



Technische Universität München
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Professur für Mikrostrukturierte Mechatronische Systeme

Energy Harvesting in der Praxis

Anwendungen auf Basis piezoelektrischer PVDF-Folien

Sherif Adel Thabet Keddis

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. habil. Erwin Biebl

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Norbert Schwesinger
2. Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Becherer

Die Dissertation wurde am 25.11.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am 20.06.2020 angenommen.

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei allen bedanken, die diese Arbeit ermöglicht haben und an deren Gelingen beteiligt waren.

An erster Stelle gilt mein besonderer Dank meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Norbert Schwesinger, der mir die Möglichkeit gegeben hat, diese Forschungsarbeit an seiner Professur durchzuführen. Seine Unterstützung, sowohl im wissenschaftlichen Rahmen als auch bei privaten Angelegenheiten, schätze ich sehr.

Für die Mühe und die Zeit, die mit dieser Aufgabe verbunden sind, möchte ich Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Becherer als Zweitgutachter sehr danken.

Auch Herrn Günther Beckmann will ich danken, der dieses Projekt stark gefördert hat und immer an mich geglaubt hat.

Mein Dank gilt ebenso meinen Kollegen aus der Professur für Mikrostrukturierte Mechatronische Systeme und dem Lehrstuhl für Technische Elektrophysik, insbesondere Sandy Zähringer, Enrico Bischur, Lars Seyfert, Stefan Schaub und Tobias Binder.

Auch den zahlreichen Studenten, die an dieser Arbeit mitgewirkt haben, will ich danken. Insbesondere danke ich Rafik Mitry, der mich während dem Großteil dieser Arbeit im Rahmen seines Studiums unterstützt hat.

Zu guter Letzt danke ich meinen Eltern, die mir dieses Studium überhaupt ermöglicht haben und ohne die ich es nie soweit geschafft hätte. Meine Schwester, Nadine Keddiss, will ich an dieser Stelle namentlich nennen, da sie mich immer wieder motivieren konnte und durch Korrekturlesen und Ratschläge aktiv am Gelingen dieser Arbeit beteiligt war. Auch meiner Frau möchte ich danken, die mir immer die notwendige Unterstützung gab und die stressigen Abschnitte dieser Arbeit mitmachen musste.

Abstract

The question of if and when energy harvesters are suitable to power practical applications was the scope of this thesis. Due to the relatively high energy densities of ambient mechanical sources, two concepts based on multilayered piezoelectric PVDF-film were developed in order to harvest mechanical energies in form of fluid flow in pipes and sporadic impacts. The concepts were characterized experimentally which lead to determining optimized design configurations. To put the output of the harvesters into perspective in regards to powering wireless sensor nodes, a simple application was developed, implemented and characterized. Comparing the output of the harvesters to the consumption of this application points to limitations in the practical use of energy harvesters. The energy converted from mechanical impacts was successfully used to extend the operational life of the application up to four times. Depending on the conditions and requirements of an application, this harvester can be beneficial for practical applications. The developed concept for harvesting energy from fluid flow proved to be insufficient for practical applications.

Kurzfassung

Anhand von zwei konkreten Wandlerkonzepten wurde in dieser Arbeit diskutiert, ob und wann sich Energy Harvester für praktische Applikationen eignen. Aufgrund der relativ hohen Energiedichte von mechanischen Quellen in der Umgebung, wurden zwei Konzepte auf Basis von mehrlagigen piezoelektrischen PVDF-Folien erarbeitet, die mechanische Energien in Form von Fluidströmungen in Rohrsysteme und sporadische Druckimpulse in elektrische Energie wandeln. Die Charakterisierung dieser Konzepte erfolgte experimentell. Aufgrund der Ergebnisse konnten Designoptimierungen durchgeführt werden. Um das Potential dieser Energy Harvester für den Betrieb von praktischen Sensorapplikationen zu verdeutlichen, wurde eine einfache Funksensorapplikation entwickelt, implementiert und charakterisiert. Die Gegenüberstellung des Energiebedarfs dieses Funksensors und der bereitgestellten Energie durch die Harvester deutet darauf hin, dass der Einsatz von Energy Harvestern begrenzt sinnvoll ist. Die Energie der Druckimpulse konnte erfolgreich genutzt werden, um die Applikationsdauer bis zu vier mal zu verlängern. Abhängig von den Bedingungen und Anforderungen einer Applikation, können diese Harvester in der Praxis sinnvoll sein. Das Konzept zum piezoelektrischen Wandeln von Strömungsenergie in elektrische erwies sich als nicht ausreichend.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	1
1.1. DEFINITION VON ENERGY HARVESTING.....	1
1.2. ENERGIEQUELLEN UND WANDLUNGSEFFEKTE.....	2
1.3. EINSATZMÖGLICHKEITEN FÜR ENERGY HARVESTER	3
1.4. FORSCHUNGSFRAGE	5
1.5. GLIEDERUNG	5
2. STAND DER TECHNIK	7
2.1. ERZEUGUNG ELEKTRISCHER ENERGIE AUS DER UMGEBUNG	8
2.1.1. Piezoelektrische PVDF-Wandler	8
2.1.2. Wandeln von kinetischer Energie aus strömenden Medien	9
2.1.3. Wandeln von menschlicher Schrittenergie.....	12
2.2. BEISPIELE FÜR PERSPEKTIVISCHE EINSATZMÖGLICHKEITEN.....	17
2.2.1. Rohrüberwachungssysteme und deren Versorgung	17
2.2.2. Belegungserkennung für effiziente Steuerung und Überwachung	19
2.3. ZUSAMMENFASSUNG DES AKTUELLEN STANDS.....	21
3. PIEZOELEKTRISCHE HARVESTER FÜR DEN EINSATZ IN STRÖMENDEN MEDIEN..	23
3.1. DESIGN UND FUNKTION	23
3.2. HERSTELLUNG DER PROTOTYPEN	27
3.3. EXPERIMENTELLE CHARAKTERISIERUNG DER STRÖMUNGSHARVESTER	30
3.3.1. Messplatzaufbau	32
3.3.2. Positionierung und Fixierung der Wickel im Rohr	37
3.3.3. Elektrische Anordnung der PVDF-Lagen.....	39
3.3.4. Ermittlung einer geeigneten Anzahl von Windungen	41
3.4. MESSERGEBNISSE UND ERKENNTNISSE.....	42
3.4.1. Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Fixierung.....	42
3.4.2. Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Konfiguration der Lagen	49
3.4.3. Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Anzahl der Windungen	50
3.5. ROHRAUFNAHMESYSTEM UND VERPACKUNG	53
4. PIEZOELEKTRISCHE HARVESTER ZUR AUFNAHME VON DRUCKIMPULSEN.....	55
4.1. AUFBAU UND WIRKPRINZIP	55

4.2. SCHARNIERDESIGN UND –DIMENSIONIERUNG.....	57
4.3. WICKELHERSTELLUNG	60
4.4. EXPERIMENTELLE CHARAKTERISIERUNG DER DRUCKHARVESTER.....	61
4.4.1. Versuchsaufbau und Messmethode	61
4.4.2. Untersuchung der Ausgangsenergie.....	62
4.4.3. Charakterisierung von Alterungserscheinungen	63
4.5. RESULTATE UND DISKUSSION	64
4.5.1. Auswertung des Energieoutputs.....	64
4.5.2. Abhängigkeit des Outputs von der Zyklenzahl.....	70
4.6. ENERGIEMANAGEMENT.....	73
4.6.1. Gleichrichter	73
4.6.2. Energieübertragung	74
4.7. ALTERNATIVE IMPLEMENTIERUNG DES DRUCKHARVESTERS	79
4.7.1. Aufbau	79
4.7.2. Untersuchung der Ausgangsenergie in Abhängigkeit vom Volumen.....	80
4.7.3. Untersuchung der Ausgangsenergie in Abhängigkeit von der Dehnung.....	83
5. PERSPEKTIVISCHE APPLIKATION – AUTARKE SENSOREN	85
5.1. ANALYSE DES ENERGIEVERBRAUCHS.....	86
5.1.1. Energieverbrauch des Sensors.....	86
5.1.2. Energieverbrauch des Rechners	87
5.1.3. Energieverbrauch des Funkmoduls.....	88
5.2. IMPLEMENTIERUNG	90
5.2.1. Detektionsimplementierung.....	90
5.2.2. Implementierung der Energieversorgung	92
5.3. RESULTATE.....	92
5.3.1. Speicheraufladung.....	93
5.3.2. Energieverbrauch.....	95
5.3.3. Energiebilanz.....	97
6. ZUSAMMENFASSUNG, FAZIT UND AUSBLICK.....	105
LITERATURVERZEICHNIS	111
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	121
TABELLENVERZEICHNIS.....	125
SYMBOL- UND ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	127

LISTE DER VERÖFFENTLICHUNGEN.....	131
--	------------

1. Einleitung

Seit Beginn des jetzigen Jahrhunderts steigt die Anzahl drahtloser Sensoren stetig und rapide [1]. Mit einem zunehmenden Interesse an vernetzten Objekten, dem sogenannten Internet der Dinge (IoT), ist die Anzahl der eingesetzten drahtlosen Sensoren fern von einer Sättigung. Das führt zur Herausforderung, die enorme Anzahl an verstreuten Systemen mit Energie zu versorgen. Hauptsächlich werden solche Sensoren mit Hilfe von Batterien versorgt. Die Selbstentladung und die begrenzte Energiedichte dieser Energiequellen schränken jedoch deren Einsatzdauer als Versorger ein. Abhängig von der Anwendung kann der wartungsfreie Einsatz der Sensorknoten mehrere Jahre übersteigen [2]. Aus diesem Grund ist eine alternative Versorgungsmöglichkeit notwendig, um einen unterbrechungsfreien Betrieb über die gesamte Lebensdauer zu ermöglichen.

1.1. Definition von Energy Harvesting

Energy Harvesting ist die Technik, verfügbare Energie aus der direkten Umgebung eines Systems aufzunehmen und in nützliche elektrische Energie zu wandeln. Da Energy Harvesting die Möglichkeit der langlebigen Versorgung von elektrischen Systemen eröffnen könnte, hat es in den vergangenen Jahrzehnten eine erhöhte Aufmerksamkeit bekommen. Energy Harvesting nutzt ähnliche Konzepte wie die Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen, jedoch auf einer ganz anderen Skala. Es handelt sich dabei um Energien im Millijoule-Bereich und geringer [3]. Einige Applikationen können dennoch von diesen geringen Energiemengen profitieren. Drahtlose Sensornetzwerke sind eine dieser möglichen Applikationen. Sie werden zur Überwachung von Prozess- und Systemparameter eingesetzt. Die Verlustenergie der zu überwachenden Systeme in nutzbare Energie zu wandeln, ermöglicht nicht nur den ununterbrochenen und langfristigen elektrischen Betrieb der Sensoren, sondern erhöht die Effizienz des zu überwachenden Systems, indem dessen Verlustenergie sinnvoll genutzt wird. Abhängig von ihrer Höhe, kann die gewandelte Energie den autarken Sensorbetrieb eigenständig ermöglichen oder wird zum Nachladen von aufladbaren Energiespeichern genutzt, um die Betriebsdauer deutlich zu verlängern.

1.2. Energiequellen und Wandlungseffekte

Im Vergleich zu Kraftwerken mit erneuerbaren Energien, sind Energy Harvester nicht zwangsläufig an einer Position oder einem Standort gebunden. Abhängig von dem Anwendungsfeld können unterschiedliche Energiequellen genutzt werden. Ein Überblick über mögliche Quellen und entsprechende Wandlungseffekten ist in Abbildung 1 zu sehen.

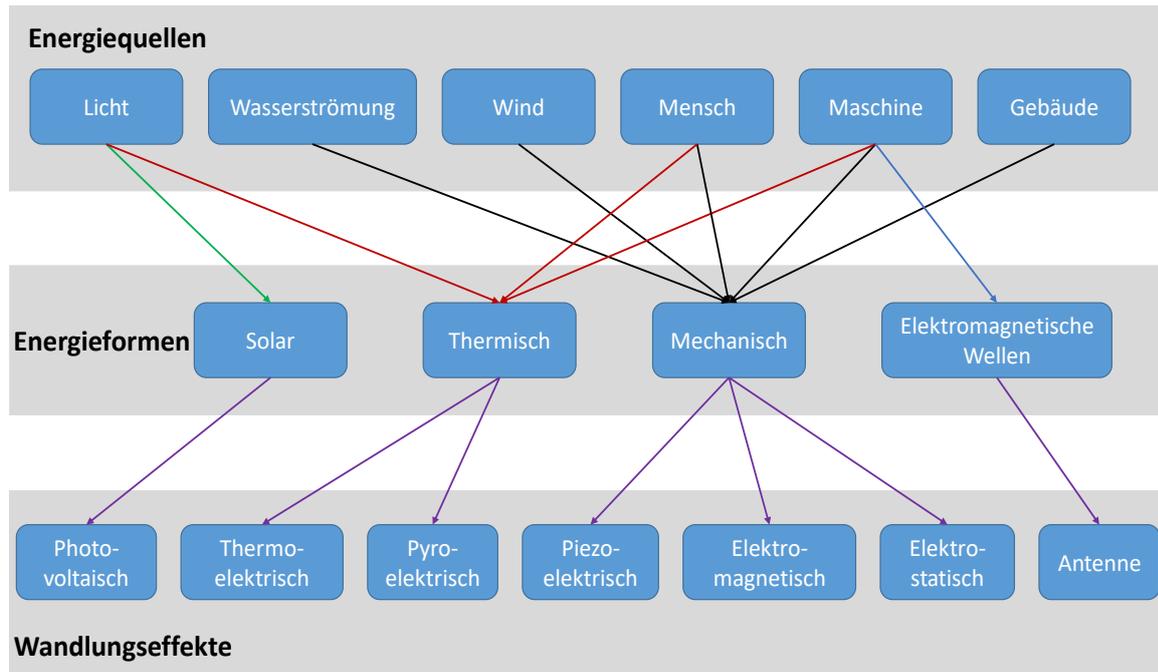


Abbildung 1: Überblick über mögliche Energiequellen und Wandlungseffekte für Energy Harvesting

Ein weiterer großer Unterschied zu den üblichen Ansätzen für erneuerbare Energie ist die Menge an elektrischer Energie oder Leistung, die von Energy Harvestern typischerweise bereitgestellt wird. Aufgrund des geringen verfügbaren Platzes beschränkt sich die Baudimension der Wandler auf wenigen Qubikzentimetern, womit sich nach Abbildung 2 eine Ausgangsleistung im Bereich von mehreren hundert Mikrowatt bis zu wenigen Milliwatt erwarten lässt [4]. Abgesehen von Sonnenstrahlung im Außenbereich, die zu einer zeitlich und örtlich stark eingeschränkten Energiegewinnung führt, bieten mechanische Quellen die höchste Energiedichte. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit auf Harvesteransätze zum Wandeln von mechanischer in elektrischer Energie vertieft eingegangen. Die mechanischen Quellen teilen sich hauptsächlich in Druckbelastungen und Vibrationen auf. Von den möglichen Effekten für eine mechano-elektrische Wandlung aus Abbildung 1 bietet der piezoelektrische Effekt ausschlaggebende Vorteile für das Energy Harvesting. Diese sind Skalierbarkeit, Wartungsfreiheit und eine einfachere Herstellung der Wandler.

Piezoelektrische Materialien, die für die Wandlung genutzt werden können, gibt es als Keramiken, z. B. Blei-Zirkonat-Titanat (PZT), oder als Polymere, z. B. Polyvinylidendifluorid (PVDF). Da Keramiken sehr brüchig sind, eignen sie sich nur bedingt für einen langfristigen Betrieb unter hohen mechanischen Belastungen. Aus diesem Grund beschränkt sich diese Arbeit ausschließlich auf Polymere, nämlich PVDF. PVDF ist ein thermoplastischer Fluorkunststoff mit guter thermischen und chemischen Beständigkeit. Durch Strecken des Materials und Anlegen eines starken elektrischen Feldes entlang der Dicke, wird das Material unter Temperatureinfluss polarisiert und somit piezoelektrisch [5]. Die monoaxial gestreckte PVDF-Folie bietet gegenüber anderen piezoelektrischen Materialien eine hohe mechanische Robustheit, günstige Herstellungsmöglichkeiten sowie ausgeprägte sensorische Eigenschaften.

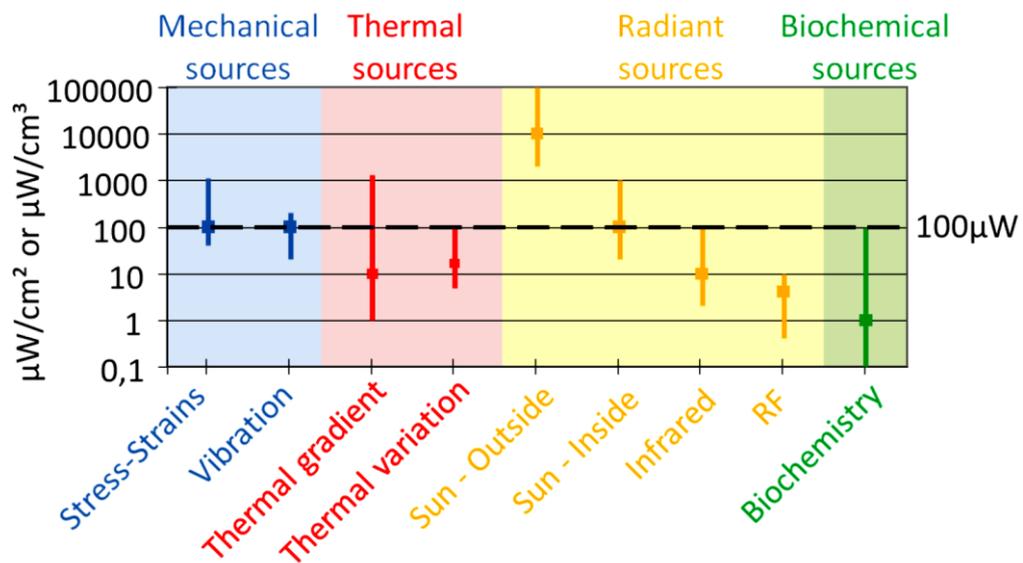


Abbildung 2: Typische Energiequellen für Energy Harvester und deren Leistungsdichten [4]

1.3. Einsatzmöglichkeiten für Energy Harvester

Um trotz der geringen Energiemengen, die Energy Harvester liefern, einen signifikanten Mehrwert durch deren Einsatz zu realisieren, ist es zwingend notwendig geeignete Applikationen zu finden. Im Vergleich zur Batterie, dem direkten Konkurrent, sind die Technologien des Energy Harvestings noch nicht ausgereift. Dadurch ist deren Einsatz mit einem größeren technischen und finanziellen Aufwand verbunden. Aus diesem Grund sind sinnvolle Applikationen nur solche, wo ein Batteriebetrieb nicht möglich oder ungenügend ist. Ungenügend ist ein Batteriebetrieb vor allem dann, wenn die Batterie vorzeitig entladen wird und ein Austausch unökonomisch ist. Das ist mit steigenden Stückzahlen der Fall aber

auch bei Applikationen, die entweder unzugänglich sind oder ständig in Bewegung sind. In diesen Fällen steigt der Wartungsaufwand für die Batteriewechsel und der Einsatz eines Energy Harvesters wird berechtigt.

Eine Applikation, die einen durchgehenden Batteriebetrieb ausschließt, ist die Überwachung des Trinkwassers in geschlossenen Rohrsystemen. Die Funksensoren, die die Messdaten kabellos versenden, müssen für eine genaue Messung in direktem Kontakt mit dem Medium sein und werden deswegen im Inneren des Rohrs platziert. Das schließt eine Netzversorgung dieser Sensoren aus, insbesondere wenn größere Rohrumbaumaßnahmen und Undichtigkeiten vermieden werden sollen. Desweiteren sind Rohrsysteme meist im Untergrund oder hinter Wänden geführt, sodass diese unzugänglich sind und ein Batterieaustausch erschwert wird. Ein Harvester im Rohrinnen, der die kinetische Energie des strömenden Mediums in elektrische Energie wandelt und dadurch einen langfristigen und wartungsfreien Betrieb ermöglicht, wird in dieser Arbeit diskutiert. Dadurch entsteht eine Möglichkeit für eine flächendeckende, echtzeitfähige und wartungsfreie Überwachung der Trinkwasserversorgung.

Der zweite Fokus dieser Arbeit liegt auf der Wandlung sporadischer Druckimpulse in nutzbare elektrische Energie. Diese Druckimpulse treten bei einer räumlichen Bewegung von Personen oder Gegenständen auf. Die Erfassung solcher Druckimpulse, um Objekte zu lokalisieren oder Bewegungen und Belegungen zu detektieren, stellt eine sinnvolle Applikation für Energy Harvester dar. Da die Personen und Objekte ständig in Bewegung sein können ist für eine genaue Erfassung deren Position eine große Anzahl an Sensoren notwendig. Das führt zu einem enormen Verkablungsaufwand für netzbetriebene Sensoren oder Wartungsaufwand für den Austausch von batteriebetriebenen Sensoren. Sind die Sensoren an den bewegten Objekten gekoppelt, so stellt das eine weitere Hürde für die Wartung dar. Aus diesem Grund ist der Einsatz eines Energy Harvesters sinnvoller als ein reiner Batteriebetrieb. Durch die Wandlung der auftretenden Druckimpulse stellen die Harvester nicht nur den autarken Betrieb sicher, sondern übernehmen gleichzeitig die Sensorfunktion. Diese Multifunktionalität berechtigt den Einsatz solcher Wandler noch weiter. Insbesondere bewegte Objekte, die nicht an das Stromnetz gebunden sind, würden von Energy Harvestern profitieren, da bei steigenden Stückzahlen der Wartungsaufwand für den Batteriewechsel stark ansteigt und ein Batteriebetrieb somit unökonomisch wäre.

1.4. Forschungsfrage

Diese Arbeit untersucht zwei Harvestingkonzepte für die in Abschnitt 1.3 genannten Einsatzmöglichkeiten. Ziel dieser Untersuchungen ist es, festzustellen, inwieweit sich diese Konzepte für praktische Applikationen eignen. Da in der Praxis oft unvorhersehbare Randbedingungen und Parameter auftreten, werden diese Ansätze experimentell untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sollen Aufschluss geben, ob und unter welchen Bedingungen Energy Harvesting praxisrelevant sein kann. Hürden und Einschränkungen dieser Technologie sowie die Einschätzung von deren Marktreife werden im Verlauf dieser Untersuchungen aufgedeckt und diskutiert. Schließlich stellt sich die grundlegende Frage: Ist Energy Harvesting nur ein aktueller wissenschaftlicher Hype oder gibt es sinnvolle Applikationen?

1.5. Gliederung

Um diese Frage zu beantworten, werden nach der Diskussion des Standes der Technik im zweiten Kapitel die zur Untersuchung avisierten Harvesterkonzepte als alleinstehende Projekte in Kapitel drei und vier behandelt. Innerhalb dieser Projekte wird im Rahmen dieser Arbeit die Konzipierung und Herstellung der Wandler beschrieben. Für die Charakterisierung werden in darauffolgenden Abschnitten die Messplätze und Experimente beschrieben. Für die Harvester in Rohrsystemen wird eine geeignete Aufnahme- und Verpackungsmöglichkeit vorgestellt. Für die Druckimpulswandler wird die Regulierung und das Speichern der gewandelten Energie durch den Einsatz von effizienten Energiemanagementschaltungen diskutiert. Schließlich wird ein alternativer Aufbau zum wandeln der Druckimpulse vorgestellt. Im fünften Kapitel wird eine mögliche, minimalkonfigurierte und praxisnahe Applikation in Form eines Funksensors entwickelt, implementiert und charakterisiert. Die Ergebnisse dieses Kapitels widerspiegeln den minimalen Energiebedarf einer realen Anwendung. Am Ende des Kapitels wird diskutiert, inwieweit Harvesteransätze den Energiebedarf realer Anwendungen abdecken können. Im letzten Kapitel werden die Erkenntnisse der einzelnen Arbeitsschnitte zusammengefasst und daraus das Fazit der Untersuchungen ermittelt. Auf wichtige Aspekte dieses Themas für zukünftige Weiterentwicklungen wird hingewiesen.

