzfelder weiter beleuchtet werden.  
Allgemein kann bemerkt werden, dass das Wissen um neuartige Technologien in der Kooperation mit den Projektpartnern äußerst interessant ist, und ganz allgemeine einen nicht bezifferbaren Mehrwert haben kann. Dieser kann selten direkt und auch nicht mit direktem Projektbezug nachgewiesen werden, kann aber bei Kundengesprächen oder anderen Projekten Einfluss finden.
- *Die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF*  
Es sind keine projektbezogenen Veröffentlichungen vorgenommen worden oder in naher Zukunft geplant.

28.02.2023   
Datum, Hannes Georgi  
Leiter Entwicklung, Projektleitung

28.2.23   
Datum, Uwe Kostudis  
Elektronikentwurf, Berichtersteller