2. Stand der Technik

Energy Harvester wandeln aufgrund ihrer geringen Baudimensionen nur geringe Energiemengen um (vgl. Abbildung 2). Dadurch sind sinnvolle Applikationen auf Anwendungen limitiert, die einen sehr niedrigen Energieverbrauch haben. Darunter fallen beispielsweise drahtlose Sensornetzwerke. Diese werden unter anderem für Objektverfolgung [6], Militäroperationen [7], Zustandsüberwachung von Gebäuden [8] und Gesundheitsüberwachung von Menschen eingesetzt [9]. Abhängig von der zu überwachenden Größe und deren Umgebung gibt es verschiedene Harvestingansätze zum Versorgen der Sensoren [2]. Diese steigende Vielfalt an Harvestingansätzen ist in der Menge der entstandenen Publikationen und Forschungsprojekten der letzten Jahre reflektiert. Alle unterschiedlichen Ansätze zu diskutieren wäre unmöglich. Deswegen werden im Rahmen dieser Arbeit nur unmittelbar relevante Ansätze näher betrachtet. Hierfür ist dieses Kapitel in zwei Hauptteile gegliedert. Im ersten Teil werden Ansätze diskutiert, die in Bezug auf die Energiewandlung relevant sind. Im zweiten Teil wird der Stand der Technik diskutiert, der in Bezug auf die perspektivischen Applikationen relevant ist. Für die Energiewandlung sind Ansätze relevant, die mit Hilfe von PVDF mechanische in elektrische Energie wandeln. Unabhängig von dem genutzten Wandlungsprinzip werden zusätzlich Ansätze diskutiert, die die gleiche Form von mechanischer Energie wandeln (d.h. Strömungsenergien und nichtperiodische Druckimpulse). Diese Ansätze schaffen eine Vergleichsbasis für die Evaluierung der Harvester, die den Kern dieser Arbeit bilden. Wie in Abschnitt 1.3 erläutert, wird zum einen ein Harvester untersucht, der aus strömenden Fluiden in geschlossenen Rohrsystemen Energie wandelt. Diese Energie kann für die Überwachung von Trinkwassereigenschaften sinnvoll eingesetzt werden. Um die Eignung des Harvesters für diese Applikation evaluieren zu können, wird der Stand der Technik für die Überwachung der Trinkwasserversorgung in diesem Kapitel ebenso diskutiert. Der zweite Harvestingansatz wandelt Druckimpulse, die einzeln oder sporadisch auftreten können. Diese Druckimpulse treten vor allem bei einer Bewegung auf. Eine sinnvoller Einsatz der gewandelten Energie ist für eine autarke Belegungs- und Positionserkennung. Aus diesem Grund werden aktuelle Techniken für diese Applikation ebenso in diesem Kapitel diskutiert.

2.1. Erzeugung elektrischer Energie aus der Umgebung

Dieser Abschnitt beinhaltet relevante Ansätze aus der Literatur zur Erzeugung von elektrischer Energie mit Hilfe von Energy Harvestern.

2.1.1. Piezoelektrische PVDF-Wandler

Bei piezoelektrischen Materialien ändert sich die Gesamtpolarisation aufgrund innerer Ladungsverschiebung, wenn das Material mechanisch deformiert wird. Um diese Polarisationsänderung zu kompensieren und die Neutralität wieder einzustellen, fließen mit Hilfe geeigneter Elektroden entsprechende Ladungen aus der Umgebung [10]. Dieser Ladungsfluss kann in Form einer Spannung gemessen werden. Dieser Effekt kann zum Wandeln von mechanischer Energie genutzt werden. Neben dem keramischen PZT, das aufgrund der sehr hohen Piezokoeffizienten sehr häufig eingesetzt wird, bietet PVDF einige Vorteile, die den Einsatz für Energy Harvester rechtfertigen. PVDF besteht aus Fluorwasserstoff und Methylchloroform, die zusammen zu Chlordifluorethan und Vinylidenfluorid umgesetzt werden. Das Monomer Vinylidenfluorid wird dann polymerisiert um PVDF zu erhalten. Abhängig von der Anordnung der Polymerketten werden fünf verschiedene Phasen, α - ϵ , unterschieden [11]. Für piezoelektrische Anwendungen bietet aufgrund ihrer klaren Polarität die β -Phase die besten piezo-, ferro- und pyroelektrischen Eigenschaften. Als Folie wird diese Phase durch Recken des Materials erreicht, wobei ein äußeres elektrisches Feld bei erhöhter Temperatur angelegt wird. Dadurch werden die inneren Dipole stark ausgerichtet und nach Reduzierung der Temperatur in diesem Zustand „eingefroren“ [10]. Neben der mechanischen Robustheit, chemischen Resistenz und der einfachen Herstellung und Verarbeitung, besitzt PVDF eine sehr hohe g -Konstante [12]. Diese gibt das resultierende elektrische Feld in Bezug auf die mechanische Spannung an. Dadurch eignet sich PVDF als Wandler, was sich in zahlreichen sensorischen sowie generatorischen Anwendungen widerspiegelt [13]. Zum Beispiel kann PVDF eingesetzt werden, um Energie aus Vibrationen zu wandeln. Um die Eigenfrequenz der flexiblen Wandler zu erhöhen und an die Vibrationsfrequenz anzupassen, muss der Wandler versteift werden z.B. durch Laminierung. Romano nutzte einen laminierten PVDF-Biegebalken, um aus der Vibration durch fallende Wassertropfen elektrische Energie zu gewinnen [14]. Vatansever untersuchte sowohl das Wandeln von Energie von Regentropfen, als auch durch Wind und stellte fest, dass die flexiblen PVDF-Folien den PZT-Biegebalken in dem Ertrag an elektrischer Energie überlegen sind [15]. Li erweiterte diese Biegebalkenstruktur mit seitlichen Flaggen und

ordnete die PVDF-Schicht quer zur Strömungsrichtung an, um auch den Schereffekt beim Wandeln von Windenergie zu nutzen. Dadurch konnte eine zehnfache Vergrößerung der Spitzenleistung erreicht werden [16]. Wang setzte PVDF-Streifen als Teil einer Rohrwand ein, um aufgrund induzierter Druckschwankungen in der Strömung, elektrische Energie zu erzeugen. Dabei konnte er bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 1 m/s nur 7 nW erzeugen [17]. Andere Ansätze nutzen Bewegungen, die durch den Menschen erzeugt werden, um elektrische Energie zu gewinnen. Durch das Befestigen von PVDF-Streifen um den Kiefer konnte Delnavaz aufgrund der Kieferbewegung beim Kauen eine Leistung von etwa 2,75 μ W erzeugen [18]. Weiterhin gelang es Granstrom durch die Integration von PVDF-Streifen in Rucksackgurten eine durchschnittliche Leistung von 45 mW zu generieren. Diese Energie wird beim Tragen des beladenen Rucksacks während dem Gehen in dem PVDF umgesetzt [19].

2.1.2. Wandeln von kinetischer Energie aus strömenden Medien

Die Gewinnung elektrischer Energie aus strömenden Medien ist kein neues Konzept und wird seit langer Zeit als wertvolle Technologie für erneuerbarer Energie genutzt [20]. Die gleiche Idee wird auch für Zwecke des Energy Harvestings erforscht. Ähnlich wie bei den Technologien der erneuerbaren Energien schafft es Hoffmann mit Hilfe eines elektromagnetischen Ansatzes bei einer Flussrate von 20 L/min eine elektrische Energie von 720 mW zu wandeln [21]. Dabei kommt es durch den Einsatz eines rotierenden Schaufelrads in der Strömung zu einem Druckabfall von ca. 2,2 Bar über den Harvester. Die extrahierte Energie soll zum Versorgen von drahtlosen Wasserzählern genutzt werden. Abbildung 3 zeigt den Konzeptaufbau und den untersuchten Prototypen.

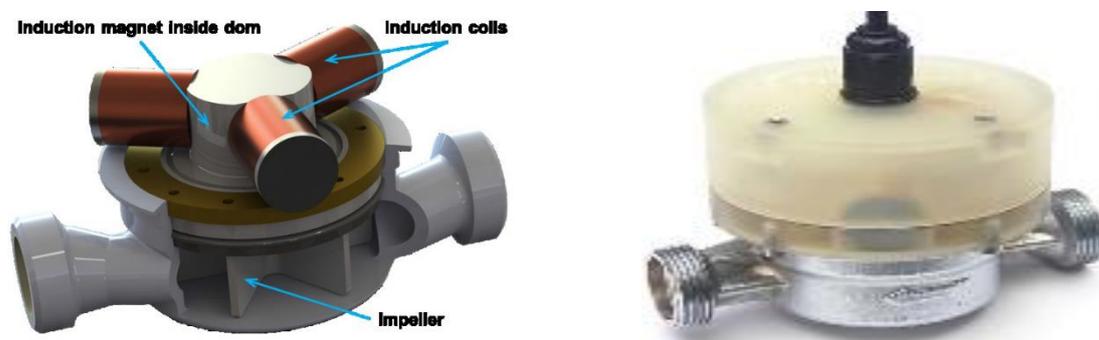


Abbildung 3: Konzept (links) und Prototyp (rechts) zum Wandeln von Strömungsenergien in Wasserrohren [21]

Weitere Ansätze basieren auf Druckschwankungen in einer Strömung oder Wirbel, die mit Hilfe eines Störkörpers in der Strömung induziert werden. Sowohl Taylor als auch Allen und

Smits untersuchten Aal-ähnliche PVDF-Streifen, die aufgrund solcher induzierten Wirbel dynamisch belastet werden [22], [23]. Durch diesen Ansatz soll es möglich sein verschiedene Strömungen, beispielsweise in Ozeanen aber auch Rohrsystemen, zu nutzen, um elektrische Energie zu generieren. Pobering und Schwesinger ermittelten die verfügbare kinetische Energie in strömenden Wasser und Gasen [24]. Dabei sind bei einer Querschnittsfläche von 1 m^2 und einer Wassergeschwindigkeit von 2 m/s ca. $1,6 \text{ kW}$ zum Wandeln verfügbar. Bei Gasen mit einer Strömungsgeschwindigkeit von 10 m/s sind aufgrund der geringeren Dichte ca. 250 W abrufbar. Das Prinzip wurde anhand eines miniaturisierten PZT-Bimorphs mit den Außenmaßen $14 \times 11,8 \times 0,35 \text{ mm}^2$ getestet. Die unoptimierte Anordnung liefert im Windkanal ca. $0,1 \text{ mW}$ bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 45 m/s . Sinnvoll eingesetzt kann dieser Ertrag genutzt werden, um beispielsweise menschliche Implantate oder unzugängliche Sensoren zu versorgen. Konkret ist ein Ansatz für Strömungsharvester als Versorgungssystem von Sensoren tief in Ölquellen von Lee et. al. untersucht worden [25]. Da die Umgebungstemperatur von bis zu 160° C ungeeignet für herkömmliche Batterien ist, kann mit Hilfe von mehreren piezoelektrischen Biegebalken eine strömungsinduzierte Vibration zur Generation von elektrischer Versorgungsenergie genutzt werden. Eine in Edelstahl verpackte bimorphe PZT-Anordnung mit den Außenmaßen von ca. $42 \times 17 \times 0,7 \text{ mm}^3$ liefert bei einer Wasserströmungsgeschwindigkeit von 20 L/min eine Leistung im Bereich von 20 mW . Abbildung 4 zeigt das eingebaute Konzept (links) und den untersuchten Wandleraufbau (rechts).

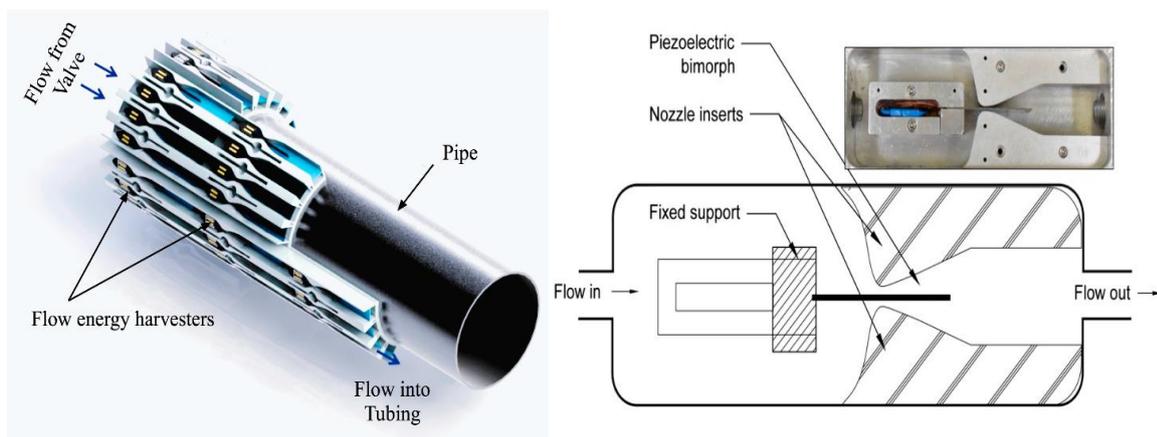


Abbildung 4: PZT-Strömungsharvester zum Versorgen von Sensoren in Ölquellen [25]

Eine weitere Untersuchung von PZT-Biegebalken zum Wandeln der Strömungsenergie nutzt statt der bimorphen Anordnung nur eine PZT-Schicht mit einer Dicke von $127 \mu\text{m}$ auf einem Edelstahlträger [26]. Die Außenmaße dieser Anordnung betragen $58 \times 10 \times 0,2 \text{ mm}^3$. Durch

eine Erweiterung mit einem hohlen Zylinder aus 0,2 mm starkem Papier mit einer Länge von 36 mm soll die Vibration des Biegebalkens verstärkt werden. Mit Hilfe eines Ventilators mit einer Windgeschwindigkeit von 5,2 m/s liefert diese Anordnung 30 μW , genug um einen Temperatursensor (MCP9700 von Microchip Inc.) zu versorgen. Weiterhin stellt die Luftströmung eine Energiequelle dar, die mit Hilfe von sogenannten „microbelts“ (PVDF-MB) bzw. Mikrobänder zur Wandlung genutzt werden kann [27]. Die PVDF-Streifen sind von Measurement Specialities Inc. und werden, wie in Abbildung 5 dargestellt, quer zur Strömung platziert. Um die Eigenfrequenz der Bänder zu reduzieren und dadurch bereits bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten zu oszillieren, werden die 20 x 2 mm² zugeschnittenen Wandler mit Hilfe von Reaktiven Ionen Ätzen (RIE) von 26 μm auf 17 μm Dicke reduziert. Um die Wandlung zu untersuchen, wurde ein Band quer zur Strömungsrichtung im Zentrum eines Rohres mit 1 cm² Querschnittsfläche fixiert und bei einer Luftströmungsgeschwindigkeit von 2,3 m/s getestet. In Abbildung 5 ist der Testaufbau zu sehen. Dieser Aufbau simuliert die Wandlung von Energie bei der menschlichen Atmung und liefert nach 12 Minuten eine Energie von 20 μWs auf einem 1 mF Speicherkondensator. Somit beträgt die extrahierbare Ausgangsleistung eines Mikrobands etwa 28 nW. Dieser Wert beinhaltet Verluste aufgrund der Gleichrichtung und Leckströme des Kondensators. Einer Vervielfachung der Leistung kann mit höheren Geschwindigkeiten erreicht werden. Ein weiterer Ansatz auf PVDF-Basis nutzt zwei 17 μm dünne Schichten, die um eine künstliche Arterie fixiert sind und kann aufgrund der Schwankungen im Blutdruck 30 nW generieren [28]. Weitere piezoelektrische Ansätze zum Wandeln von kinetischer Energie aus strömenden Medien können in der Zusammenfassung von Abrol nachgeschlagen werden [29].

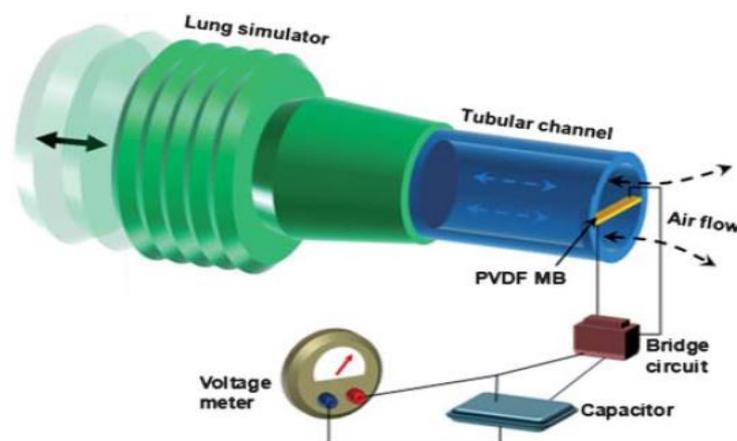


Abbildung 5: Testaufbau zum Untersuchung von Strömungsharvestern aufgrund menschlicher Atmung [27]

2.1.3. Wandeln von menschlicher Schrittenergie

Der Mensch belastet den Boden beim Gehen mit dynamischen Kräften im Bereich von 500 N bis 1000 N [30]. Dabei wird die maximale Arbeit beim Aufschlag der Ferse verrichtet. Diese Arbeit wird bei einem durchschnittlichen 68 kg schweren Mensch auf 67 W berechnet. Dabei ist die Schrittgeschwindigkeit 2 Schritte pro Sekunde und der vertikale Hub der Ferse 5 cm [31]. Zwar ist nur ein Bruchteil der resultierenden Energie wandelbar, dennoch eignet sich dieser Anteil zum Versorgen von Energy Harvesting Applikationen. Praktische Ansätze zur Wandlung dieser Schrittenergie können in zwei Gruppen aufgeteilt werden, mobile und stationäre Energy Harvester.

2.1.3.1. Mobile Harvester zum Wandeln von menschlicher Schrittenergie

Die erste Harvestergruppe wird entweder am Knöchel oder am Schuh befestigt und ist somit mit der Bewegung gekoppelt, also mobil. Einer der meistzitierten Forschungsarbeiten dieser Kategorie ist von Paradiso [32] und basiert zum Teil auf piezoelektrischer PVDF-Schichten als Schuheinlage unter den Fussballen. Diese liefern 1,3 mW bei einer Schrittfrequenz von 0,9 Hz. Der andere Teil dieser Forschungsarbeit nutzt eine Einlage aus PZT unter der Ferse, um bei gleicher Schrittfrequenz 8,4 mW an einer angepassten ohmschen Last zu generieren. Diese Leistung wird zum Betreiben eines RFID-Chips genutzt, dabei bleiben durch die Verluste des Energiemanagements weniger als 20 % übrig, um die Applikation zu versorgen. Ähnliche Resultate wurden von Zhao [33] mit einem reinen PVDF-basierten Schuhansatz erreicht. Dabei wurde festgestellt, dass die Energiegewinnung für praktischen Applikationen, wie die Versorgung von tragbaren Sensoren, nicht ausreicht, um Batterien komplett zu ersetzen. Die umgesetzte Leistung in einem angepassten ohmschen Widerstand entspricht einer Energie von 1 mWs pro Schritt. Ausgehend von den präsentierten Graphen wird die praktisch nutzbare Energie durch das Energiemanagement auf unter 10 % reduziert. Die Energy Harvester dienen somit lediglich zum Nachladen eines Akkumulators und dadurch der Verlängerung dessen Nutzungsdauer. Anders sieht es Kalantarian mit einem ähnlichen Ansatz, jedoch auf Basis von PZT [34]. Dieser Applikationsansatz nutzt den direkten Zusammenhang von Energiebedarf und Verfügbarkeit, um einen batterielosen Schrittzähler zu realisieren. Trotz nur 13,55 μ Ws pro Schritt an effektiv nutzbarer Energie, soll durch geeigneter Applikationswahl komplett auf den Einsatz von Batterien verzichtet werden. Durch das akkumulieren dieser Energie in einem Speicherkondensator soll beim Erreichen eines Schwellwerts, ein im Schuh untergebrachtes Funkmodul erwachen und dieses Ereignis

an ein Empfänger z.B. das Smartphone verschicken. Dadurch soll mit Hilfe der Anzahl an empfangenen Signalen auf die Anzahl der gelaufenen Schritte zurückgeschlossen werden. Eine Darstellung der vorgestellten Ansätze ist in Abbildung 6 zu sehen.



Abbildung 6: Verschiedene Schuhharvester-Designs von Zhao [33] (oben links), Paradiso [32] (unten links), Kalantarian [34] (oben rechts) und Kymissis [35] (unten rechts)

Weitere mobile Ansätze basieren auf andere Wandlungseffekte wie der elektromagnetische Effekt. Aufgrund der deutlich höheren Wandlungseffizienz, lassen sich bei solchen Ansätzen Energien im Bereich 180 – 230 mWs pro Schritt an angepassten ohmschen Lasten berechnen [35], [36]. Problematisch ist dieser Wandlungseffekt jedoch, aufgrund der für die relative Bewegung der Magneten zu den Spulen notwendigen großen Dimensionen. Diese sind in Abbildung 6 unten rechts zu erkennen. Mobile schuhgebundene Harvestingansätze unterliegen also dem Kompromiss zwischen der Integrierbarkeit und dem Komfort auf der einen Seite und einer ausreichenden Energieerzeugung auf der anderen.

2.1.3.2. Stationäre Harvester zum Wandeln von menschlicher Schrittenergie

Im Gegensatz zum mobilen Ansatz zum Wandeln von Schrittenergie, ist der stationäre, d.h. immobile Ansatz im Boden integriert und unabhängig von der Person, die diesen belastet. Dieser Ansatz ist im Vergleich zu den mobilen bereits kommerziell erhältlich von Unternehmen wie *Pavegen* [37] oder *Energy Floors* [38]. Indem sie die vertikale Bewegung in

eine Rotationsbewegung wandeln, können beide Produkte mit Hilfe des elektromagnetischen Effekts elektrische Energie aufgrund menschlicher Schrittbelastung bereitstellen. Abbildung 7 zeigt das Design und die Funktion des Smart-Floors der Firma Pavegen. Der dargestellte elektromagnetische Generator liefert durchschnittlich 5 Ws pro Schritt bei einem Hub von 5 mm [37], [39]. Die Tanzböden von *Energy Floors*, ebenso in Abbildung 7 dargestellt, liefern eine durchschnittliche Leistung von 2 bis 8 W durch die Bewegung einer tanzenden Person [40]. Angenommen, diese Person bewegt sich zum Takt von typischer elektronischer Musik mit ca. 120 bpm (beats per minute) so würde das einer Schrittfrequenz von 2 Hz ergeben. Somit liefert dieses Produkt etwa 1 – 4 Ws pro Schritt.

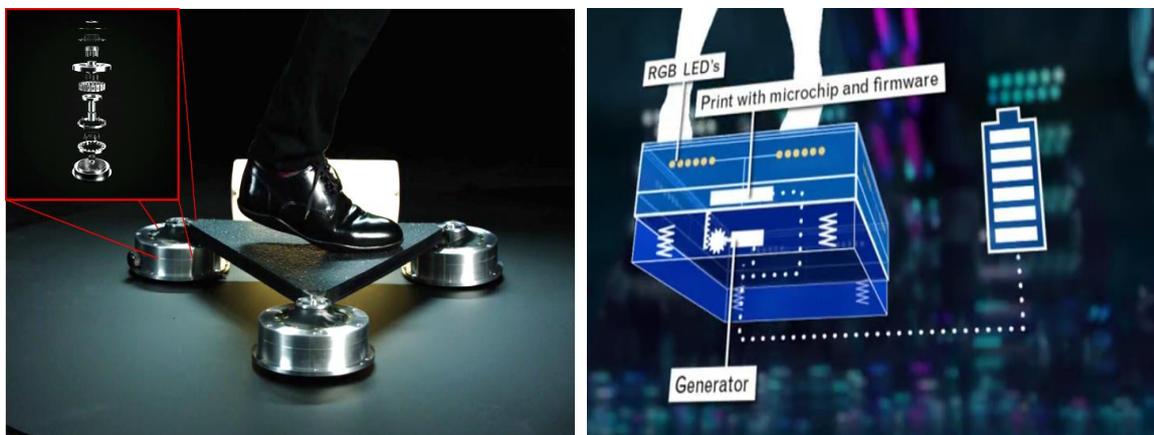


Abbildung 7: Smart-Floor Konzepte von Pavegen (links) inkl. Explosionsdarstellung des elektromagnetischen Generators [37] und Energy-Floors (rechts) [38]

Weitere Forschungsansätze mit Hilfe des gleichen Wandlungseffekts sind von Waydip aus Portugal [41]. Mit zwei Asphaltssystemen für Menschen und Fahrzeuge soll auch hier mit Hilfe erneuerbarer kinetischer Energie die Abhängigkeit von fossilen Energiequellen reduziert werden. Das erste System liefert ca. 0,3 – 0,6 Ws pro Schritt, das zweite liefert 92 Ws beim Passieren eines 2 T schweren Fahrzeugs mit zwei Rädern. Ein weiteres elektromagnetisches System soll mit Hilfe eines Schwungrads die Wandlungseffizienz verbessern und liefert bei einem Hub von nur 6 mm eine Energie von 1,8 Ws pro Schritt [42]. Das Trägheitsmoment des Schwungrads sorgt dafür, dass die Rotation des Generators länger erhalten bleibt und somit mehr Energie umgesetzt werden kann. Das Design dieses Bodenbelags ist in Abbildung 8 dargestellt.

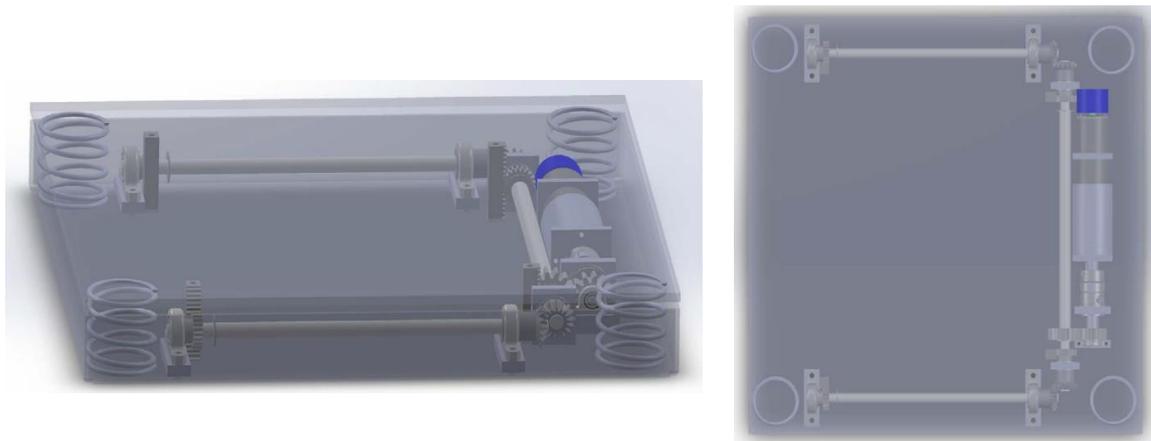


Abbildung 8: Energy Harvesting Bodenbelag mit verbesserter Effizienz durch Schwungrad [42]

Andere Ansätze zum Wandeln der kinetischen Energie im Boden nutzen den piezoelektrischen Effekt. Dieser liefert zwar eine geringere Wandlungseffizienz als der elektromagnetische, ist dagegen aber einfacher im Aufbau und bietet somit geringere Baudimensionen. Ein weiterer Vorteil solcher Ansätze ist die Wartungsfreiheit durch den Verzicht auf rotierende Teile, die vor allem beim Miniaturisieren zu hohem Verschleiß führen. Zhao verglich dafür mehrere piezoelektrische Module auf Basis von PZT, um durch eine Integration in den Asphalt elektrische Energie zu gewinnen [33]. Für diese Anwendung geeignete PZT-Designs generieren 1,13 mWs bei einer Belastung im Bereich von 0,7 MPa, die einer Kraft von etwa 630N entspricht. Diese Energieangabe bezieht sich auf die gespeicherte Energie im Material und würde sich bei Lastanpassung auf die Hälfte reduzieren. Pescas gelang es, mit Hilfe von 56 kommerziell-erhältlichen PZT-Scheiben angeordnet auf einer Fläche von $40 \times 9 \text{ cm}^2$ eine Energie von 17,7 mWs pro Schritt aus dem Harvester zu extrahieren [43]. Die Module werden mechanisch vorbelastet in einer Stufe eingebaut und liefern bei einer Deformation von ca. 1 mm genug Energie, um eine LED-Notfallbeleuchtung für 10,6 s zu versorgen.

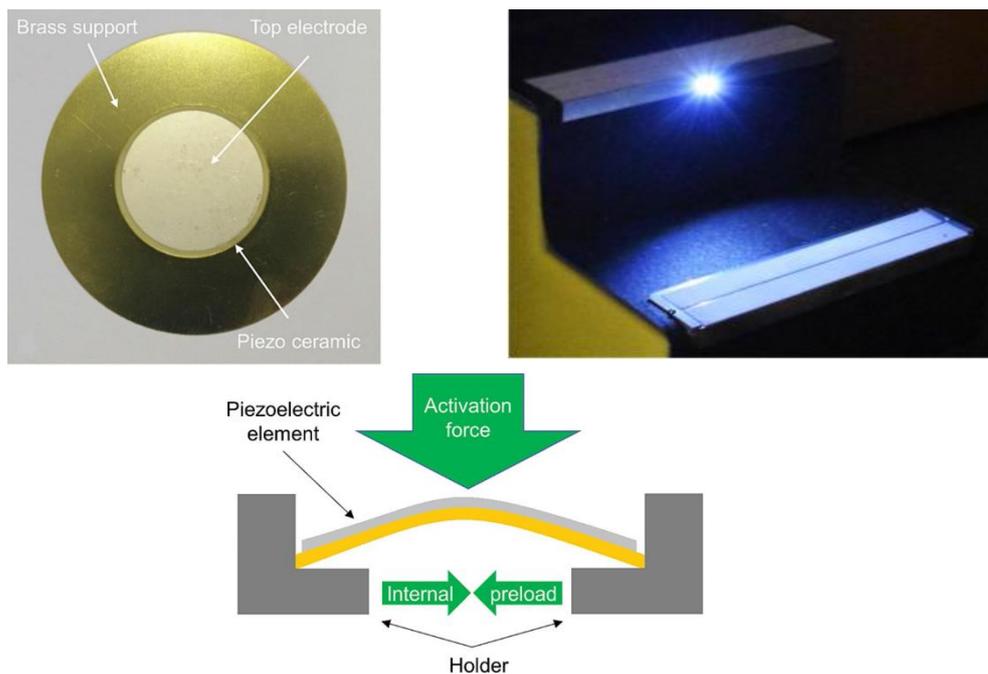


Abbildung 9: Energy Harvesting Stufen für Notfallbeleuchtung (oben rechts) mit Hilfe von PZT-Scheiben (oben links) die mechanisch vorbelastet sind (unten) [43]

In einer weiteren Forschungsarbeit von Sharpes konnte durch den Einsatz von fünf PZT-Modulen unter einer Bodenplatte mit einer Fläche von $300 \times 300 \text{ mm}^2$ eine Energie von ca. $1,29 - 2,57 \text{ mWs}$ geerntet werden, wenn der Boden mit üblichen Kräften belastet wurde [44]. Sharpes konnte mit dieser vergleichbar geringen Energiemenge erfolgreich beweisen, dass sich mit Hilfe von Energy Harvesting Böden ein bewusstes und kluges Steuern von elektrischen Verbrauchern wie Beleuchtung ermöglichen lässt. Energy Harvesting als autarker Ersatz von Netzstrom ist aufgrund der Herstellungskosten noch nicht wirtschaftlich. Laut einer kanadischen Studie würde sich ein System der Firma *Pavegen* erst nach 444 Jahre amortisieren [39].

Da PZT als Keramik sehr steif und spröde ist und somit bei starken mechanischen Belastungen Ermüdungserscheinungen bis zum Ausfall aufweist, sind die maximalen Leistungserträge und die Lebensdauer limitiert. Aus diesem Grund setzt Nakajima bei seinem Ansatz auf robuste, hochflexible und leichtverformbare PVDF-Folien im Boden, um die Schrittenenergie zu wandeln [45]. Diese erzeugen laut seinen Berechnungen mehr Energie als PZT, wenn die Dehnung mehr als $0,8 \%$ beträgt. Da die brüchige Keramik meist nur Dehnungen im Bereich von $0,1 \%$ standhält, kann mit Hilfe von PVDF trotz der geringeren piezoelektrischen Koeffizienten mehr elektrische Energie bereitgestellt werden. Um das zu erreichen werden die $40 \mu\text{m}$ Folien mit 50, 100 und 200 Windungen gewickelt und mittels

eines Hebelarms belastet, um den Effekt zu vergrößern. Die verstärkte Kraft von 4,2 kN wirkt auf eine Angriffsfläche von ca. 1 cm². Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass Wickel mit 200 Windungen knapp 50 mWs nach 50 Schritten auf einer angepassten kapazitiven Last speichern können. Die verwendeten PVDF-Wickel sowie die Hebelarmkonstruktion in der 50 x 50 cm² Bodenplatte sind in Abbildung 10 zu sehen.

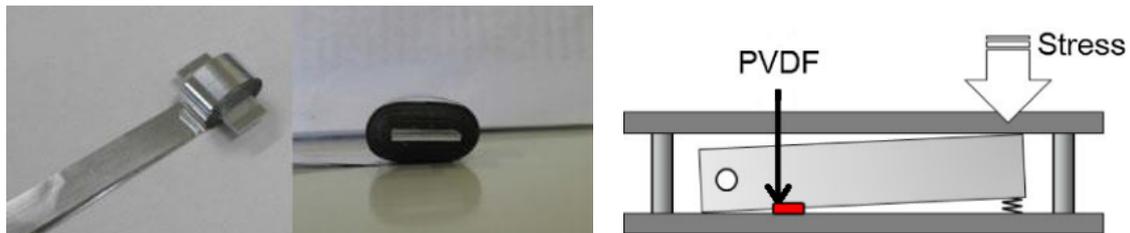


Abbildung 10: PVDF-Wickel mit mehreren Windungen (links) für Energy Harvesting in Bodenplatten (rechts) [45]

2.2. Beispiele für perspektivische Einsatzmöglichkeiten

In diesem Abschnitt sind einige Beispiele aus der Literatur genannt, die vom Einsatz der in Abschnitt 2.1 genannten Harvester profitieren könnten.

2.2.1. Rohrüberwachungssysteme und deren Versorgung

Ein Applikationsfeld für Energy Harvester ist möglicherweise die Versorgung autarker Sensoren zur Überwachung von Rohrsystemen wie die für das Trinkwassernetz. Laut der Studie der *American Society of Civil Engineers* (ASCE) gehen täglich umgerechnet über 25 Milliarde Liter Trinkwasser weltweit aufgrund von Lecks im Rohrsystem verloren. Neben der enormen Verschwendung von wertvollen Ressourcen verursachen diese Lecks finanzielle Verluste im zwei- bis dreistelligen Millionenbereich [46]. Diese Verluste lassen sich durch frühzeitige Erkennung von Lecks und somit gezielter Wartung verringern. Da sich Versorgungsnetze jedoch über Millionen von Kilometern erstrecken, ist eine ständige, hochauflösende und flächendeckende Überwachung schwierig. Zudem sind Rohrabschnitte oft komplett vergraben und somit schwer zugänglich. Aus diesen Gründen wird die Überwachung solcher Netze nur an diskreten Positionen mit Hilfe großer Messstationen vorgenommen. Das führt jedoch zu einer verringerten Genauigkeit der Ergebnisse [47]. Andere Ansätze nutzen eine visuelle Erkennung von Rohrveränderungen mit Hilfe sogenannter „Molche“. Diese wandern mit der Strömung durch die Rohrnetze und geben bei Auslesung Rückschlüsse auf Problemstellen [48]. Diese Messgeräte benötigen viel Energie und müssen die kompletten Rohrabschnitte abdecken und werden somit nur in längeren

Zeitabständen eingesetzt [49]. Weiterhin gibt es die Möglichkeit der Lokalisierung von Lecks mit Hilfe akustischer Signale oder Vibrationsmessung. Mehrere Signale werden verglichen, um eine Veränderung zwischen zwei Messpunkten festzustellen und somit das Leck zu erkennen. Diese Methode liefert hauptsächlich bei Metallrohren ausreichend genaue Ergebnisse, da Kunststoffrohre die Signale zu stark dämpfen [50]. Eine Abhängigkeit von der Oberfläche unter der die Rohre begraben sind, ist bei Überwachungssystemen zu erkennen, die mit Hilfe von bodendurchdringendem Radar ein Leck erkennen können [51].

Eine genauere und schnellere Erkennung von Ausfällen wäre mit Hilfe von dicht verteilten preiswerten kleineren Sensorsystemen erdenklich. Damit soll eine genauere Lokalisierung der Fehlstellen ermöglicht werden und somit die Störung durch gezielte Wartung minimiert werden. Lin demonstrierte dieses Konzept mit Hilfe mehrererer 2,5 x 2,5 mm² Multisensoren, die im Rohr platziert sind und erfolgreich Parameter wie Druck, Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit überwachen [46]. Die Daten werden per Kabel aus dem Rohr an eine Rechneinheit übermittelt, die dann die Ergebnisse und mögliche Detektion von Lecks per Funk weiterleitet. Durch die Integration von Sensoren auf MEMS-Basis (Micro-Electrical-Mechanical-Systems) in Rohrsystemen, lassen sich nicht nur Lecks feststellen, sondern auch die Qualität des Wassers überwachen. Eine Platzierung dieser Sensoren unmittelbar an den Entnahmestellen soll eine genauere Analyse ermöglichen. Üblicherweise wird die Wasserqualität an den Entnahmestellen mit Hilfe von Probenanalysen überprüft. Da das jedoch zeit- und arbeitsaufwändig ist, werden solche Kontrollen in großen Zeitabständen durchgeführt. Somit ist dieser Ansatz nicht echtzeitfähig und senkt die Chance einer frühen Kontaminationserkennung [52].

Echtzeitfähige Überwachungssysteme sind unter anderem das *GuardianBlue*[®] Warnsystem von *Hatch*[®]. Dieses System ist dennoch aufgrund der Baugröße nur an bestimmten Stellen einsetzbar und kann keinen Aufschluss über alle Entnahmestellen geben [53]. Ein weiterer Ansatz für die Überwachung der Wasserqualität ermittelt physikalisch-chemische Eigenschaften mit Hilfe von einfachen, preiswerten Sensoren und wurde im River Lee in Cork, Irland getestet. Über Funksignale kann der Multisensor mit der Basisstation kommunizieren und in Echtzeit die Wasserqualität beurteilen [54]. Auch dieses System ist aufgrund der Konzipierung für offene Gewässer zu groß für den Einsatz in Rohrsystemen. Eine Anpassung dieses Systems für Trinkwassernetze ist von Labrou untersucht worden. Mit Hilfe von kleinen, preiswerten elektrochemischen sowie optischen Sensoren ist ihm die Detektion von *E. coli* Bakterien schon in kleinen Konzentrationen in Echtzeit gelungen [55]. Abbildung 11 zeigt den konzeptionellen und den prototypischen Aufbau des Systems.

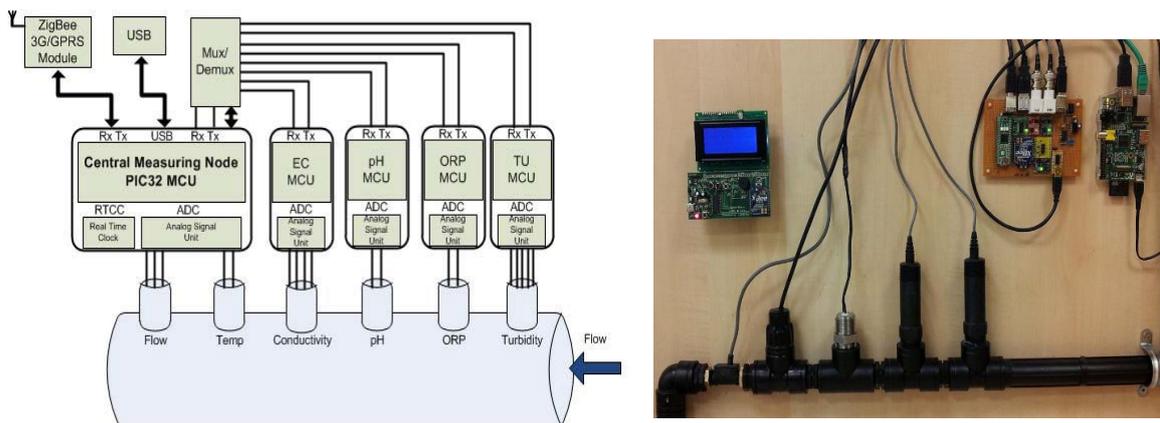


Abbildung 11: Konzept (links) und Prototyp (rechts) eines echtzeitfähigen Wasserqualitätsüberwachungssystems [55]

Das Problem beim Einsatz von Sensoren im Rohr ist deren Energieverbrauch und die verfügbare Versorgungsenergie [56]. Beide der typischen Versorgungsprinzipien, Netzversorgung oder Batterieversorgung, haben ihre Einschränkungen. Eine Netzversorgung limitiert den Einsatz auf Bereiche mit Netzzugang. Das verringert wiederum die Auflösung und die Genauigkeit der Überwachung. Auch das Durchdringen der Rohre für die Verkabelung kann selbst eine Ursache für Lecks sein und würde somit dem eigentlichen Zweck der Sensorsysteme entgegen wirken. Batterien müssen nach ihrer Entladung ausgetauscht oder aufgeladen werden. Das erhöht den Wartungsaufwand und ist bei unzugänglichen Rohrabschnitten mit erheblichen Störungen im Versorgungsnetz und dessen Umgebung verbunden. Mit Hilfe von Energy Harvestern soll eine autarke, drahtlose und langjährige Überwachung der Rohrnetze in Echtzeit ermöglicht werden. Beispiel eines solchen Ansatzes ist bereits in 2.1.2 vorgestellt und nutzt die Strömungsenergie, um auf Basis des elektromagnetischen Effekts einen Durchflusssensor zu betreiben [21].

2.2.2. Belegungserkennung für effiziente Steuerung und Überwachung

Wie in Abschnitt 2.1.2 gezeigt, ist die Wirtschaftlichkeit von Energy Harvestern als Ersatz für das Stromnetz noch nicht erreicht worden. Ursache dafür ist zum einen die geringe Effizienz bei der Umwandlung in elektrische Energie aber auch die hohen Kosten dieser Energieproduktion verglichen mit herkömmlichen Netzstromkosten. Aus diesem Grund ist eine sinnvolle Applikation wichtig, um den Einsatz von Energy Harvestern zu rechtfertigen und eine Rentabilität zu garantieren. Um mit geringen Energiemengen großes Sparpotential zu erreichen, können Energy Harvester für autarke Sensorsysteme eingesetzt werden. Dadurch wird eine genauere Erfassung der Umgebung ermöglicht, die gezielt für

hocheffizientes Steuern von Verbrauchern genutzt werden kann. Ein Beispiel hierfür ist die Erfassung der Raumbelegung in Gebäuden, um dementsprechend die Beleuchtung und die Klimaeinrichtung sparsam zu steuern. Künstliche Beleuchtung hat einen Anteil von 19 % des globalen Energieverbrauchs [57]. In Gebäuden erreicht dieser Anteil bis zu 40 % [58]. 2004 lag der Energieverbrauch von Gebäuden in der EU bei 37 % und war somit der größte Verbrauchssektor im Vergleich zum Industrie- und dem Transportsektor [59]. Verantwortlich dafür ist neben der künstlichen Raumbelichtung auch die Klimatisierung, die mit bis zu 50 % an dem Gesamtverbrauch der Gebäude beteiligt ist [59]. Aus diesen Zahlen ist das enorme Sparpotential schnell erkennbar.

Systeme zur Belegungserfassung und gezielter Steuerung der Raumbelichtung können den Energieverbrauch durch Beleuchtung um bis zu 30 % senken [60]. Bakker verglich 24 Studien, die das Thema der belegungsgesteuerten Raumbelichtung diskutieren und stellte fest, dass über 90 % der Ansätze für Büroflächen auf passive Infrarot Sensoren basieren (PIR) [61]. Diese Sensoren detektieren eine Bewegung in ihrem Umfeld, da diese eine Änderung des Wärmebilds hervorruft. Dadurch wird die Präsenz von Personen erkannt und beispielsweise das Licht eingeschaltet. Das Ausschalten des Lichts erfolgt nach einer definierbaren Verzögerung wenn keine neue Bewegung festgestellt wird. Das führt oft dazu, dass die Belegung des Raums nicht erkannt wird, wenn sich Personen in diesem Raum kaum bewegen. Um dieses Fehlverhalten zu vermeiden, wird die Verzögerungsdauer verlängert. Das führt jedoch zu einem erhöhten Verbrauch wenn tatsächlich der Raum komplett verlassen wird [62]. Eine bessere Erkennung lässt sich durch die Erweiterung der PIR-Sensoren mit weiteren Detektoren wie CO₂ Detektoren [63], Kameras [64] oder Wahrscheinlichkeitsmodelle, die eine erhöhte Entscheidungssicherheit ermöglichen sollen [65]. Diese Erweiterungen bringen jedoch den Nachteil einer erhöhten Komplexität und die Notwendigkeit der Datenfusion. Zudem sind Kameras aufgrund einer Verletzung der Privatsphäre problematisch. Abhilfe schaffen 3D-Tiefenkameras, die die Anzahl und Position von Personen im Raum erkennen, jedoch weniger Informationen übertragen und somit die Identität der Personen schützen [66]. Weiterhin gibt es Ansätze auf Basis von RFID-Chips. Die RFID-Chips müssen von den Personen im Büro durchgehend getragen werden, um dem System eine ständige Lokalisierung und damit Raumbelegungserkennung zu ermöglichen [67]. Eine Person ohne ihren RFID-Chip würde somit nicht erkannt werden.

Die meisten genannten Ansätze nutzen Sensoren mit Netzversorgung. Bei hochauflösenden Systemen, die eine Vielzahl von Sensoren nutzen, kann die Verkabelung schnell unübersichtlich, komplex und störend werden. Eine einfachere Möglichkeit, die Personen in

einem Raum zu erkennen, zählen und lokalisieren ist durch die Integration von Drucksensoren im Boden realisierbar. Mit Hilfe von Funksignalen, soll die Beleuchtung nach Bedarf gesteuert werden. Da die Sensoren im Boden integriert sind, sind Sie unabhängig von der Person, stören sein typisches Verhalten nicht und übertragen keine kritischen Informationen. Durch den Einbau dieser Sensoren unter dem Bodenbelag an den gewünschten Ein- und Ausgängen oder Arbeitsplätzen, lässt sich ein solches System auch in bestehenden Räumen nachrüsten. Da auch hier eine Verkabelung bei vielen Sensoren kompliziert wäre und aufgrund der Unzugänglichkeit der vergrabenen Sensoren Batterien unwirtschaftlich wären, sind Energy Harvester für diese Zwecke sinnvoll. In dieser Applikation fungieren sie als autarke Sensoren, die aufgrund der Schrittmenergie eine Personenerkennung vornehmen können und gleichzeitig die notwendige Energie für die eigene Versorgung extrahieren können. Ein solcher Ansatz ist von Sharpes konzipiert worden [44] und bereits in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt.

2.3. Zusammenfassung des aktuellen Stands

Aus dem aktuellen Stand der Technik wird ersichtlich, dass das Thema Energy Harvesting in den letzten Jahren stark in den wissenschaftlichen Fokus gerückt ist. Viele der veröffentlichten Ansätze stellen interessante technische und wissenschaftliche Konzepte dar. Der Bezug zu realistischen und praktischen Anwendungen ist in den meisten Veröffentlichungen vergeblich zu suchen. Anwendungen, die praktisch von solchen Energiegewinnungstechnologien profitieren könnten, weisen eine lange Lebensdauer auf, die mehrere Jahrzehnte betragen kann. Aus diesem Grund muss ein Harvester für diese komplette Lebensdauer wartungsfrei bleiben und trotz dessen geringen Outputs einen autarken Betrieb ermöglichen. In den folgenden Kapitel werden Ansätze vorgestellt, die diese Kriterien erfüllen und die konkreten Anwendungen aus Abschnitt 2.2 langfristig und autark ermöglichen sollen. Anders als bei den bisherigen Veröffentlichungen bleibt bei dieser Arbeit der praktische Aspekt und die perspektivische Applikation immer im Fokus und wirkt sich auf die Konzepterstellung, den Harvesterkonfigurationen und den Randbedingungen beim Testen maßgeblich aus. Konkret betrifft das die Wahl eines wartungsfreien Wandlungsprinzips, welches sich einfach und kostengünstig herstellen lässt und keine überdimensionalen Auslenkungen bzw. Hübe oder Kräfte benötigt, um ausreichend Energie zu liefern. Auch bei der Materialauswahl wurde auf Langlebigkeit und geachtet, damit der Harvester den hohen Anforderungen von praxisrelevanten Applikationen genügt.

3. Piezoelektrische Harvester für den Einsatz in strömenden Medien

In Abschnitt 2.2.1 wurde die Überwachung von Rohrsystemen und Netzwerken als sinnvolle Applikation für Energy Harvester vorgestellt. Um eine hochauflösende und flächendeckende Überwachung von Rohrnetzwerken zu ermöglichen, eignet sich der Einsatz von drahtlosen Sensornetzwerken. Die Vielzahl an dicht installierten Sensorknoten müssen jedoch über die gesamte Lebensdauer des zu überwachenden Systems mit Energie versorgt werden. Rohrabschnitte haben häufig keinen Netzzugang. Zudem kann die Verkabelung zum Rohrinernen problematisch sein und Lecks verursachen. Auch Batterien decken die Energieversorgung langfristig nicht ab, da sie nach dem Entladen ausgetauscht oder aufgeladen werden müssen. Vor allem bei unzugänglichen Rohrabschnitten ist ein solcher Wartungseingriff mit großen Störungen verbunden. In diesem Kapitel wird ein Energy Harvester vorgestellt, der mit Hilfe der Energie aus strömenden Medien in einem Rohr elektrische Energie für die Versorgung der Sensorknoten bereitstellt.

3.1. Design und Funktion

Für die Versorgung von Funksensoren innerhalb eines geschlossenen Rohrsystems wird aus der kinetischen Energie des strömenden Mediums in diesem Rohr mit Hilfe mechano-elektrischer Wandlung elektrische Energie bereitgestellt. Ausgangspunkt sind dabei typische Trinkwasserrohre mit Durchmesser zwischen 15 mm und 30 mm. Um elektrische Energie mit Hilfe von Luft- oder Wasserströmungen zu wandeln, werden üblicherweise elektromagnetische Wandler eingesetzt. Dies ist neben den Wind- und Wasserkraftwerken auch in miniaturisierten Ansätzen zu finden [21], [68]. Dieser Wandlungseffekt hat aufgrund seiner hohen Effizienz einen berechtigten Einsatz in Kraftwerken und basiert auf eine relative Bewegung oder Änderung zwischen Magnetfeld und Spule. Diese Bewegung wird meistens durch den Einsatz einer Turbine realisiert. Für Mikrogeneratoren innerhalb Rohren mit kleinen Durchmessern müssen diese Turbinen jedoch miniaturisiert werden. Das führt aufgrund der damit verbundenen Reibungseffekte zu einer starken Reduzierung der Wandlungseffizienz [69]. Die mit der Miniaturisierung zunehmende Bedeutung der Reibung führt nicht nur zu einer reduzierten Wandlungseffizienz, sondern bedeutet automatisch einen Verschleiß der Komponenten und somit einen erhöhten Wartungsbedarf bzw. eine erhöhte

Ausfallwahrscheinlichkeit. Aus diesem Grund wird hier ein alternativer Ansatz diskutiert, der die mechano-elektrische Wandlung aufgrund Festkörperreaktionen von piezoelektrischen Materialien realisiert. Die Minimierung der notwendigen Systemkomponenten soll nicht nur den Wartungsaufwand eliminieren, sondern auch eine unkomplizierte Herstellung ermöglichen. Abbildung 12 zeigt jeweils einen möglichen Aufbau solcher Wandler. Statt einer relativen Bewegung des Rotors (Magnetfeld) zum Stator (Spule), nutzt der piezoelektrische Ansatz die eigene Bewegung des aktiven Materials. Mit Hilfe eines Störkörpers in der Strömung werden alternierende Wirbel gebildet, die Unterdruckgebiete darstellen. Die sogenannte „Karmansche Wirbelstraße“ sorgt dafür, dass das piezoelektrische Material, was durch die Strömung bewegt wird, zurück in die Ursprungslage kehrt. Diese periodische Deformation des Materials ist notwendig, da der piezoelektrische Effekt dynamisch ist. Die entstehenden mechanischen Belastungen im Material aufgrund der Folienbiegung sind senkrecht zu der Elektrodenanordnung bzw. zum elektrischen Feld. Somit wird der piezoelektrische Quereffekt genutzt, der für planare Strukturen wie dünne Folien eine höhere Wandlungseffizienz im Vergleich zum Längseffekt ermöglicht.

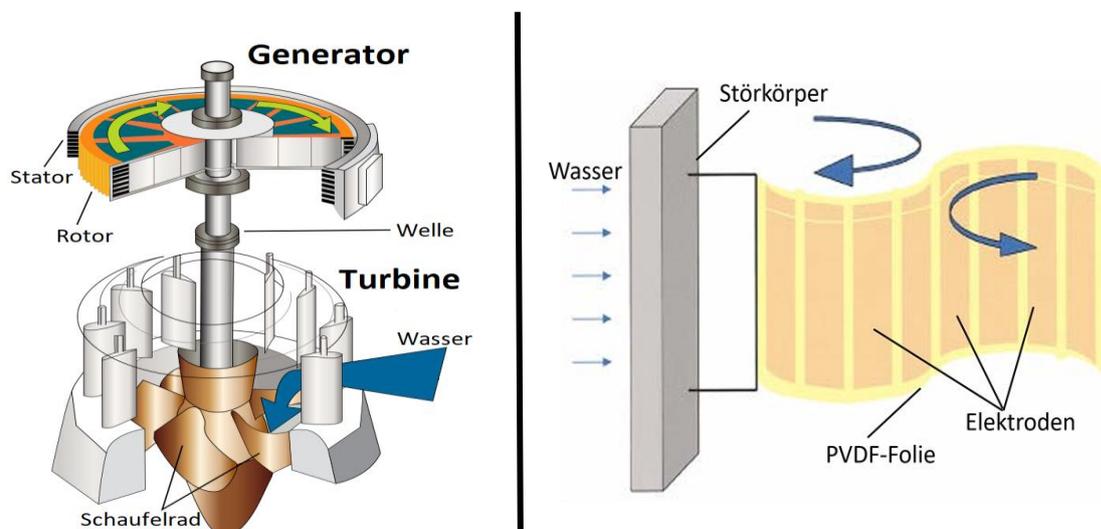


Abbildung 12: Mögliche Generatoren für Hydroenergie auf elektromagnetischer Basis (links) [70] und piezoelektrischer Basis (rechts) [71]

Um die Nutzbarkeit dieses Ansatzes für spätere Applikationen zu beurteilen, wird als erstes der perspektivische Energieertrag berechnet. Die Einführung eines Harvesters in einem Rohrsystem entnimmt der Strömung Energie bzw. führt zu Verlusten. Die Verlustleistung P_{max} wird mit Hilfe von Formel (1) kalkuliert [24]. Hier stellt ρ die Dichte des Fluids, A die Rohrquerschnittsfläche und v_{∞} die Geschwindigkeit des Fluids. Die Betz-Zahl c_B ist in Formel (2) angegeben und berücksichtigt die Abnahme der Geschwindigkeit im Rohr

aufgrund des Harvesters. Dabei ist v_1 die Geschwindigkeit vor dem Harvester und v_2 die dahinter [72].

$$P_{max} = \frac{\rho}{2} * A * v_{\infty}^3 * c_B \quad (1)$$

$$c_B = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{v_2^2}{v_1^2} \right) * \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \quad (2)$$

Bei einem Wasserrohr mit 30 mm Innendurchmesser und einer Strömungsgeschwindigkeit v_1 von 2 m/s beträgt die Betz-Zahl maximal 0,18 wenn ein Geschwindigkeitsabfall von höchstens 10 % angenommen wird. Bei Raumtemperatur ergibt das eine Verlustleistung von ca. 500 mW, die über dem Harvester maximal fällt und zum Wandeln verfügbar steht. Die Wandlungseffizienz von mechanische in elektrische Leistung hängt vom materialabhängigen elektromechanischen Kopplungskoeffizient k ab. Das Quadrat dieses Koeffizienten gibt das Verhältnis zwischen der mechanischen Energie, mit der das Material beansprucht wird, und die dabei gewandelte elektrische Energie an [73]. PZT besitzt einen Kopplungskoeffizienten $k = 0,47$ und wandelt 22 % der im Material gespeicherten mechanischen Energie in elektrische um. PVDF dagegen mit einem Kopplungskoeffizienten $k = 0,12$ wandelt nur 1,4 % um [74]. Bei maximal möglichen 500 mW wären also theoretisch 110 mW mit PZT und 7 mW mit PVDF an elektrischer Leistung generierbar. Da in der Praxis jedoch Verluste auftreten und deutlich weniger als die gesamte Verlustleistung P_{max} das Material mechanisch beansprucht, sind geringere Werte zu erwarten [75].

Obwohl PZT ein Vielfaches an elektrischer Leistung wandelt, wird bei diesem Ansatz PVDF als aktives Material eingesetzt. Das hat neben den in 2.1.1 genannten Eigenschaften auch den Grund, dass PVDF im Gegensatz zu PZT deutlich belastbarer ist und bei langjährigem Einsatz keine Ermüdungserscheinungen, keinen Bruch und keine Verluste an piezoelektrischen Eigenschaften aufweist. Die Skalierbarkeit des Herstellungsprozesses von PVDF-Folien im Vergleich zu den piezoelektrischen Keramiken ist höher und damit ist PVDF die günstigere Alternative. Der Nachteil dieser Alternative liegt in den geringeren Werten der piezoelektrischen Ladungskoeffizienten d_{ij} . Diese geben das Verhältnis der induzierten elektrischen Ladung zur mechanischen Spannung an und sind somit für eine mechano-elektrische Wandlung essenziell. Um die relativ geringen Werte zu kompensieren, wird die PVDF-Folie mehrfach gewickelt. Somit kann im selben Rohrabschnitt eine größere aktive Fläche untergebracht und dadurch mehr Energie erzeugt werden im Vergleich zu einer

flachen einlagigen Anordnung [45]. Der Wickelansatz ist von Bischur und Schwesinger und nutzt zwei Lagen PVDF mit zwei Elektrodenschichten dazwischen [76]. Im Vergleich zu einem Wickel mit nur einer PVDF-Lage verhindert diese Konfiguration einen Kurzschluss und verdoppelt zusätzlich die aktive Fläche. Abbildung 13 zeigt die Wickelkonfiguration.

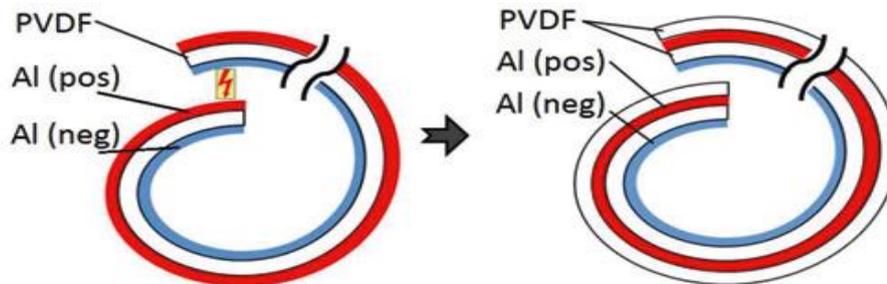


Abbildung 13: Wickelprinzip zur Vergrößerung der aktiven Fläche. Doppelschichtausführung (rechts) zur Vermeidung von Kurzschlüssen bei einfacher Ausführung (links)

Dieser Wickel wird in einem Rohrabschnitt in Strömungsrichtung hinter einem Störkörper platziert, sodass die induzierten Wirbel die piezoelektrischen Folien kontinuierlich mit mechanischen Wechsellasten beanspruchen können. Die Position und Größe der Wirbel hängen unter anderem von Form und Dimension des Störkörpers ab. Es wird eine ringförmige Blende als Störkörper eingesetzt. Diese hat zum einen den Vorteil, ausreichend starke Wirbel zu erzeugen und dient gleichzeitig als Aufnahme für die weiteren Systemkomponenten. Das vollständige Harvestersystem besteht neben dem PVDF-Wickel und dem Störkörper aus einer flexiblen Leiterplatine die mit einer Energiemanagementschaltung, einem Energiespeicher, einem Mikrocontroller und einem Funkmodul bestückt ist. Mit Hilfe des Energiemanagements soll die Ladung aus den aktiven Folien effizient extrahiert und zwischengespeichert werden. Zudem muss die Spannung gleichgerichtet und reguliert werden. Der Mikrocontroller wird anwendungsspezifisch programmiert und liest die Daten von angeschlossenen Sensoren ab und bereitet sie für ein Verschicken mittels der Funkeinheit vor. Um als Energieversorgung für beliebige Rohrsensoren zu fungieren, vervollständigt eine universale Schnittstelle im Störkörper die Systemkomponenten. In Abbildung 14 ist das Systemprinzip zu sehen.

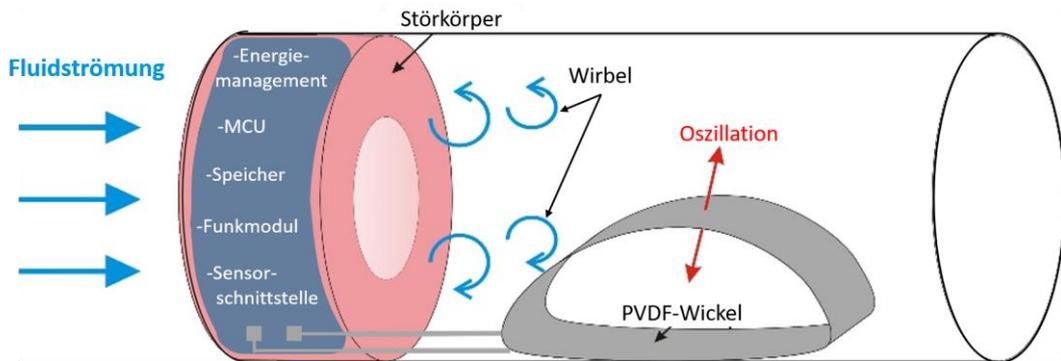


Abbildung 14: Prinzipskizze des vollständigen Harvestersystems

3.2. Herstellung der Prototypen

Die eingesetzte PVDF-Folie ist polarisiert, hat eine Breite von 12 mm und hat eine Stärke von ca. 30 μm . Zur Herstellung der Prototypen war sie auf zwei separaten Rollen aufgewickelt. Für die Elektroden wurden ebenfalls 2 Rollen mit 8 mm breiter Aluminiumfolie mit einer Stärke von 6 μm verwendet. Die schmalere Aluminiumfolie sorgt bei zentrierten Elektroden für einen ausreichenden Rand, um Kurzschlüsse durch Berührung der zwei Metallfolien zu vermeiden. Die Herstellung der Wickel erfolgte analog der Herstellung von Wickelkondensatoren, um eine zukünftige industrielle Produktion zu vereinfachen. Für erste Prototypen wurde eine manuelle Wickelvorrichtung verwendet, die bei vorausgegangenen Forschungsarbeiten am Fachgebiet entwickelt und gebaut wurde [77]. Die Vorrichtung nimmt die vier Rollen vertikal übereinander alternierend auf, beginnend mit PVDF als unterste Rolle und endend mit Aluminium als oberste. Das Wickeln geschieht um einen Dorn aus Polyoxymethylen (POM), der mit einem Schrumpfschlauch umhüllt ist. Dieser weiche Schlauch gleicht Rauigkeiten in der Dornoberfläche aus und ermöglicht qualitativ bessere Ergebnisse beim Verschweißen der Folien. Durch den Schrumpfschlauch ergibt sich ein Gesamtdurchmesser des Dorns von 25 mm. Abbildung 15 zeigt die Vorrichtung mit angesetzten Folien am Dorn. Für die Untersuchungen sind auch Wickel getestet worden, die mit Hilfe weiterer Dorne mit 20 mm und 27 mm Durchmesser gewickelt worden sind.



Abbildung 15: Vorrichtung zum manuellen Fertigen von mehrlagigen PVDF-Wickeln [78]

Neben den PVDF- und Aluminiumlagen wurde als innerste und äußerste Lage eine Polyethylen-Folie mit geringer Dichte (LDPE) eingesetzt. Diese zwei Lagen bilden eine wasserdichte Hülle um die aktiven Lagen und schützen somit vor Kurzschlüssen beim späteren Einsatz in wässrigen Fluiden. Für das Schweißen der Folien wurden die in Abbildung 16 dargestellten Vorrichtungen genutzt. Um die Ladung abzutransportieren wurden zwei isolierte Kupferlitzen durch die LDPE-Hülle durchgestochen und mit den Aluminiumelektroden verbunden. Das entstandene Loch in der Hülle wurde mit einem LDPE-Heißkleber verklebt womit der Wickel wasserdicht war. Mit flüssigem Silikon wurde der Kontakt zwischen Kupferlitze und LDPE verbessert. Abbildung 17 zeigt die wichtigsten Schritte des Herstellungsprozesses als Modell. Das Modell ist nicht maßstabgetreu und dient nur zur Veranschaulichung der einzelnen Schritte. Dabei sind PVDF in Gold, Aluminium in glänzendem Grau, LDPE in durchsichtigem Türkis und Kupfer in Braun dargestellt.

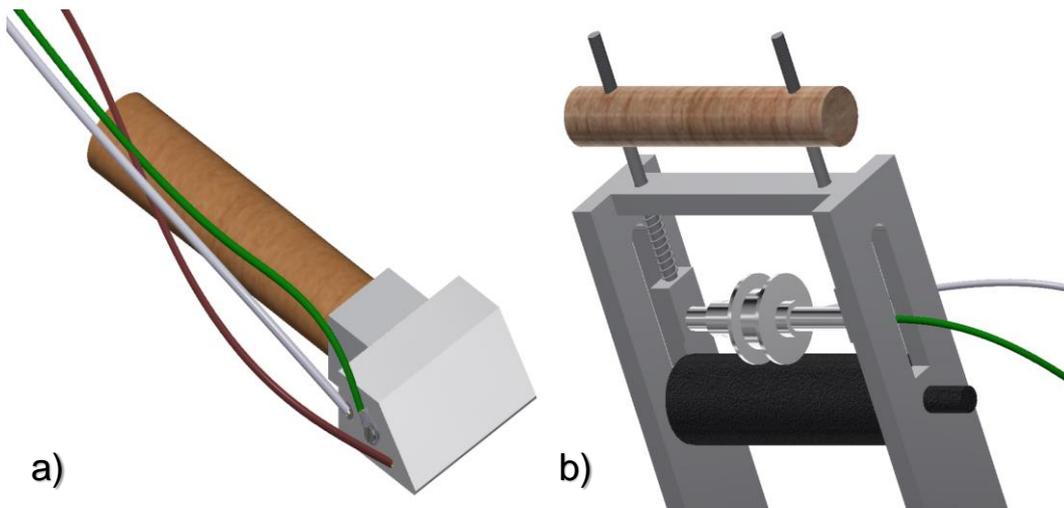


Abbildung 16: Vorrichtung zum Verschweißen der Folien a) quer miteinander und b) entlang des Umfangs

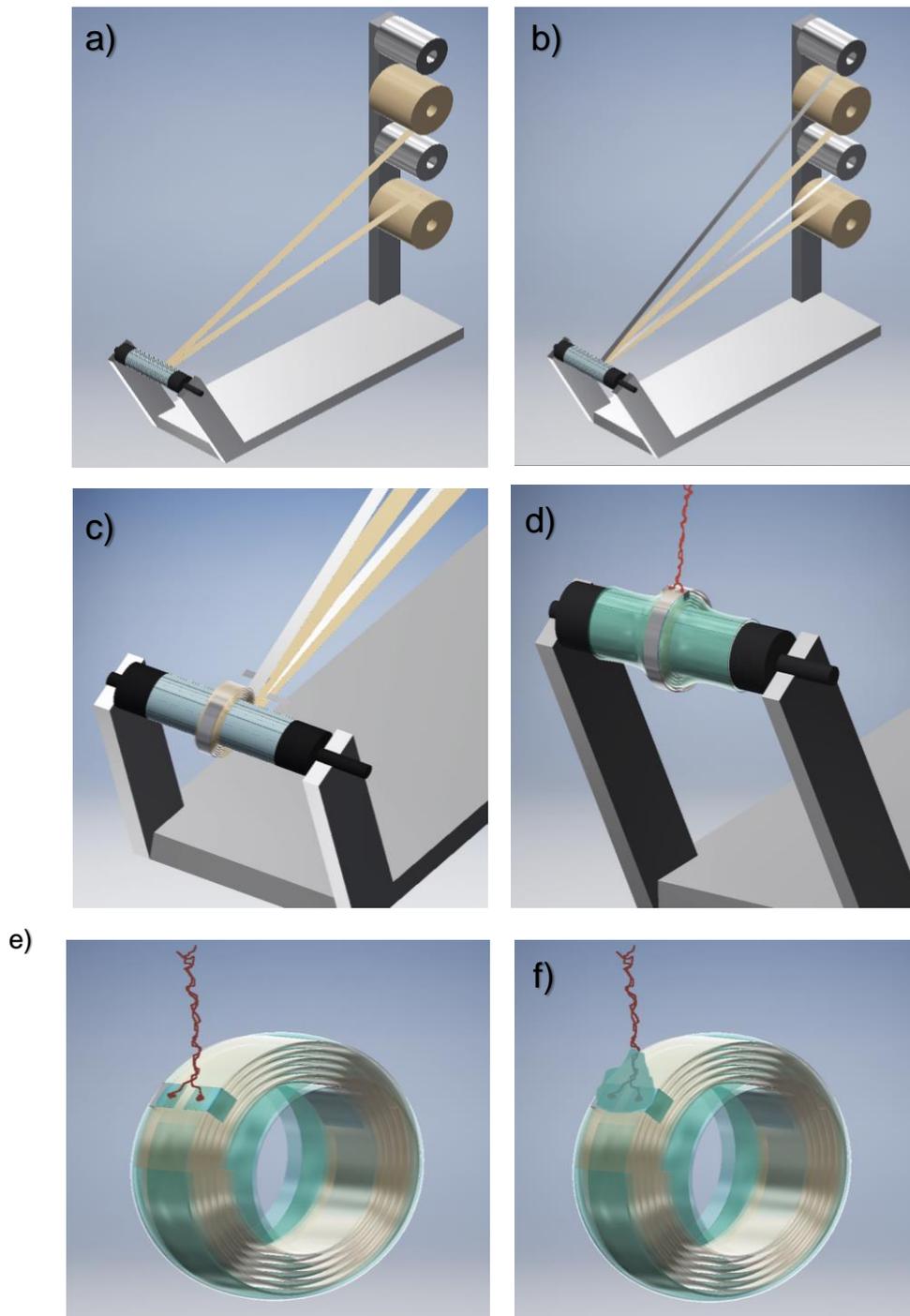


Abbildung 17: Hauptschritte bei der Herstellung der prototypischen Strömungsharvester

3.3. Experimentelle Charakterisierung der Strömungsharvester

Die Eignung dieses Energy Harvesting Ansatzes zum Versorgen von Sensoren innerhalb von Rohrsystemen hängt im Wesentlichen von der generierten Leistung ab. Zuerst müssen die ausschlaggebenden Faktoren, die die Leistungsfähigkeit beeinflussen, bestimmt werden.

Dafür wird die piezoelektrische Grundgleichung (3) betrachtet. Hier ist D die elektrische Verschiebung, d_{ij} der piezoelektrische Koeffizient, σ die mechanische Spannung, ε die dielektrische Leitfähigkeit bestehend aus der Dielektrizitätskonstante für Vakuum ε_0 und der relative Dielektrizitätskonstante ε_r und E_F die elektrische Feldstärke. Zunächst wird der Leerlauf betrachtet, bei dem die elektrische Verschiebung verschwindet. Dadurch ergibt sich die Amplitude der Leerlaufspannung beim Quereffekt wird nach Formel (4), wobei d der Elektrodenabstand und gleichzeitig die Dicke der PVDF-Schicht betragen. Der Kurzschlussfall, führt zu einer elektrischen Feldstärke gleich Null. Dadurch vereinfacht sich die Grundgleichung wieder und ermöglicht mit Hilfe von Formel (5) die Berechnung des Kurzschlussstroms I_{KS} . Q ist hier die Ladung und fließt durch die Elektrodenfläche $b \cdot l$.

$$D = d_{ij}\sigma + \varepsilon E_F \quad (3)$$

$$U_{LL} = -d \frac{d_{31}\bar{\sigma}}{\varepsilon} \quad (4)$$

$$D = \frac{Q}{bl} \quad (5)$$

$$I_{KS} = \frac{dQ}{dt} = d_{31}bl \frac{d\sigma}{dt} \quad (6)$$

Der in Formel (6) resultierende Kurzschlussstrom hängt von der zeitlichen Veränderung der mechanischen Spannung im Material und wird aus diesem Grund in der Frequenzdomäne betrachtet (7). Mit Hilfe dieses Kurzschlussstroms und der Leerlaufspannung lässt sich nun die komplexe Impedanz \underline{Z} des Harvesters bestimmen. Mit (4) und (7) in (8) eingesetzt, ergibt das eine reine kapazitive Impedanz, wie es von einem Kondensatoraufbau zu erwarten ist. Dabei sind ω die Kreisfrequenz der Beanspruchung und C_0 die Kapazität der Anordnung. Die entsprechende ohmsche Last R_L aus dem Betrag der Impedanz lässt sich nach Formel (9) bestimmen. Die maximale Leistung P_L , die in einer angepassten Last umgesetzt wird, lässt sich mit Hilfe von Formel (10) bestimmen. Hier ist U_L die Spannung über die Last. Bei idealer Lastanpassung fällt die Hälfte der Effektivspannung über den Lastwiderstand, die andere über den Innenwiderstand der Quelle. Wird eine sinusförmige Belastung angenommen, beträgt die Effektivspannung $1/\sqrt{2}$ der Amplitude der Leerlaufspannung U_L .

$$I_{KS} = d_{31}blj\omega\sigma \quad (7)$$

$$\underline{Z} = \frac{U_{LL}}{I_{KS}} = \frac{1}{j\omega C_0} \quad (8)$$

$$R_L = |\underline{Z}| = \sqrt{\left(\frac{1}{\omega C_0}\right)^2} = \left|\frac{d}{\omega b l \varepsilon}\right| \quad (9)$$

$$P_L = \frac{U_L^2}{R_L} = \frac{U_{eff}^2}{4R_L} = \frac{U_{LL}^2}{8R_L} = \frac{\omega d b l d_{31}^2 \sigma^2}{8\varepsilon} \quad (10)$$

Aus Formel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** ist ersichtlich, dass eine hohe mechanische Spannung im Material für eine hohe elektrische Leistung ausschlaggebend ist. Aus diesem Grund wurden die hergestellten piezoelektrischen Wickel unter applikationsentsprechenden Bedingungen im Labor auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht. Der Fokus der Untersuchungen lag auf die Findung einer geeigneten Position und Fixierungsform im Rohr, die die mechanische Beanspruchung des Materials maximiert. Aus der gleichen Formel ist ebenso ersichtlich, dass mit größer werdendem Volumen eine größere Leistung erzielt werden kann. Das ist jedoch nur bei gleicher mechanischen Spannung im Material der Fall. Durch ein größeres Volumen, realisiert durch mehrfacher Windung, nimmt das Material aber an Masse zu und wird bei gleichbleibenden Strömungseigenschaften weniger deformiert. Das Ziel der Untersuchungen mit verschiedenen Windungszahlen war es, festzustellen, welcher der Effekte dominiert und welche Windungszahl für einen maximalen Leistungsumsatz geeignet ist.

3.3.1. Messplatzaufbau

Die Charakterisierung der Strömungsharvester erfolgt für zwei unterschiedliche Fluide, Luft und Wasser. Ziel dieser Charakterisierung war die Findung einer Position und Fixierungsform, die die höchste Wandlungseffizienz ermöglicht. Als Messgröße für die elektrische Leistung wurde die Spannung am Ausgang der Wandler bzw. über die angeschlossenen Widerstände mit Hilfe eines Oszilloskops (Tektronix TDS2024B) aufgezeichnet. Um die generierte elektrische Leistung zu bestimmen, wurde eine Lastanpassung durchgeführt. Maximale Leistung wird dann übertragen, wenn die Impedanz

der Last der Impedanz der Quelle entspricht. Um diesen Punkt zu finden und die maximale Leistung zu ermitteln, wurden die Wickel mit unterschiedlichen ohmschen Lasten, im Bereich von 100 k Ω bis 10 M Ω beschaltet. Für die Untersuchungen in den unterschiedlichen Fluiden wurden separate Messplätze verwendet.

3.3.1.1. Messplatz für Winduntersuchungen

Der erste Aufbau war ein Windkanal, der für Erstuntersuchungen den Vorteil bietet, auch bei undichten PVDF-Wickeln brauchbare Messergebnisse zu liefern. Dadurch sollten bereits erste Erkenntnisse über die Umsetzbarkeit des Konzepts und die Effektivität des Designs gewonnen werden. Der Aufbau war von der Firma ELV (Uniwind) und bot einen Windkreislauf mit einer zugänglichen Teststrecke an. Da die Austrittsfläche des Aufbaus deutlich größer war, als die perspektivischen Rohrdimensionen, wurde der Aufbau mit Hilfe eines Trichters modifiziert. Dieser Trichter wirkte als Adapter zwischen Kanal und Rohr und reduzierte die Querschnittsfläche, um das Anschließen eines Rohrs mit 30 mm Innendurchmesser zu ermöglichen. Durch diese erzwungene Querschnittsverringeringung entstand ein zu hoher Gegendruck auf die Pumpe, sodass diese nicht mehr den vollständigen Geschwindigkeitsbereich abdecken konnte. Mit diesem modifiziertem Aufbau betrug die maximale Windgeschwindigkeit ca. 7 m/s. Abbildung 18 zeigt den Messplatz für die Erstuntersuchungen.

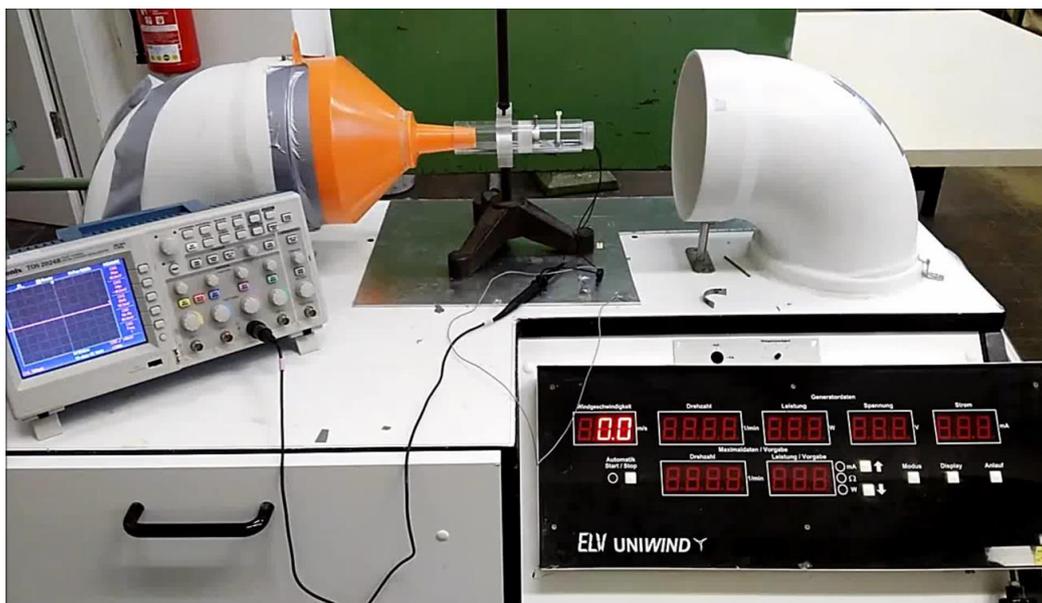


Abbildung 18: Messaufbau für die Charakterisierung der PVDF-Wickel im Windkanal mit Hilfe eines Oszilloskops

3.3.1.2. Messplatz für Wasseruntersuchungen

Der zweite Aufbau ermöglichte die Untersuchung der PVDF-Wickel im Wasser. Mit Hilfe dieses Aufbaus sollte ermittelt werden, wie hoch die erzeugte elektrische Energie in flüssigen Applikationsbedingungen ist. Zusätzlich sollte die Abdichtungsqualität der Wickel evaluiert werden. Um die gewünschten Bedingungen zu simulieren, wurde ein Aufbau im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelt und konstruiert, der folgende Kriterien erfüllen sollte:

- Übliche Strömungsgeschwindigkeiten in Trinkwasserversorgungsnetze sollen realisierbar sein.
- Das Profil der erzeugten Strömung soll laminar sein, um die Effektivität des Störkörpers zu untersuchen.
- Der Testabschnitt soll einfach zugänglich sein, um das Einsetzen der Wickel und Veränderung von Versuchsparametern zu ermöglichen.
- Der Aufbau soll reproduzierbare Strömungseigenschaften realisieren, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen.

Um eine Strömung zu erzeugen, ist entweder eine Druckdifferenz zwischen Ein- und Auslass notwendig oder eine Potentialdifferenz. Eine konstante Strömungsgeschwindigkeit mit Hilfe einer Potentialdifferenz zu realisieren, ist jedoch problematisch, da der Füllstand im Reservoir konstant bleiben muss. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,5 m/s würde ein Unterschied im Wasserpegel von 1 cm eine Geschwindigkeitsänderung um ca. 30 % bewirken. Um den Pegel also genau einzuhalten, ist ein konstantes Nachfüllen des Reservoirs notwendig. Das kann entweder mit Hilfe des abgeflossenen Wassers und einer Pumpe, oder durch die ständige Zufuhr von neuem Wasser realisiert werden. Die erste Methode erfordert einen sehr genauen Regelkreis und größeren Platzbedarf. Einfacher ist es dagegen mit Hilfe eines Wassertanks und einer handelsüblichen Teichpumpe die gewünschte Strömung zu erzeugen. Abbildung 19 zeigt den Aufbau dieses Messplatzes. Dabei wurde mit Hilfe einer Rückförderpumpe das Wasser aus dem Tank eingesaugt und durch einen Rohrabschnitt gepumpt. Dabei standen Pumpe und Rohr vollständig unter Wasser. Durch diesen offenen Kreislauf, ist der Zugang zum Rohrabschnitt einfach im Vergleich zu einem geschlossenen Kreislauf. Auch gibt es während des Betriebs keine Wasserverluste. Die eingesetzte Pumpe war von der Firma Tunze und lieferte einen Volumenstrom von maximal 3000 l/h. Bei dem Innendurchmesser des eingesetzten Rohrabschnitts von 30 mm ergab das eine

Strömungsgeschwindigkeit von etwa 1,2 m/s. Dieser Wert liegt im Bereich der üblichen Geschwindigkeiten in Wasserversorgungsrohren [79].



Abbildung 19: Aufbau des Messplatzes für Wasseruntersuchungen

Zur Validierung wurde mit Hilfe eines Strömungsmessgeräts die Geschwindigkeit jeder einzelnen Pumpstufe gemessen. Hierfür wurde ein Flügelradsensor genutzt, der mit Hilfe eines eingebauten Hall-Sensors die Umdrehungen des Flügelrads in einer Zeiteinheit registrierte und damit auf die Durchflussrate rückschließen konnte. Die Ergebnisse dieser Untersuchung ergaben eine Abweichung in der maximalen Durchflussrate von über 30 %. Die Ursache lag teilweise beim Sensor, der einen Druckverlust erzeugt hat. Ein weiterer Gegendruck entstand dadurch, dass das Wasser normal gegen die Tankwand austrat und sich staute. Dadurch kam die Pumpe nicht auf die angegebene Fördermenge. Tabelle 1 zeigt die ermittelten Werte für die Durchflussrate und die daraus resultierende Strömungsgeschwindigkeit. Zu erkennen ist, dass das Erreichen einer maximalen Durchflussrate ab Stufe 8 möglich war. Offenbar wird ab diesem Punkt der Gegendruck für die Pumpe zu stark. Trotz der verringerten Fördermenge ist der Bereich für die Untersuchungen ausreichend. In Trinkwasserversorgungsrohre ist die Strömungsgeschwindigkeit 0,5 bis 3 m/s [79]. Um den „worst-case“ mit der geringsten verfügbaren Energie zu analysieren, wurde die untere Grenze dieses Bereichs näher untersucht.

Tabelle 1: Ermittelte Durchflussrate und Strömungsgeschwindigkeit des Messplatzes

Pumpstufe	Durchflussrate in l/h	Geschwindigkeit in m/s
1	900	0,35
2	1440	0,57
3	1620	0,64
4	1740	0,68
5	1800	0,7
6	1860	0,74
7	1860	0,74
8	1920	0,75
9	1920	0,75
10	1920	0,75

Um auch die vierte Anforderung an den Messplatz zu erfüllen, wurde der erste Rohrabschnitt nach dem Pumpenausgang mit einer Vielzahl langer, schmaler Strohhalm bestückt. Dadurch lässt sich eine laminare Strömung erzeugen, bei der das Fluid in Schichten strömt, die sich nicht miteinander vermischen. Um das zu validieren, wurde Tinte mit Hilfe einer Spritze in die ungehinderte Strömung injiziert und deren Verlauf beobachtet. Abbildung 20 deutet auf eine erfolgreiche Realisierung dieses Konzepts, auch bei maximaler Pumpleistung. Dadurch konnte garantiert werden, dass die spätere Oszillation der Wickel nicht aufgrund Turbulenzen der Pumpe war, sondern durch Wirbel, die mit Hilfe des Störkörpers induziert waren.

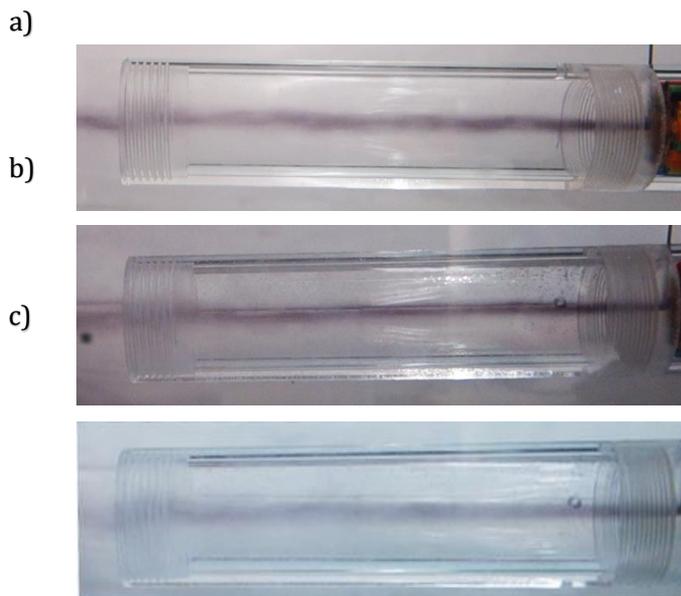


Abbildung 20: Untersuchung des Strömungsverhalten mit Hilfe eines Tintenstrahls bei 10 % (a), 50 % (b) und 100 % (c) der Pumpleistung

3.3.2. Positionierung und Fixierung der Wickel im Rohr

Ausschlaggebend für die mechanische Belastung der PVDF-Lagen ist neben der verfügbaren Strömungsenergie im Rohr auch die Position und Fixierungsform des Wickels. Somit wird Wandlungseffizienz maßgeblich von diesen beiden Faktoren beeinflusst.

Um eine geeignete Position und Fixierungsform zu finden, wurden die Wickel im Windkanal untersucht [80]. Die Leerlaufspannung wurde aufgezeichnet und der Effektivwert verglichen, um die verschiedenen Formen und Positionen zu evaluieren. Eine höhere Spannung weist auf eine stärkere Beanspruchung des piezoelektrischen Materials hin. Da die untersuchten Harvester vom Volumen und der Kapazität her identisch waren, deutete eine höhere Spannung auch auf eine höhere Wandlungseffizienz hin. Neben der Spitzenleistung ist vor allem wichtig, dass die Anordnung eine wechselnde periodische Beanspruchung ermöglicht, da der piezoelektrische Effekt nur dynamisch ist. Hierfür eignen sich Positionen in der Nähe des Störkörpers, wo sich die sogenannte Karmannsche Wirbelstrasse bildet. Aufgrund des Totwassergebiets unmittelbar hinter dem Störkörper werden benachbarte Strömungsgebiete durch den Unterdruck hingezogen und es kommt zu einer Wirbelbildung [81]. Diese Wirbel lösen sich mit steigender Reynoldszahl alternierend ab und bewegen sich mit der Strömung. Mit steigender Entfernung zum Störkörper nehmen die Druckunterschiede ab. Abbildung 21 zeigt die Wirbelbildung hinter einem zylindrischen Störkörper.



Abbildung 21: Visualisierung der Karmannschen Wirbelstrasse von Jürgen Wagner (CC BY 4.0 DE)

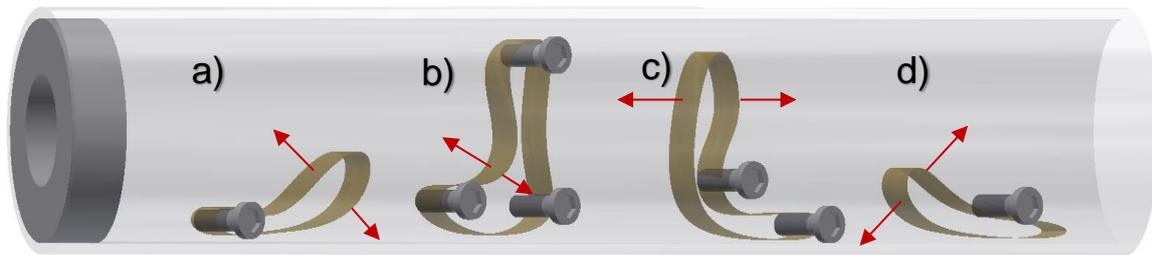


Abbildung 22: Prinzipskizze der einzelnen untersuchten Fixierungsformen im Rohr

Insgesamt wurden vier verschiedene Fixierungsformen im Rohr experimentell ermittelt und genauer untersucht. Diese vier Varianten sind in Abbildung 22 dargestellt. Getestet wurden Wickel mit einem Innendurchmesser von 27 mm. Für Testzwecke wurden die Wickel mit Hilfe einfacher Schrauben an den bestimmten Positionen fixiert. Das Ziel der Fixierung war bei allen vier Formen gleich. Durch die Strömung sollen die Wickel verformt werden bevor sie durch die Wirbel zurück in die Ausgangslage gezogen werden.

Die erste Form die untersucht wurde, in Abbildung 22 mit a) bezeichnet, ähnelt den „Aal“-Konzepten aus der Literatur [23], [71]. Der Wickel wurde mit Hilfe einer Schraube so fixiert, dass sein freies Ende in Strömungsrichtung zeigte und durch die alternierenden Wirbel flaggenähnlich oszillieren konnte. Die Höhe der Schraube und somit die Höhe des Wickels wurde bei den Untersuchungen variiert. Eine Fixierung in Rohrwandnähe erwies sich als effektiver im Vergleich zu einer zentrierten Aufhängung. Die weiteren Formen wurden so fixiert, dass das Material vorgespannt war. Form b) wurde mit Hilfe von drei Schrauben so aufgespannt, dass eine bistabile Beanspruchung der Lagen möglich war. Durch die Strömung wurden die PVDF-Lagen auf halber Rohrhöhe in den Wickel gedrückt, sodass dieser die Form eines „Stiefels“ annahm. Die in Abbildung 21 visualisierten Wirbel, die vereinzelt Gebiete mit Unterdruck darstellen, zogen die Lagen kurzfristig nach außen. Form c) war L-förmig fixiert, sodass das freie Wickelende mittig im Rohr war und somit die stärkste Strömung erfuhr. Durch die zusätzliche Schraube wurde verhindert, dass dieses freie Ende vollständig in Strömungsrichtung klappte und in eine ähnliche Form wie a) überging. Da der Wickel mit 27 mm Durchmesser zu lang für diese Fixierungsform war und somit das freie Ende durch die gegenüberliegende Rohrwand vom Oszillieren gehindert wurde, wurde ein Wickel mit einem Durchmesser von nur 20 mm untersucht. Diese neue Länge ermöglichte die letzte Form, die vom Prinzip der „Aal“-Form, nur in umgekehrter Richtung, ähnelte. Das freie Ende der Form d) schaute zum Störkörper hin und wurde durch die Strömung stark beansprucht. Durch die Wirbel entspannten sich die Lagen kurzfristig bis die Strömung diese erneut nach hinten drückte. Durch geeignete Positionierung der Fixierungsschraube, wurde die Steifigkeit des

Wickels so beeinflusst, dass die Lagen bei der vorhergesehenen Strömungsgeschwindigkeit nicht zurückgeklappt sind, sondern im Gleichgewicht blieben.

Im Wasser wurde zusätzlich eine weitere Form untersucht [82]. Diese wurde statt mit Schrauben mit Hilfe einer Federspange an die Rohrwand gedrückt. Die Spange hatte eine abgeschnittene Kreisform mit einem größeren Innendurchmesser als der des Rohres. Dadurch ließ sie sich im zusammengedrückten Zustand in das Rohr einführen und drückte im entspannten Zustand gegen die Rohrwände. Mit Hilfe der Spangenbreite ließ sich der Wickel aufspannen und die freie Länge einstellen. Auch hier drückte die Strömung die PVDF-Lagen in Strömungsrichtung und die Wirbel zogen die Lagen wieder kurzfristig in die Ursprungsposition zurück. Somit wurde die dynamische Wechselbelastung der Folien realisiert. Abbildung 23 verdeutlicht diese Fixierungsform. Um einen direkten Vergleich zwischen dieser Form und Form d) aus Abbildung 22 zu erhalten, wurde derselbe Wickel in beiden Formen untersucht. Als letztes wurde der Abstand zwischen dem Wickel und dem Störkörper variiert, um die Position mit der größten Wandlungseffizienz zu identifizieren. Bei allen Fixierungsformen der Wickel wurde darauf geachtet, dass der Verlauf der Kabel die Oszillation nicht beeinflusst. Die Kabelführung verlief immer in Schraubennähe, da dieser Bereich nicht Teil der Oszillation war.

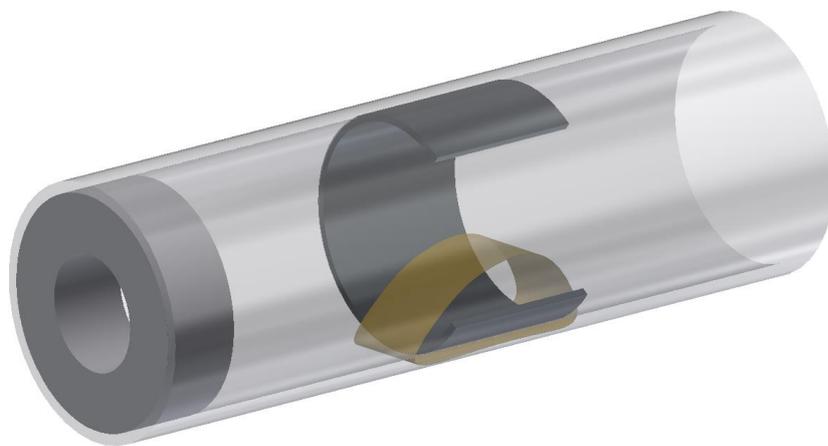


Abbildung 23: Wickelfixierung im Wasserrohr mit Hilfe einer Federspange

3.3.3. Elektrische Anordnung der PVDF-Lagen

Um mittels piezoelektrischen Materialien Energie zu wandeln, muss eine Ladungsauslöschung vermieden werden. Bei Biegewandlern wird das entweder durch eine unimorphe oder bimorphe Anordnung realisiert. Unimorphe Anordnungen besitzen neben der aktiven piezoelektrischen Schicht eine passive Schicht, die keinen aktiven Beitrag zur

Wandlung liefert. Bimorphe Strukturen dagegen nutzen zwei separate aktive Schichten. Diese können optional eine passive Zwischenschicht besitzen. Der Grund für die Notwendigkeit einer dieser beiden Strukturen basiert auf der Form der mechanischen Beanspruchung. Bei Biegebalken wird die Beanspruchung der Struktur durch deren Biegung verursacht. Abbildung 24 zeigt eine solche Beanspruchung. Zu erkennen ist hier, dass der obere Teil der Struktur eine Zugspannung erfährt und der untere eine Druckspannung. Die neutrale Faser entspricht der Faser, die keine mechanische Spannung erfährt und somit weder gedehnt noch gestaucht wird.

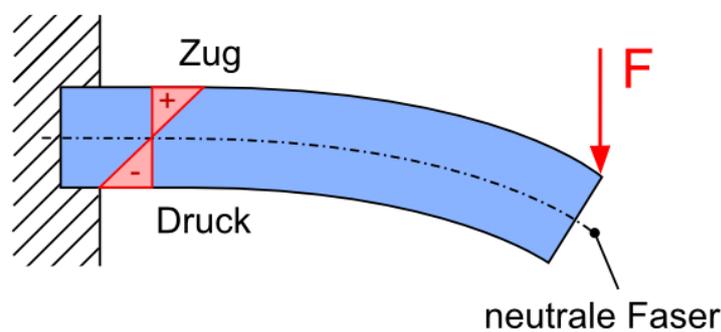


Abbildung 24: Verlauf der mechanischen Spannung in einem Biegebalken [83]

Mit einer einzelnen piezoelektrischen Schicht würde das bedeuten, dass die eine Hälfte des Materials die entgegengesetzte Ladungsverschiebung als die andere Hälfte erfährt. Somit würde die Summe dieser Ladungsverschiebungen Null ergeben und der Effekt ausgelöscht werden. Bei unimorphen und bimorphen Anordnungen wird der Aufbau so gewählt, dass die neutrale Faser außerhalb bzw. genau zwischen den piezoelektrischen Lagen ist, sodass keine Ladungsneutralisierung vorkommt. Beim Einsatz von bimorphen oder Anordnungen mit mehreren aktiven Lagen muss neben der mechanischen Anordnung auch die elektrische Schaltung dieser Lagen zu einander beachtet werden. Ausschlaggebend sind dabei die Polarisationsrichtung der einzelnen Lagen und das Vorzeichen der mechanischen Spannungen in diesen Lagen. Die Polarisationsrichtung gibt zusammen mit dem materialabhängigen Piezoeffizienten an, in welche Richtung die Ladung fließt. Basierend darauf, müssen die Lagen elektrisch entweder in Serie oder parallel geschaltet werden, um eine Auslöschung dieser Ladung zu verhindern.

Im Gegensatz zu starren Biegebalken handelt es sich im Rahmen dieser Arbeit um Strukturen aus mehrlagigen flexiblen Folien. Der genaue Verlauf der mechanischen Spannungen im Material und die Lage der neutralen Faser sind daher schwer zu ermitteln. Dennoch soll eine Ladungsauslöschung verhindert oder minimiert werden. Aus diesem Grund werden Wickel

mit unterschiedlicher elektrischer Schaltung verglichen, um festzustellen, welche der beiden Elektrodenanordnungen bei gleichen restlichen Bedingungen eine höhere Wandlungseffizienz ermöglicht. Wie Abbildung 25 verdeutlicht, ist abhängig von der Polarisationsrichtung entweder eine parallele oder serielle Konfiguration möglich. In der parallelen Anordnung (links) sind die anhand der Pfeile markierten Polarisationsrichtungen entgegengesetzt. Diese Konfiguration eignet sich für den Fall, dass beide Lagen die gleiche mechanische Spannung erfahren. Die serielle Anordnung (rechts) eignet sich für Fälle bei denen die eine Lage gedehnt wird, während die andere gestaucht wird.

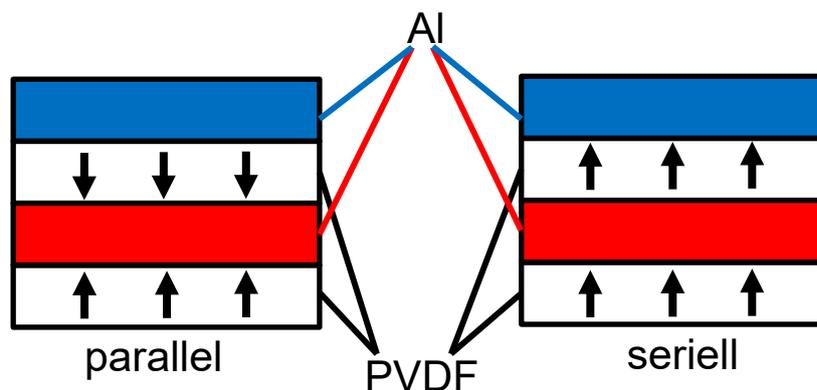


Abbildung 25: Unterschiedliche elektrische Konfigurationen der PVDF-Lagen

Beide möglichen Konfigurationen wurden im Wasser untersucht. Um einen direkten Vergleich zu ermöglichen, wurden zwei Wickel getestet, die außer ihrer elektrischen Konfiguration identische Parameter hatten. Um den Einfluss der elektrischen Konfiguration unabhängig von der Windungszahl zu erkennen, wurde dieser Vergleich zusätzlich mit unterschiedlichen Windungszahlen durchgeführt.

3.3.4. Ermittlung einer geeigneten Anzahl von Windungen

Wie Formel (10) in Abschnitt 3.3 zeigt, hängt die elektrische Leistung vom Volumen des Harvesters ab. Mit Ausnahme der Länge, sind die weiteren Dimensionen aufgrund der verfügbaren Folienrollen unveränderlich. Die Länge des Harvesters lässt sich anhand der Windungszahl verändern. Dabei bezieht sich dieser Parameter nur auf die aktive Länge, also auf Windungen die sowohl PVDF- als auch Elektroden-Lagen beinhalten. Passive Windungen, die für die Fertigung notwendig sind haben keinen positiven Effekt auf die Wandlung und wurden bei den Untersuchungen nicht verändert. Die Vergrößerung der Windungszahl ist mit einer Zunahme der Masse und der effektiven Wickeldicke verbunden. Diese Zunahme verändert Wickeleigenschaften wie das Trägheitsmoment und die Federsteifigkeit und wirkt

sich somit stark auf das Verhalten des Wickels in der Strömung aus. Um zu ermitteln, welche dieser Effekte dominiert und zur Feststellung einer geeigneten Windungszahl, wurden mehrere Wickel mit unterschiedlichen Windungen im Wasser untersucht. Die restlichen Parameter der Herstellung wurden dabei konstant gehalten. Das betrifft vor allem die restlichen Dimensionen wie Breite und Dicke aber auch die elektrische Konfiguration der PVDF-Lagen. Verglichen wurden Wickel mit drei, vier und sechs Windungen. Im Laufe der Versuche stellte sich heraus, dass die Wandlungseffizienz der nach Abbildung 23 fixierten Wickel deutlich höher war im Vergleich zu den restlichen Fixierungsvarianten. Aus diesem Grund wurden die restlichen Varianten bei den Untersuchungen zur windungsabhängigen Wandlungseffizienz ausgeschlossen. Diese Untersuchungen wurden insgesamt zwei Mal durchgeführt. Beim ersten Durchgang wurden Wickel mit paralleler Anordnung der PVDF-Lagen verglichen. Der zweite Durchgang untersuchte Wickel mit serieller Konfiguration. Dadurch sollte ein möglicher Einfluss der elektrischen Konfiguration eliminiert werden und eine eindeutige Abhängigkeit der Wandlungseffizienz von der Windungszahl ermittelt werden.

3.4. Messergebnisse und Erkenntnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der in Abschnitt 3.3 beschriebenen Untersuchungen in Luft und Wasser präsentiert. Für einen deutlicheren Graphverlauf, sind nur kurze Zeitabschnitte der Spannungsverläufe präsentiert. Da die händische Herstellung der Muster zu extremen Abweichungen in den Ergebnissen führte, wurden keine statistischen Mittelwerte und Fehlerabweichungen an dieser Stelle berücksichtigt. Die dargestellten Werte spiegeln lediglich das maximal erreichte Potential der untersuchten Anordnungen wieder und sollen Aufschluss geben, ob und welche Harvestingansätze für praktische Anwendungen effektiv sind.

3.4.1. Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Fixierung

Beginnend mit den Untersuchungen im Windkanal wurde zuerst die Fixierung des Wickels als „Aal“ untersucht. Der Spannungsverlauf in Abbildung 26 bestätigt die optisch erkannte Oszillation und dynamische Belastung des Materials. Der Effektivwert der Leerlaufspannung liegt bei 290 mV. Ähnliche Werte lieferten auch die Fixierungsformen als Stiefel und in L-Form. Die Spannung von Spitze zu Spitze liegt auch bei diesen Formen im Bereich ein bis zwei Volt und die Effektivwerte sind bei der Stiefelform 280 mV und bei der L-Form 210 mV. Das deutet daraufhin, dass der Wickel in den drei Fixierungsformen ähnlich beansprucht wurde

und zu einer stabilen Oszillation angeregt wurde. Abbildung 26 bis Abbildung 28 zeigen die Spannungsverläufe der Fixierungsformen a), b) und c) aus Abbildung 22.

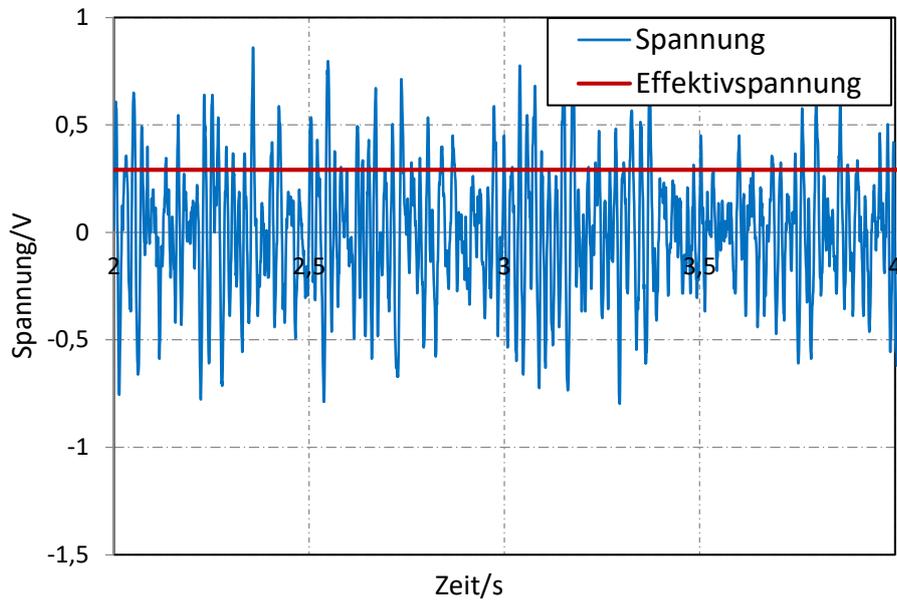


Abbildung 26: Leerlaufspannungsverlauf eines Wickels in "Aal"-Form getestet im Windkanal

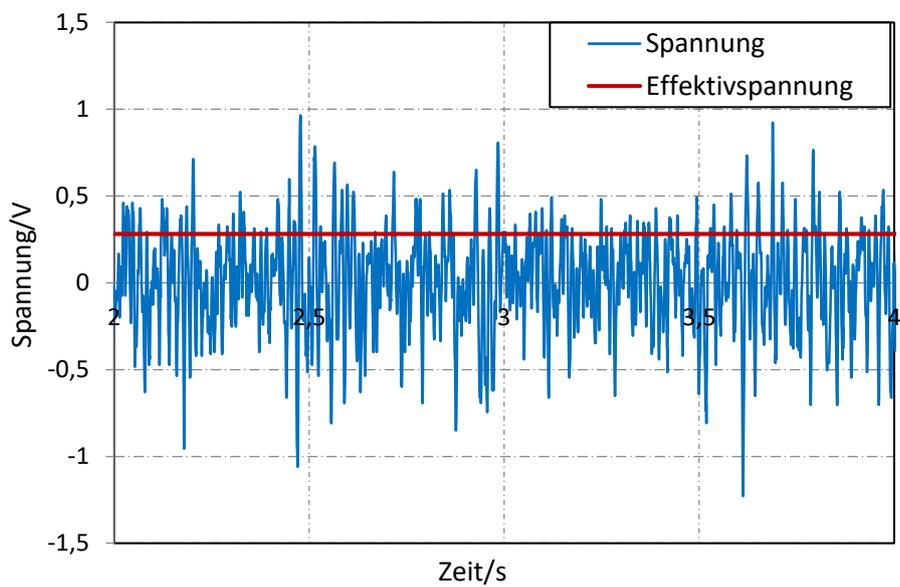


Abbildung 27: Leerlaufspannungsverlauf eines Wickels in Stiefelform getestet im Windkanal

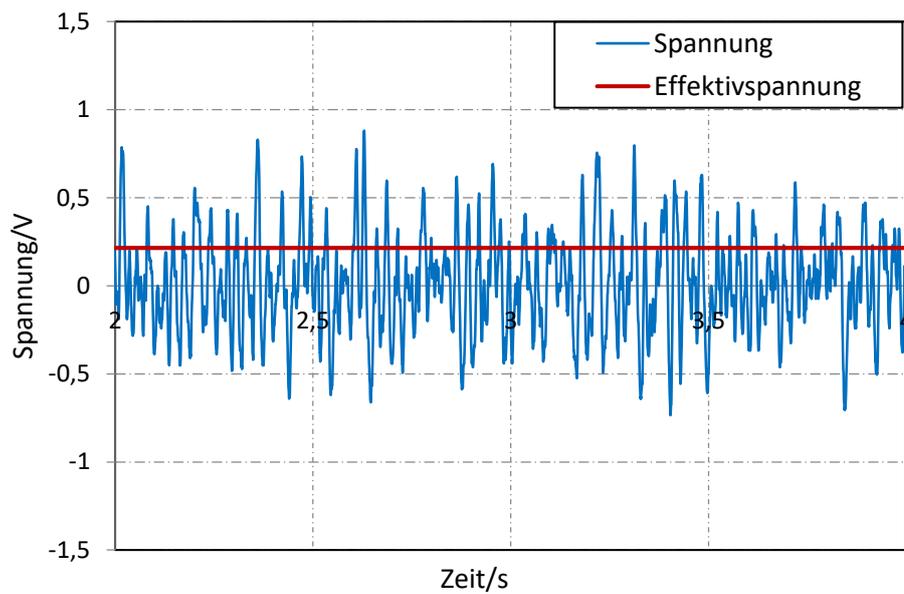


Abbildung 28: Leerlaufspannungsverlauf eines Wickels in L-Form getestet im Windkanal

Wie bei der Fixierung in L-Form wurde die letzte Fixierungsmethode aus Abbildung 22, nämlich der umgekehrte „Aal“, mit Hilfe eines kürzeren Wickels realisiert. Durch die erhöhte Steifigkeit des Wickels ist es möglich, diesen gegen die Strömungsrichtung zu platzieren. Das ermöglicht eine stärkere Belastung. Dabei ist es wichtig diese Steifigkeit einzustellen, damit eine stabile Oszillation realisiert wird. Die Steifigkeit hängt von der freien Länge des Wickelendes ab, das nicht durch die Fixierungsschraube gedrückt wird. Ist diese Länge zu groß, ist der Wickel zu weich und wird von der Strömung nach hinten gedrückt. Ist sie zu kurz, ist der Wickel zu steif und hat eine zu kleine Angriffsfläche und wird kaum bewegt. Im Verlauf der Experimente stellte sich heraus, dass die optimale freie Länge, gemessen ab der Fixierungsschraube, im Wind 13 mm beträgt. Mit dieser Konfiguration ist eine stärkere Beanspruchung des Materials möglich als bei den anderen Fixierungsformen. Abbildung 29 zeigt den Verlauf der Spannung, die Spitze-Spitze-Werte zwischen vier und fünf Volt erreicht. Der Effektivwert liegt bei 1,1 V. Neben der größeren Amplitude dieses Spannungsverlaufs, ist eine deutlich sauberere Linie zu erkennen, die auf eine stabile und wiederholte Beanspruchung der PVDF-Lagen deutet. Die Fixierung in umgekehrter „Aal“-Form führt also nicht nur zu höheren mechanischen Spannungen im Material, sondern auch zu einer stabileren Oszillation im Vergleich zu den anderen Formen.

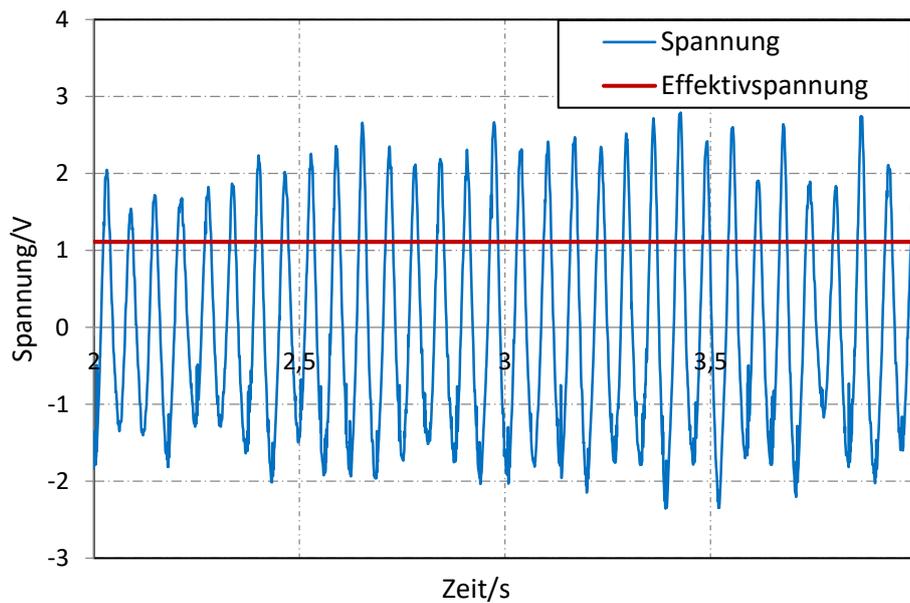


Abbildung 29: Leerlaufspannungsverlauf eines Wickels in umgekehrter "Aal"-Form getestet im Windkanal

Neben der freien Länge des Wickels spielt auch der Abstand des Wickels vom Störkörper eine große Rolle auf die mechanische Beanspruchung des Materials. Ist der Abstand zu gering, sind die induzierten Wirbel noch nicht vollständig ausgebildet. Bei einer zu fernen Platzierung hingegen, kann es dazu kommen, dass die Wirbel bereits ausgelöscht sind. Beide Möglichkeiten führen zu einer reduzierten Beanspruchung des Wickels. Um eine geeignete Position zu finden, wurde der Wickel in verschiedenen Abständen vom Störkörper getestet. Dabei wurde der Abstand zwischen Störkörper und Fixierungsschraube gemessen und zwischen 2 cm und 5,5 cm variiert.

Tabelle 2: Auswirkung des Wickelabstands vom Störkörper auf die mechanische Beanspruchung

Abstand vom Störkörper	2 cm	2,5 cm	3,5 cm	5,5 cm
Effektivspannung	1,2 V	1,4 V	1,1 V	0,8 V

Wie aus Tabelle 2 zu erkennen ist, kann mit Hilfe dieser Fixierungsform und der Wahl des geeigneten Abstands von 2,5 cm eine noch höhere mechanische Beanspruchung erreicht werden, als mit den anderen Fixierungsformen aus Abbildung 22. Diese wird durch eine höhere Effektivspannung von 1,4 V reflektiert. Um die generatorische Wirkung des Prinzips zu beurteilen, wurde die Leistung ermittelt, die mit dieser Fixierungsform erzeugt wurde. Mit Hilfe unterschiedlicher ohmscher Lasten zwischen 100 k Ω und dem Gigaohmbereich wurde eine Leistungsanpassung durchgeführt und die Leistung P_L mit Hilfe der Spannung U_L über dem Lastwiderstand R_L nach Formel (10) berechnet. Bei einer angepassten Last von 2 M Ω

kann eine elektrische Leistung von 540 nW entnommen werden. Dieser Wert ist bei einer Windgeschwindigkeit von 7 m/s, einem Abstand vom Störkörper von 2,5 cm, einer freien Länge von 13 mm und 4 Windungen erreicht worden. Abbildung 30 zeigt die Kurve der Leistungsanpassung und den korrespondierenden Verlauf der Effektivspannung.

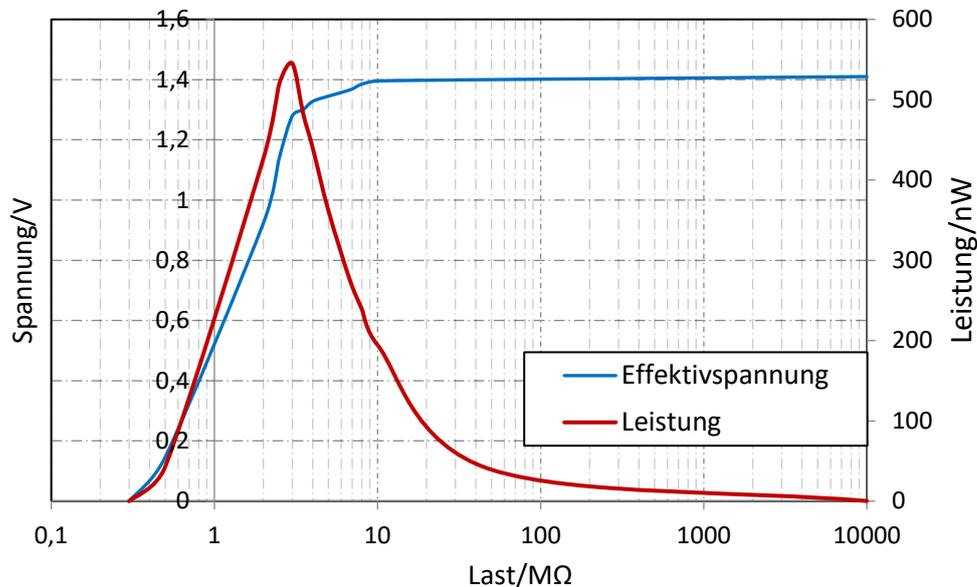


Abbildung 30: Leistungsanpassung eines umgekehrten "Aals" im Wind mit 4 Windungen bei optimalem Abstand und freier Länge

Die gleiche Fixierungsform ist ebenso im Wasser untersucht worden. Aufgrund der anderen Dichte des Wassers und somit der anderen kinetischen Energie im Rohr, waren einige Anpassungen notwendig. Die ermittelte Konfiguration aus den Untersuchungen im Windkanal ist für den Einsatz im Wasser ungeeignet. Bei einer freien Länge von 13 mm besitzt der Wickel nicht mehr die notwendige Steifigkeit, um der Strömung ausreichend Stand zu halten. Somit kippt das freie Ende komplett in Strömungsrichtung und eine stabile wechselnde Beanspruchung bleibt aus. Eine erhöhte Steifigkeit lässt sich durch verkürzen der freien Länge oder durch eine Vergrößerung der Windungszahl erreichen. Für Windungszahlen zwischen vier und sieben beträgt die maximale freie Länge, die eine stabile Oszillation ermöglicht, 8 mm. Bei einer Strömungsgeschwindigkeit von ca. 0,6 m/s fängt der Wickel an zu oszillieren. Geschwindigkeiten unterhalb dieses Werts sind zu schwach, um den Wickel aus seiner Ruhelage in eine stabile Oszillation zu erzwingen. Das gleiche Verhalten ist im Windkanal zu beobachten, wobei aufgrund der geringeren Dichte der Luft eine deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeit von 7 m/s notwendig ist. Bei einer Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit über diesen Werten, ist die Strömung zu stark, sodass der Wickel nach hinten gedrückt wird und der Unterdruck der Wirbel nicht ausreicht, um ihn in die

Ursprungslage zurück zu ziehen. Ein Abfall der Spannung konnte im Wasser bei einem Wickel mit fünf Windungen bereits ab einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,7 m/s beobachtet werden. Aufgrund der begrenzten Strömungsgeschwindigkeit des Windkanals auf 7 m/s, konnte dieses Verhalten im Wind nicht validiert werden. Es ist jedoch stark damit zu rechnen. Abbildung 31 zeigt die Einschaltgeschwindigkeiten in Wasser und Wind anhand des Verlaufs der Effektivspannung. Bei einer Geschwindigkeit im Wasser von 0,68 m/s kann bei einer angepassten Last von 480 k Ω eine maximal Leistung von 333 nW von einem Wickel mit fünf Windungen und 8 mm freien Länge entnommen werden. Abbildung 32 zeigt die Kurve für diese Leistungsanpassung und die maximal erreichte Leistung.

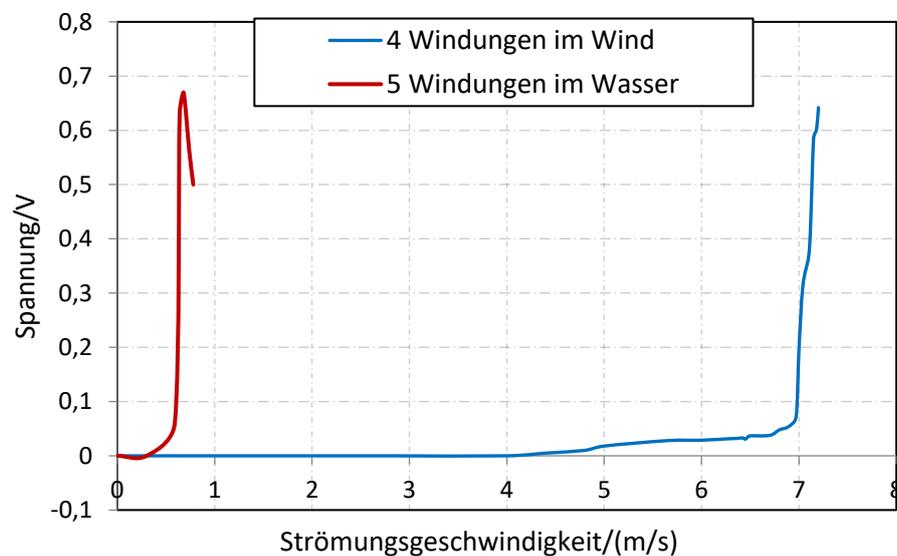


Abbildung 31: Einschaltgeschwindigkeiten für umgekehrte "Aals" in Wasser (rot) und Wind (blau)

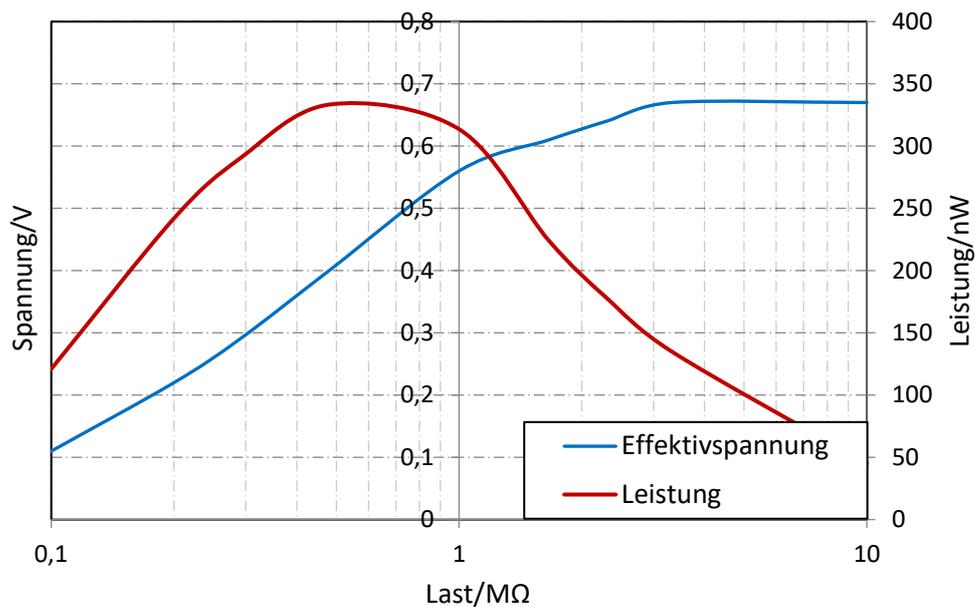


Abbildung 32: Leistungsanpassung eines umgekehrten "Aals" im Wasser mit 5 Windungen

Weiterhin wurde im Wasser eine zusätzliche Fixierungsform näher untersucht. Diese Form ähnelt einer Ellipse und ist in Abbildung 23 zu sehen. Aufgrund der geringeren Energie in der Windströmung, war diese Fixierungsform ursprünglich ineffektiv. Im Wasser stellte sich jedoch heraus, dass diese Form eine stabile und effektive Wandlung ermöglicht. Abbildung 33 zeigt die maximal erreichte Leistung eines Wickels mit vier Windungen, der im Wasser in Ellipsenform fixiert wurde. 500 nW an elektrischer Leistung konnten an einer angepassten Last von 700 kΩ bei einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,74 m/s umgesetzt werden.

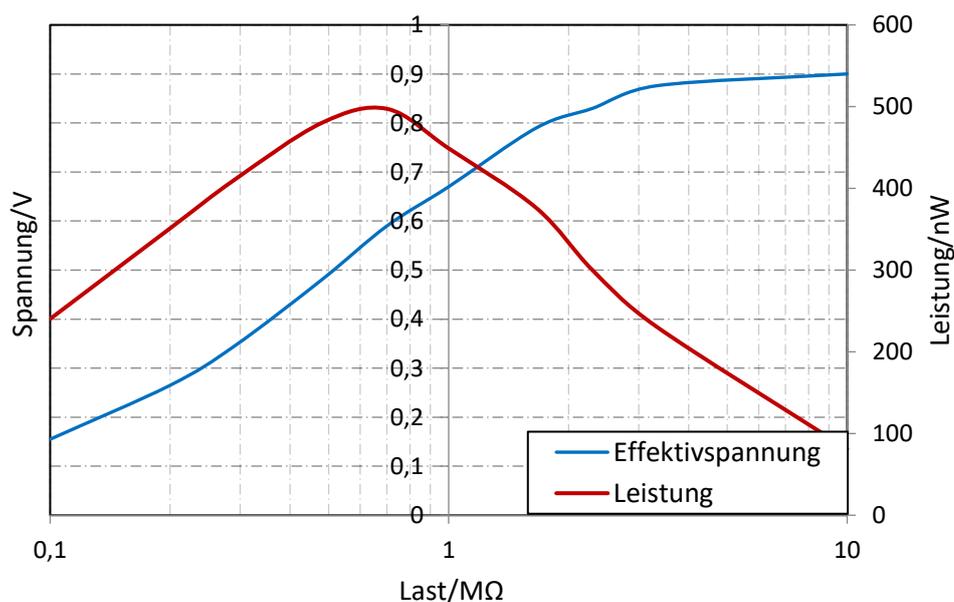


Abbildung 33: Leistungsanpassung einer Ellipsenform im Wasser mit 4 Windungen

Da die erreichten Werte mit Hilfe des umgekehrten „Aals“ und der Ellipsenform in der gleichen Größenordnung liegen und dieser Unterschied durch Fertigungstoleranzen hervorgerufen sein könnte, wurde ein direkter Vergleich der beiden Formen mit einem einzigen Wickel durchgeführt. Unabhängig von den erreichten Werten, zeigt dieser Vergleich qualitativ, welcher dieser beiden Formen eine effektivere Wandlung im Wasser ermöglicht. Ein Wickel mit vier Windungen wurde dafür zuerst als umgekehrter „Aal“ fixiert und getestet und anschließend ellipsenförmig fixiert und erneut getestet. Die Reihenfolge der Untersuchung wurde so gewählt, damit Beschädigungen am Wickel durch die Fixierung minimiert werden und die Ergebnisse dadurch unverfälscht bleiben. Abbildung 34 bestätigt das Ergebnis der vorausgegangenen Untersuchungen und deutet auf eine effektivere Wandlung mit Hilfe der Ellipsenform. Unabhängig von Fertigungstoleranzen ist mit der Ellipsenform eine über vierfache Leistung im Gegensatz zum umgekehrten „Aal“ gewandelt worden. Da die Fixierung als umgekehrten „Aal“ zuerst untersucht wurde, ist die geringere Leistung nicht auf Wickelbeschädigungen oder Undichtigkeiten zurückzuführen.

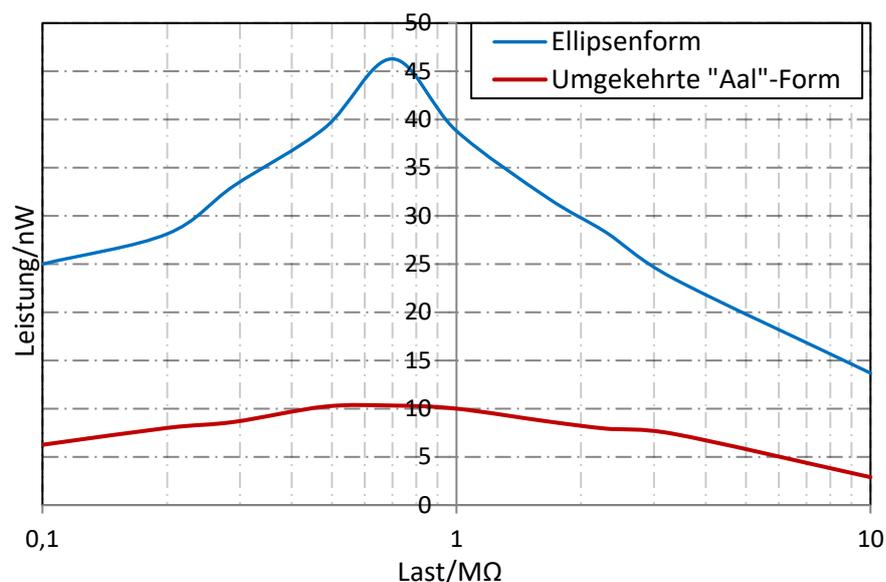


Abbildung 34: Leistungsanpassung beim direkten Vergleich eines Wickels mit 4 Windungen in umgekehrter „Aal“-Form und Ellipsenform

3.4.2. Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Konfiguration der Lagen

Abschnitt 3.3.3 erklärt wie es beim Nutzen von mehrlagigen Konfigurationen zu einer Ladungsauslöschung kommen könnte. Solch eine Auslöschung verringert die Effizienz der Wandlung und sollte daher minimiert werden. Anders als bei starren Biegebalken ist hier die

genaue Vorhersage des Verlaufs der mechanischen Spannung in den verschiedenen Lagen deutlich komplizierter. Aus diesem Grund wurde experimentell untersucht, welche Konfiguration zu einer geringeren Auslöschung führt und somit zu einer höheren Wandlungseffizienz. Ein Vergleich von zwei Wickel mit jeweils vier Windungen die beide in Ellipsenform fixiert wurden und sich nur in ihrer elektrischen Konfiguration unterschieden haben deutet darauf hin, dass eine serielle Konfiguration laut Abbildung 25 eine höhere Wandlungseffizienz ermöglicht. In Abbildung 35 ist zu erkennen, dass ein Wickel mit paralleler PVDF-Konfiguration fast 40 % weniger Leistung bereitstellt, als ein vergleichbarer Wickel mit serieller Anordnung. Da jedoch Fertigungstoleranzen einen Einfluss auf dieses Ergebnis haben könnten, wurde dieser Vergleich auch bei Wickel mit anderen Windungszahlen durchgeführt. Die Resultate dieser weiteren Untersuchungen sind in Abschnitt 3.4.3 präsentiert und bestätigen das Ergebnis aus Abbildung 35.

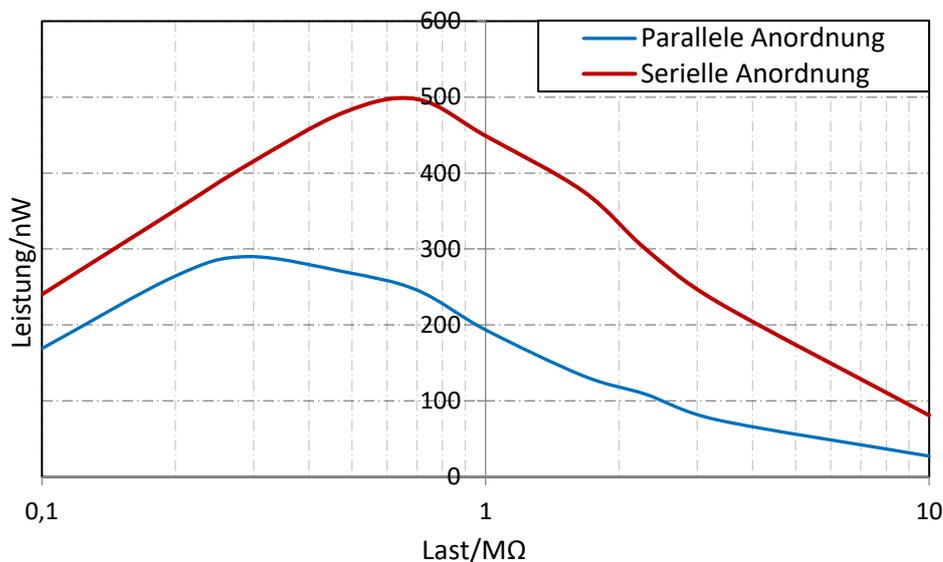


Abbildung 35: Vergleich der unterschiedlichen PVDF-Konfigurationen, um eine Ladungsneutralisierung zu vermeiden

3.4.3. Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Anzahl der Windungen

Der letzte Parameter, der untersucht wurde, betrifft die Anzahl der Windungen. Dieser Parameter beeinflusst die Länge des Wickels, die wiederum die aktive Fläche beeinflusst. Dadurch verändert sich die Kapazität des Wickels und somit die elektrischen Eigenschaften, aber auch die Masse des Wickels durch die Volumenzunahme. Durch eine höhere Windungszahl wird die effektive Dicke des Wickels auch größer und somit die Steifigkeit

verändert. Experimentelle Untersuchungen mit unterschiedlichen Windungszahlen sollen Tendenzen hervorheben, um zu erkennen welche dieser Veränderungen dominiert und wie sich die Wandlungseffizienz dadurch beeinflussen lässt. Bei den ersten Untersuchungen wurden Wickel mit drei, vier und sechs Windungen in Ellipsenform getestet. Die Wickel hatten eine parallele Konfiguration der PVDF-Lagen. Die blaue Kurve in Abbildung 36 zeigt eine klare Tendenz einer steigenden Leistung mit sinkender Windungszahl. Der Wickel mit drei Windungen erreicht bis zu 375 nW während der mit vier nur 290 nW und der mit sechs nur 130 nW erreicht. Um einen Einfluss der PVDF-Konfiguration zu eliminieren, wurde die gleiche Untersuchung für Wickel mit serieller Anordnung durchgeführt. Auch hier ist die umgekehrte Proportionalität der Leistung zur Anzahl der Windungen anhand Abbildung 36 klar zu erkennen. Der Wickel mit drei Windungen erreicht mit 540 nW die bisher höchste Leistung und ist gefolgt von dem mit vier Windungen bei 500 nW. Schließlich liefert der Wickel mit sechs Windungen nur 85 nW. Aus dieser Tendenz lässt sich erkennen, dass eine Versteifung des Wickels durch die Zunahme dessen effektiver Dicke oder die Vergrößerung der Masse durch die Volumenzunahme die mechanische Beanspruchung des Wickels so stark reduzieren, dass dadurch die generierte elektrische Leistung reduziert wird und der Effekt einer größeren aktiven Fläche aus Formel (10) nicht zur Geltung kommt.

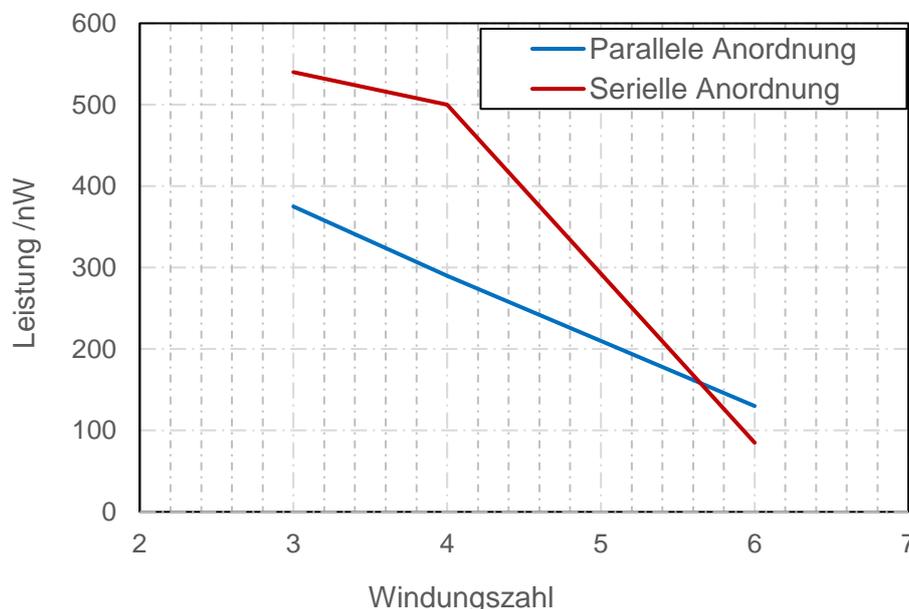


Abbildung 36: Abhängigkeit der gewandelten Leistung von der Windungszahl und PVDF-Konfiguration für ellipsenförmige Wickel im Wasser

Die Leistungsdichte bezogen auf das Volumen nimmt also mit steigender Windungszahl stark ab. Da die Foliendicke viel kleiner als die Lagenbreite und -länge ist, kann das Volumen der

aktiven Lagen vereinfacht mit Hilfe von Formel (11) berechnet werden. Der Wickel wird zusammengedrückt als Rechteck angenommen und die gestapelten Lagen werden einzeln berechnet und addiert. Die Rechtecklänge, l_R beträgt dabei den halben Umfang des Wickels und kann mit Hilfe des Wickeldorndurchmessers von 25 mm bestimmt werden. Die Lagen werden pro Windung vier mal angerechnet, da nach Abbildung 13 die Wicklung mit einer Doppelschicht ausgeführt wird. Somit liegen bei dieser vereinfachten Annahme pro Windung vier Lagen PVDF und vier Lagen Aluminium alternierend übereinander. Die Lagen berechnen sich aus der Dicke und Breite der jeweiligen Schichten und sind gekennzeichnet durch d mit einem entsprechenden Index. Die Anzahl der Windungen wird mit n_w berücksichtigt. Die resultierenden Volumina und die entsprechenden Leistungsdichten der Wickel mit paralleler und serieller Konfiguration sind in Tabelle 3 abhängig von der Windungszahl aufgelistet.

$$V_{aktiv} = 4n_w l_R (d_{PVDF} b_{PVDF} + d_{Al} b_{Al}) \quad (11)$$

Tabelle 3: Leistungsdichte bezogen auf die aktiven Volumina bei paralleler und serieller Anordnung der Harvester

Windungen	Volumen	parallel		seriell	
		Leistung	Leistungsdichte	Leistung	Leistungsdichte
3	0,192 cm ³	375 nW	1.950 μW/cm ³	540 nW	2.809 μW/cm ³
4	0,256 cm ³	290 nW	1.131 μW/cm ³	500 nW	1.9509 μW/cm ³
6	0,385 cm ³	130 nW	0.338 μW/cm ³	85 nW	0.2219 μW/cm ³

Mit dieser Erkenntnis muss das Gesamtkonzept des Wickels in Frage gestellt werden. Das ursprüngliche Ziel einer vergrößerten aktiven Fläche im gleichen Rohrabschnitt erwies sich als nachteilig in Bezug auf die Wandlungseffizienz und erschwert zudem die Herstellung im Vergleich zu einfacheren Konfigurationen die aus der Literatur bekannt sind.

Zusätzlich zur Erkenntnis über die Abhängigkeit der elektrischen Leistung von der Anzahl der Windungen bestätigen diese Untersuchungen das Ergebnis aus Abschnitt 3.4.2. Wickel mit einer seriellen Anordnung der PVDF-Lagen erreichen im Schnitt eine um 13 % höhere Ausgangsleistung. Werden die Wickel mit sechs Windungen aus diesem Vergleich ausgeschlossen, beträgt der Unterschied sogar 37 %. Das bedeutet, dass bei der Ellipsenform die unterschiedlichen Lagen, ähnlich wie bei einem Biegebalken, nicht die gleiche mechanische Spannung erfahren. Während einige der Lagen gedehnt werden, werden andere gleichzeitig gestaucht. Somit eignet sich eine serielle Anordnung besser für die Minimierung einer Ladungsauslöschung und somit für die Erhöhung der Wandlungseffizienz.

3.5. Rohraufnahmesystem und Verpackung

Nach der Charakterisierung der Wickel und Festlegung der verschiedenen Parameter und Konfigurationen, lag der Fokus auf eine geeignete Verpackung der notwendigen Systemkomponenten, sodass die Fertigung des Systems und der Einbau im Rohr so einfach wie möglich gestaltet werden können. Die notwendigen Systemkomponenten sind neben dem beschriebenen piezoelektrischen Wandler eine Leiterplatte und eine Schnittstelle zur Verbindung von Sensoren. Die Leiterplatte ist perspektivisch mit einer Schaltung für das Energiemanagement, einem Speicherelement, einem Mikrocontroller sowie einem Funkmodul bestückt. Das Energiemanagement übernimmt die Gleichrichtung sowie die effiziente Extraktion der geernteten Ladung und wird zwischen dem Wandler und dem Speicher geschaltet. Im Speicher wird die Ladung akkumuliert, sodass bei Bedarf ausreichend Energie zur Verfügung gestellt werden kann. Aus diesem Speicher wird der Mikrocontroller versorgt, der über die Schnittstelle die Daten aus dem Sensor lesen kann und mit Hilfe des Funkmoduls drahtlos versenden soll. Damit diese Systemkomponenten keinen zusätzlichen Platz im Rohr benötigen und dadurch ein zusätzlicher Druckverlust entsteht, werden diese im Störkörper untergebracht. Hierfür soll eine flexible Leiterplatte mit SMD-Bauteilen verwendet werden. Der Störkörper bietet weiterhin Platz für universale wasserdichte Schnittstellen wie Micro-USB-Anschlüsse mit IP68 Klassifizierung. Die Komponenten wurden in eine Form platziert und eingegossen. Um das zu veranschaulichen, wurde ein durchsichtiges Epoxidharz verwendet. Abbildung 37 verdeutlicht das Störkörperkonzept. Dabei ist die flexible Leiterplatte in Braun. Das blaue Kabel fungiert als Antenne für das Funkmodul.



Abbildung 37: Störkörper aus Gießharz mit flexibler Leiterplatte und Micro-USB-Schnittstelle

Damit der Wickel im Rohr einfach und präzise positioniert wird, wurde ein weiteres Teil gegossen. Dieses Teil bildet eine halbrunde Aufnahmeschale, die mit dem gleichen Radius gekrümmt ist, wie die Rohrwand. Dadurch liegt sie stabil im Rohr. Die Aufnahmeschale besitzt an ihren Rändern eine Lippe, die nach innen zeigt und somit das Einrasten des Wickels ermöglicht. Die Aufnahmeschale geht in einem hohlen Steg über, der mit dem Störkörper verbunden wird. Somit ist der richtige Abstand vorgegeben, an dem der Wickel platziert wird. Um den Wandler mit den restlichen Komponenten elektrisch zu verbinden, wurde ein verändertes Konzept gewählt im Vergleich zu der prototypischen Fertigung aus Abschnitt 3.2. Um die Wickelherstellung zu vereinfachen, wurde auf die bisherige Verkabelung der Kontakte verzichtet (vgl. Abbildung 17 d) - f)). Der Wickel wird also vollständig mit Hilfe der LDPE-Hülle abgedichtet. Für die Kontaktierung dienen zwei isolierte Kupferdrähte, die direkt an die Leiterplatte angebracht sind. Diese werden mit dem Störkörper eingegossen, sodass jeweils nur ein Ende dieser Kupferdrähte frei liegt. Dieses freie Ende führt zu dünnen Steckern, die mitten in der Aufnahmeschale platziert sind. Beim Einrasten des Wickels in die Aufnahmeschale, werden die Kontaktpads nach unten platziert, sodass die Stecker die LDPE-Hülle durchstechen und den Kontakt herstellen. Um die nun undichte Stelle vor dem Eindringen des Wassers zu schützen, ist um den Steckern herum eine Aussparung in der Aufnahmeschale die mit einem Silikondichtring besetzt wird. Beim Einrasten der oberen Schale in die Aufnahmeschale, wird ausreichend Druck auf den Ring ausgeübt, dass dieser die Kontaktierung abdichten kann. Abbildung 38 verdeutlicht dieses Konzept mit Hilfe einer Explosionsdarstellung der einzelnen Systemteile.

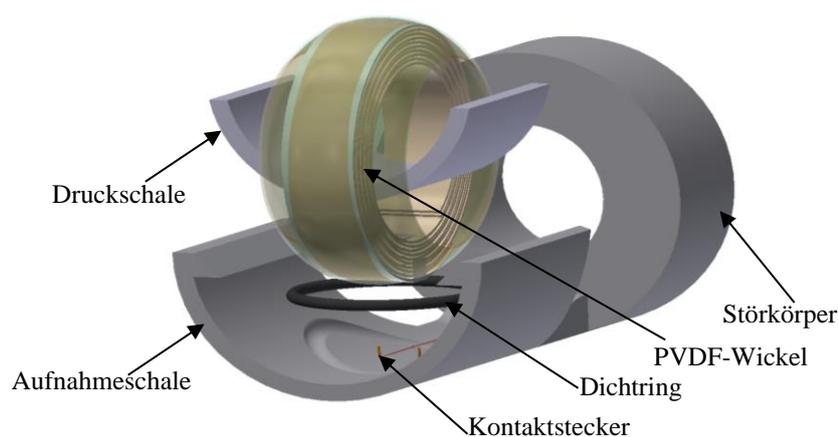


Abbildung 38: Explosionsdarstellung des Aufnahmesystems des Strömungsharvesters im Rohr

4. Piezoelektrische Harvester zur Aufnahme von Druckimpulsen

Druckänderungen und mechanische Belastungen stellen einen wichtigen Parameter zur Detektion verschiedener Ereignisse dar. Mit deren Hilfe lässt sich beispielsweise die Belegung einer Fläche oder die Bewegung eines Objekts feststellen. Die Erfassung dieser Veränderungen lässt sich mit einfachen mechano-elektrischen Wandlern realisieren. Darunter fallen piezoresistive, piezoelektrische, kapazitive und elektromagnetische Wandler. Die erzeugten Signale werden dabei per Funk oder über Kabel an die Auswerteeinheit weitergeleitet. Typische Versorgungsmethoden dieser Sensorsysteme mit Hilfe vom Stromnetz oder Batterien, schränken deren wartungsfreien Einsatzmöglichkeiten und Einsatzdauer ein. Der Einsatz von Energy Harvestern eignet sich aufgrund der verfügbaren Umgebungsenergie besonders gut, um diese Einschränkungen zu umgehen. Da das zu detektierende Ereignis immer mit einer Druckänderung verbunden ist, kann der Harvester diese Energie nutzen um das Überwachungssystem autark zu betreiben. Im Folgenden wird ein mögliches Harvestingprinzip diskutiert, welches dieses Konzept realisiert. Das Grundkonzept ist in einer früheren Arbeit von Bischur und Schwesinger entstanden und wird im Rahmen dieser Arbeit weiter verfolgt [84].

4.1. Aufbau und Wirkprinzip

Von den möglichen physikalischen Effekten zur Erfassung von Druckänderungen, vor allem bei impulsförmiger Änderung, weisen piezoelektrische, kapazitive und elektromagnetische Ansätze zusätzlich zum sensorischen Effekt einen generatorischen. Somit können sie eigenständig elektrische Energie bereitstellen, die zur Versorgung der Systeme genutzt werden kann. Reine sensorische Effekte, wie der piezoresistive Effekt, benötigen eine ständige Zufuhr an elektrische Energie, um eine Druckänderung zu erfassen.

Zur Bestimmung der Energie, die durch Energy Harvester bereitgestellt werden könnte, ist eine Einschätzung der verfügbaren Umgebungsenergie notwendig. Anhand eines Beispiels zum Wandeln von menschlicher Schrittenergie, wurde die mechanische Energie bestimmt. Für eine durchschnittliche Person mit einer Gehgeschwindigkeit von 1 Hz und einer Deflektion des Bodens um 1 cm beträgt die wandelbare mechanische Energie 7,5 Ws [84].

Beispiele von möglichen Wandlern sind in Abschnitt 2.1.2 vorgestellt worden. Im Rahmen dieses Projekts, wird der piezoelektrische Wandlungseffekt zum Wandeln der mechanischen Energie genutzt. Im Vergleich zu elektromagnetischen Wandlern, basiert der piezoelektrische Effekt auf Festkörpereigenschaften. Dadurch kann die Gesamtgröße des Harvesters kleiner und flacher gestaltet werden. Weiterhin wird Verschleiß, der durch bewegliche oder rotierende Teile verursacht wird, eliminiert. Im Vergleich zu kapazitiven Harvesterkonzepten benötigt der piezoelektrische Wandler kein Aufladen der internen Kapazität und ist dadurch direkt einsetzbar. Die Wahl des piezoelektrischen Materials ist aufgrund der in Abschnitt 2.1.1 genannten Vorteile auf PVDF gefallen. Auch die mechanischen Eigenschaften des PVDFs begünstigen dessen Einsatz im Vergleich zu den piezoelektrischen Keramiken. Ab Dehnungswerten von 0,8 % übersteigt der Output des PVDFs den der Keramiken, obwohl letztere Gruppe meist höhere Piezokoeffizienten hat. Der Grund liegt an der Sprödigkeit der Keramiken und die Begrenzung der maximal möglichen Dehnung auf ca. 0,1 % [45]. Somit kann PVDF eine größere mechanische Energie aufnehmen und trotz des geringeren k-Faktors eine höhere elektrische Energie bereitstellen. Nach dem gleichen Prinzip wie in Abschnitt 3.1 wird auch hier die PVDF-Folie gewickelt, um ein größeres aktives Volumen zu erzeugen und dadurch den möglichen Ertrag zu vergrößern. Ein großer elektrischer Ertrag benötigt neben dem großen Volumen auch eine große Kraft, die dieses Volumen mechanisch belastet. Im Fall eines einfachen Einbaus des Wickels im Boden und eine vertikale Krafteinwirkung, würde nur der piezoelektrische Längseffekt genutzt werden. Bei den Voruntersuchungen ist bewiesen worden, dass dieser Effekt äußerst ineffektiv ist [84]. Das liegt zum einen an der geringen Foliendicke im Bereich von 30 μm , zum anderen aber an der größeren Querschnittsfläche auf die sich die Kraft verteilt und somit geringere mechanische Spannungen erzeugt. Sinnvoller ist die Nutzung des Quereffekts zum Erreichen eines größeren Outputs durch starke Dehnung der Folienlagen. Um den Quereffekt nutzen zu können, muss die vertikale Kraft in eine horizontale gewandelt werden. Übliche Prinzipien aus der Literatur nutzen dabei federnde Konstruktionen die eine Zimbel-Form besitzen [44]. Die zusätzlichen Konstrukte komplizieren jedoch den Aufbau und dämpfen zusätzlich die Kraft. Aus diesen Gründen wird die Kraftwandlung mit Hilfe eines Scharniers realisiert. Das Scharnier wird in den Wickel eingesetzt. Die vertikale Kraft verteilt sich auf die beiden Scharnierschenkel und führt somit zum Aufklappen des Scharniers. Dadurch werden die Folienlagen gedehnt und der Wickelumfang vergrößert sich. Abbildung 39 veranschaulicht dieses Prinzip.

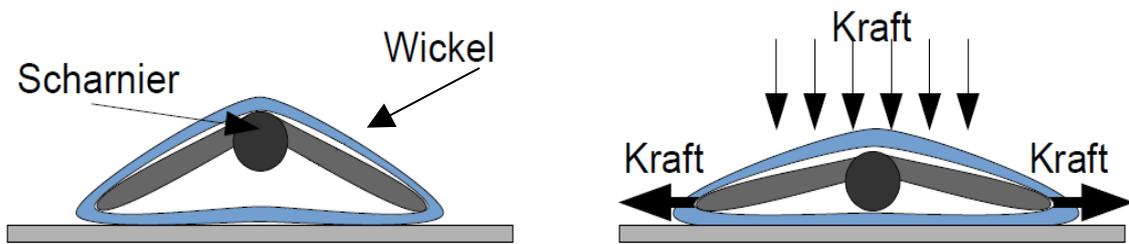


Abbildung 39: Wandlung der vertikalen Kraft zur Nutzung des Quereffekts mit Hilfe eines eingelegeten Scharniers [84]

Abhängig vom Umfang des Wickels und der Dimension des Scharniers kann die maximal zulässige Dehnung festgelegt und kontrolliert werden. Diese wird erreicht, wenn das Scharnier vollständig aufklappt und dessen Gelenk auf dem Boden liegt. Ab diesem Zeitpunkt wird die vertikale Kraft durch das Gelenk in den Boden geleitet und eine weitere Dehnung verhindert. Die maximal zulässige Dehnung darf den elastischen Bereich des Materials nicht überschreiten, um eine Rückkehr des Wickels in seine Ursprungslage zu garantieren. Die Dehnung bezieht sich auf den ursprünglichen Umfang, der durch den Wickeldorndurchmesser vorgegeben wird.

4.2. Scharnierdesign und –dimensionierung

Die ursprünglich verwendeten Scharniere aus den vorausgegangenen Arbeiten waren handelsübliche Scharniere aus 1,2 mm starkem Stahlblech. Die Schenkelenen wurden gefalzt, um ein besseres Gleiten der Folien zu ermöglichen. Da die Reibung zwischen Scharnier und Folien weiterhin groß war, wurden im Rahmen dieser Arbeit Scharniere aus Kunststoff hergestellt. Diese lassen sich als Spritzgussteile einfacher mit den gewünschten Eigenschaften und Dimensionen herstellen und bieten durch die glattere Oberfläche ein besseres Gleitverhalten. Aufgrund der ausreichenden Härte, der Eignung für das Spritzgussverfahren und des günstigen Preises, wurden die Scharniere aus Polyoxymethylen (POM) hergestellt. Neben verlängerten Schenkellängen, weisen diese Scharniere folgende Veränderungen zu den Stahlblechmodellen auf. Sie besitzen abgerundete statt gefalzte Schenkelenen für ein besseres Gleitverhalten und haben ein exzentrisches Gelenk, um deren Einklemmen zu verhindern. Durch die exzentrische Ausführung des Gelenks ist der Winkel zwischen dem Scharniergelenk und dem Boden größer. Dadurch besitzt die Rückstellkraft eine größere vertikale Komponente, die ein Zurückführen des Scharniers in seine ursprüngliche Position erleichtert und ein Verklemmen des Scharniers in der Endposition verhindert. Weitere Veränderungen gegenüber dem ursprünglichen Design des Scharniers wurden im Gelenkbereich vorgenommen. Um beim Spritzgießen Materialschwund zu

vermeiden wurde die Masseanhäufung des Materials in diesem Bereich vermieden, indem die Gelenkaufnahme der einzelnen Scharnierschenkel in mehreren kleineren Abschnitten unterteilt wurde. Im Verlauf der Untersuchungen ergab sich die Notwendigkeit einer weiteren Veränderung. Um eine Verbiegung der Scharnierschenkel mit fortschreitender Anzahl an Druckbelastungen zu vermeiden, wurden die Schenkel zum Gelenk hin linear verstärkt. In Abbildung 40 ist neben dem ursprünglichen Design, a), auch das verbesserte Scharnierdesign, b), zu sehen.

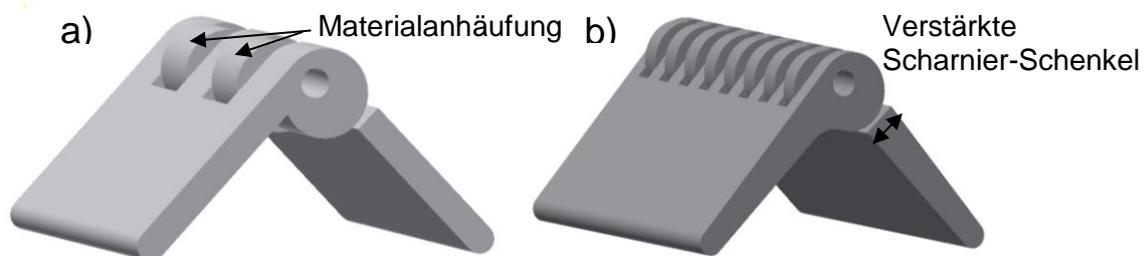


Abbildung 40: Scharniere aus POM für die Kraftübertragung. a) Ursprüngliches Design und b) verstärktes Design mit besserer Kompatibilität zum Spritzgussverfahren

Die Dimensionen des Scharniers hängen vom Umfang des ungedehnten Wickels und von der gewünschten Maximaldehnung ab. Sie wurden so gewählt, dass eine maximale Dehnung von 2 % nicht überschritten wird. Dadurch soll garantiert werden, dass die Dehnung innerhalb des elastischen Bereichs liegt, der vom Hersteller mit 6 bis 7 % angegeben ist [85]. Das Design und die Dimensionierung des Scharniers wurden mit Hilfe von *Autodesk® Inventor®* ermittelt. Die Zeichnung für das Design des Scharnierschenkels ist in Abbildung 41 zu sehen.

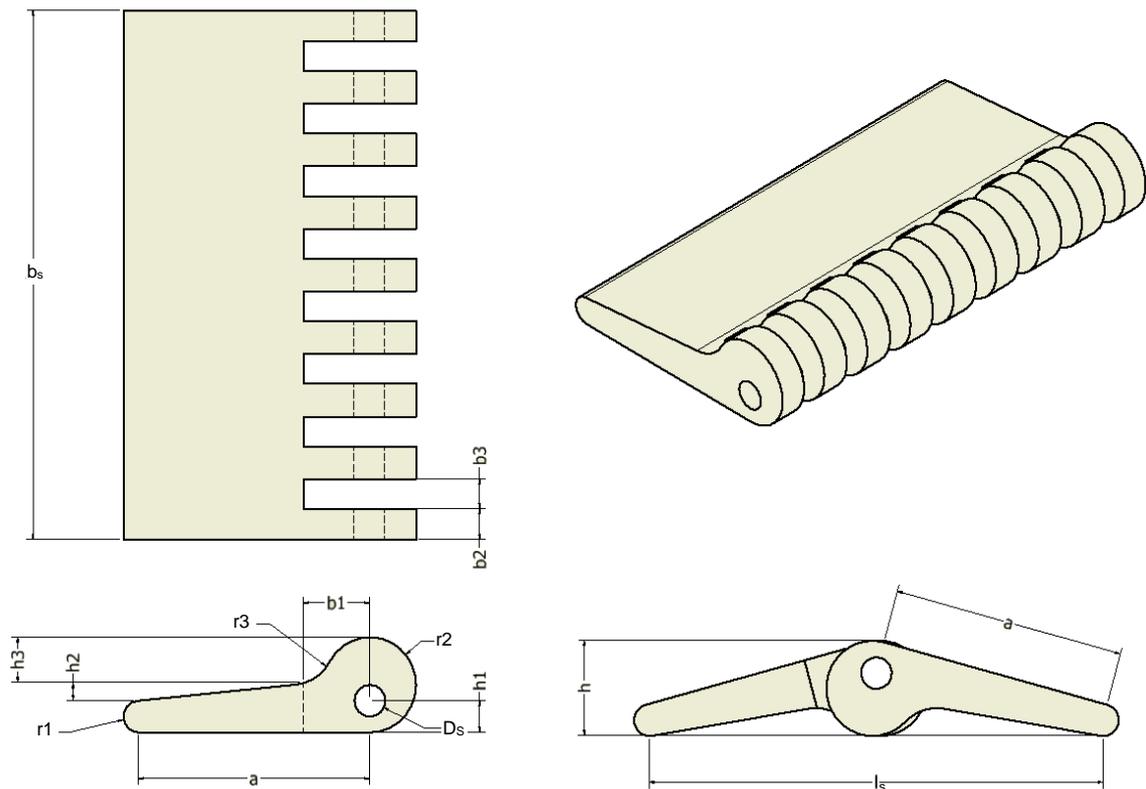


Abbildung 41: Designzeichnung des Scharniers und Darstellung des Aufklappens

Der maximale Umfang, u_{max} , tritt im Fall des vollständig aufgeklappten Scharniers auf. Dieser ist in Abbildung 41 unten rechts zu sehen. Er berechnet sich vereinfacht mit Hilfe der Formel (12). Hier ist πr_1 der Umfang des abgerundeten Abschnitts an den Schenkelenenden. Die Schenkellänge ist mit a bezeichnet. Weiterhin ist l_s der Abstand zwischen den Stützpunkten der beiden Schenkelenenden und ist mit Hilfe des Design-Programms ermittelt worden.

$$u_{max} = 2(a + \pi r_1) + l_s \quad (12)$$

Die Definition der einzelnen Größen aus Abbildung 41 sowie deren tatsächliche Werte sind in Tabelle 4 aufgelistet. Mit Hilfe dieser Werte und der Formel (12) beträgt der maximale Umfang bei einem voll ausgeklapptem Scharnier 98,64 mm. Die Dehnung bezieht sich auf den ungedehnten Umfang, der durch den Durchmesser des Wickeldorns bestimmt wird. Bei dem verwendeten Wickeldorn mit 31 mm Durchmesser, beträgt der minimale Umfang 97,39 mm. Dadurch ergibt sich eine maximale elastische Dehnung von 1,3 %.

Tabelle 4: Dimensionen des Scharniers

Größe	Symbol	Wert
Schenkellänge	a	22,5 mm
Radius der Schenkelabrundung	r1	1,5 mm
Radius der Gelenkaufnahme	r2	4,5 mm
Übergangsradius	r3	4,2 mm
Durchmesser der Stifaufnahme	D _s	3 mm
Höhe der Stifaufnahme	h1	3 mm
Höhenunterschied zwischen Schenkellänge und Übergang	h2	1,5 mm
Höhenunterschied zwischen Übergang und Gelenkaufnahme	h3	4,5 mm
Höhe des Scharniers im aufgeklappten Zustand	h	9 mm
Abstand zwischen Übergang und Gelenkmittelpunkt	b1	7,7 mm
Breite der Gelenkaufnahmeabschnitte	b2	2,95 mm
Aussparung zwischen den Gelenkaufnahmeabschnitten	b3	3,05 mm
Scharnierbreite	b _s	50 mm
Abstand zwischen Schenkelenden im aufgeklappten Zustand	l _s	44,21 mm

4.3. Wickelherstellung

Der Wickel wurde aus der gleichen Folie hergestellt, die in Kapitel 3 verwendet wurde und hat eine Stärke von 30 µm. Die Breite wurde auf 50 mm zugeschnitten. Das Wickelkonzept ist ebenso gleich und nutzt zwei PVDF-Lagen mit zwei Elektrodenlagen wie in Abbildung 13 (rechts). Bei den früheren Untersuchungen wurden die Wickel prototypisch und manuell mit Hilfe der Wickelvorrichtung aus Abbildung 15 gefertigt. Diese Wickel sind bei höheren Belastungen und großen Dehnungen an den Schweißnähten gerissen [84]. Da das Wickelprinzip auf die Wicklung von Folienkondensatoren basiert, wurden die Wickel im Rahmen dieser Arbeit bei einem Hersteller für Folienkondensatoren, *FTCAP*, hergestellt. Dadurch sind die Wickel sehr stabil und liefern reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse. Im Rahmen dieser Herstellung wurden die Elektrodenlagen mit Hilfe von 10 µm starken Polypropylenfolien realisiert, die beidseitig mit Aluminium bedampft waren. Im Vergleich zu den ursprünglichen Elektroden aus reiner Aluminiumfolie ist die beschichtete Polypropylenfolie elastischer und kann dadurch stärker gedehnt werden bevor es zu Ausfällen in Form einer Bruchdehnung kommt. Die Bruchdehnung reiner Aluminiumfolie mit einer Stärke im Bereich von 6 µm tritt ab 1 % ein und würde somit den Arbeitsbereich

einschränken [86]. Damit die beschichtete Polypropylenfolie effektiv als Elektrode zwischen zwei PVDF-Lagen eingesetzt werden konnte, muss das bedampfte Aluminium auf beiden Seiten auf ein Potential verbunden werden. Dafür wurden zwei Kupferfährchen eingesetzt, die jeweils zwischen der Aluminiumschicht und der benachbarten PVDF-Folie eingelegt wurden und miteinander verbunden wurden. Dadurch wurden die obere und untere Aluminiumschicht einer Elektrodenfolie kurzgeschlossen und die gesamte Ladung abgegriffen. Abbildung 42 verdeutlicht dieses Prinzip.

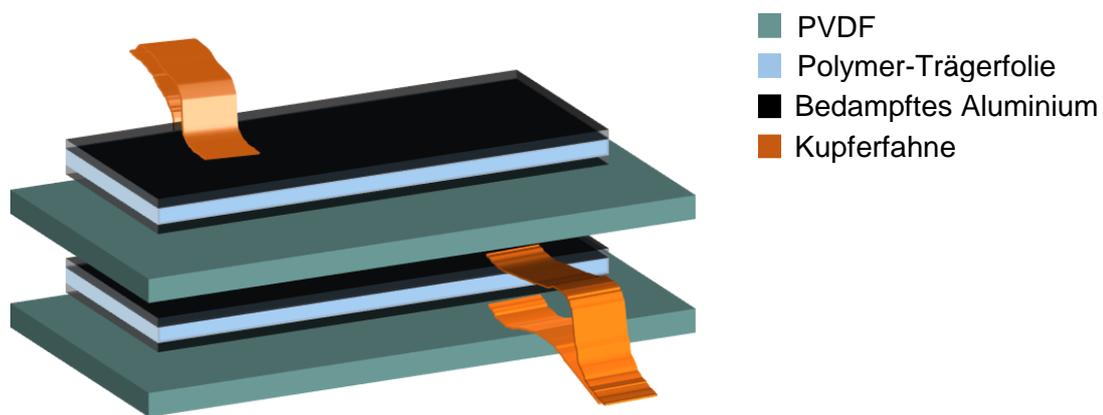


Abbildung 42: Prinzipskizze der beschichteten Kunststoffelektroden und die Maßnahme für deren Kontaktierung

4.4. Experimentelle Charakterisierung der Druckharvester

Die Eignung des Druckharvesters als Energiequelle für autarke Sensorsysteme wird anhand der elektrischen Ausgangsenergie charakterisiert. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, wird hier der piezoelektrische Quereffekt genutzt, womit die Gleichungen **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** bis **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** aus Abschnitt 3.3 anwendbar sind. Neben der maximal wandelbaren Energie ist auch deren Abhängigkeit von der Belastungskraft sowie von der Anzahl der Windungen von Interesse. Weiterhin ist das Langzeitverhalten des Systems wichtig, um einen wartungsfreien langfristigen Einsatz einschätzen zu können.

4.4.1. Versuchsaufbau und Messmethode

Zum Testen der Druckharvester müssen applikationsähnliche Bedingungen herrschen, die sich in Form von vertikal einwirkenden Kräften auf Wickel und Scharnier widerspiegeln. Realisiert wird diese Umgebung mit Hilfe einer pneumatischen Presse, die mit Hilfe von vier Stempeln die gewünschte Kraft auf die einzelnen Wandler übertragen kann. Mit Hilfe des

Luftdrucks lässt sich diese Kraft steuern, dabei entspricht 1 bar eine Druckkraft von 80 N. Die Ansteuerfrequenz dieser Kraft lässt sich entweder anhand interner Steuerkreise oder extern über den Rechner regeln. Die Messgröße zum Charakterisieren der Energie ist die Spannung. Diese wird über einen Lastwiderstand von 5 M Ω erfasst und daraus die resultierende Leistung berechnet. Anhand der Dauer des elektrischen Pulses kann die Energie pro Puls ermittelt werden. Für die Erfassung der Spannung wird von *National Instruments*™ sowohl die Software *LabVIEW*™ als auch die *USB-6000* Messbox verwendet, um die Signale aufzuzeichnen und zu verarbeiten. Da mit hohen Spannungen zu rechnen ist und die Messbox einen maximalen Pegel von 10V erfassen kann, ist ein Spannungsteiler notwendig, um den vollständigen Puls zu erfassen. Bei Eingabe des korrekten Gesamtwiderstands und des Teilverhältnisses berechnet das Programm automatisch die momentane Leistung zu jedem Messpunkt. Aufgrund der Messung über hohe Lastwiderstände wird zusätzlich ein Operationsverstärker (engl. operational amplifier bzw. OP-AMP) als Spannungsfollower genutzt. Dieser hat eine Eingangsimpedanz im Terraohm-Bereich, sodass bei der Messung kein Strom durch den Spannungsfollower fließt, der die Ergebnisse verfälschen könnte. Dieser Messplatz wurde bereits in vergangenen Arbeiten aufgebaut und genutzt und ist in Abbildung 43 zu sehen [84].

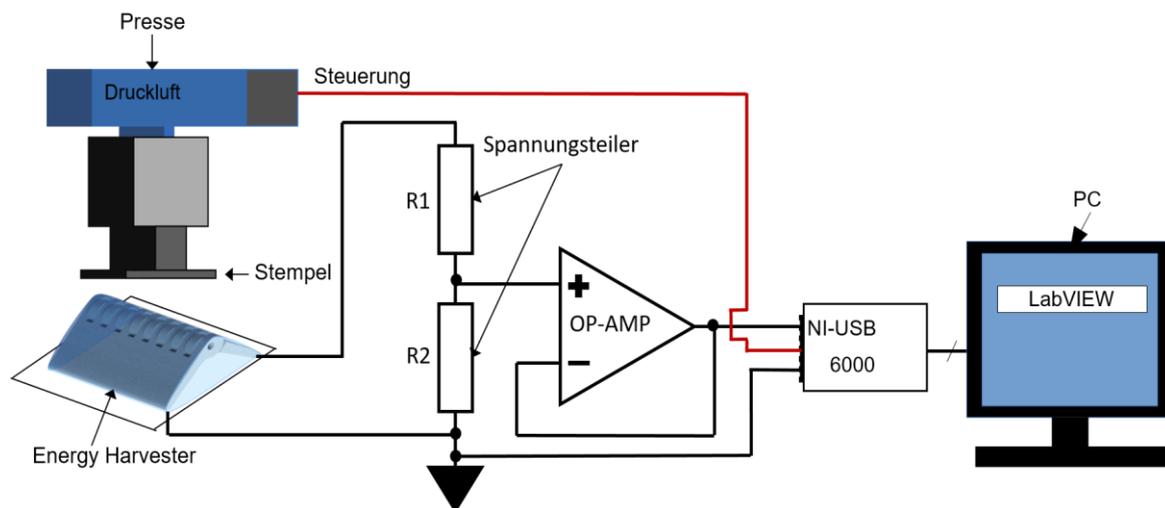


Abbildung 43: Messplatzaufbau zum Untersuchen der Druckharvester [84]

4.4.2. Untersuchung der Ausgangsenergie

Einer der wichtigsten Einflussfaktoren auf die elektrische Ausgangsenergie des Systems ist die belastende Kraft, die das Scharnier nach unten drückt. Diese bestimmt die Höhenänderung des Scharniers und dadurch die Dehnung der umhüllenden PVDF-Lagen. Um

die Auswirkung dieser Kraft zu untersuchen, wurde die Spannung über eine ohmsche Last von $5\text{ M}\Omega$ gemessen, während die Eingangskraft verändert wurde. Die Kräfte wurden zwischen 80 N und 640 N in 80 N Schritten untersucht. Diese Versuche wurden für verschiedene Wickel mit unterschiedlichen Windungszahlen durchgeführt. Jeweils vier Wickel mit gleicher Windungszahl wurden gleichzeitig getestet. Die untersuchten Windungszahlen sind zwei, drei, vier, fünf und sechs Windungen. Ziel war es, die Abhängigkeit der Energie von der Anzahl der Windungen beziehungsweise vom Volumen festzustellen [87].

4.4.3. Charakterisierung von Alterungserscheinungen

Ein Energy Harvester macht nur dann Sinn, wenn er wartungsfrei über die gesamte Lebensdauer des zu versorgenden Systems eingesetzt werden kann. Die Lebensdauer solcher Systeme kann dabei von mehreren Jahren bis zu Jahrzehnten reichen. Aus diesem Grund dürfen mögliche Alterungseffekte die Funktion des Harvesters nicht beeinträchtigen. Um das festzustellen, wurde eine beschleunigte Alterung der Module durch hochfrequente Schaltzyklen hervorgerufen und der Output über die Anzahl der Zyklen bewertet. Neben dem Rückgang des Outputs aufgrund von Materialermüdung oder dem Nachlass der Scharnierfunktionalität, waren vor allem Änderungen in den piezoelektrischen Eigenschaften der Folie von großem Interesse. Um gezielt die Ursachen dieser Reduktion festzustellen, wurden stets neue Scharniere eingelegt und die Spannungswerte verglichen. Dadurch wurde der Einfluss der Scharniere eliminiert, um mögliche Alterungseffekte der Folienwickel herauszufinden. Um Alterungserscheinungen beschleunigt hervorzurufen, müssen die Belastungen, die über die gesamte Lebensdauer der Wandler zu erwarten sind, in einer verkürzten Zeit durchlaufen werden. Für eine Applikation, bei der die Wandler durchschnittlich zehn Belastungen pro Stunde erfahren würden, ergibt das 876.000 Belastungen über eine Lebensdauer von 10 Jahren. Deswegen wurden die Wandler bis zu einem Bereich von einer Million Belastungen auf Alterungseffekte untersucht. Um diese hohe Zyklenzahl schnell zu erreichen, wurde mit einer erhöhten Belastungsfrequenz von ca. 2 Hz getestet, also zwei Belastungen pro Sekunde. Die Steuerung der Presse erfolgte ebenfalls mit dem Programm *LabVIEW™*, welches auch in bestimmten Zyklenabständen automatisch die Spannung erfasst hat. Grund dafür ist, dass eine Reduzierung des Spannungspegels auf mögliche Alterungserscheinungen hindeuten kann. Für die Untersuchung wurden Wickel mit fünf Windungen eingesetzt.

4.5. Resultate und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung präsentiert. Die Auswertung dieser Resultate liefert einen Einblick in die Eignung dieses Konzepts als Energy Harvester.

4.5.1. Auswertung des Energieoutputs

Um den Energieoutput zu bestimmen, wurde die Spannung diskret mit einer Abtastfrequenz von 500 Hz über definierte Lastwiderstände gemessen. Das Ansteuern der Kraft erfolgte mit einer Frequenz kleiner als 0,1 Hz, um zu garantieren, dass die Pulse komplett abklingen und somit die vollständige Energie erfasst wird. Abbildung 44 verdeutlicht das Abklingverhalten anhand des Spannungsverlaufs unterschiedlicher Wickel über einen Lastwiderstand von insgesamt 5 M Ω . Da die Wickel unterschiedliche Windungszahlen besitzen und somit andere Kapazitäten aufweisen ändert sich auch die Zeitkonstante $\tau = RC$ und somit die Zeit bis der Puls abgeklungen ist. Der positive Puls in Abbildung 44 steht für die Belastung der Module und der negative für die Entlastung.

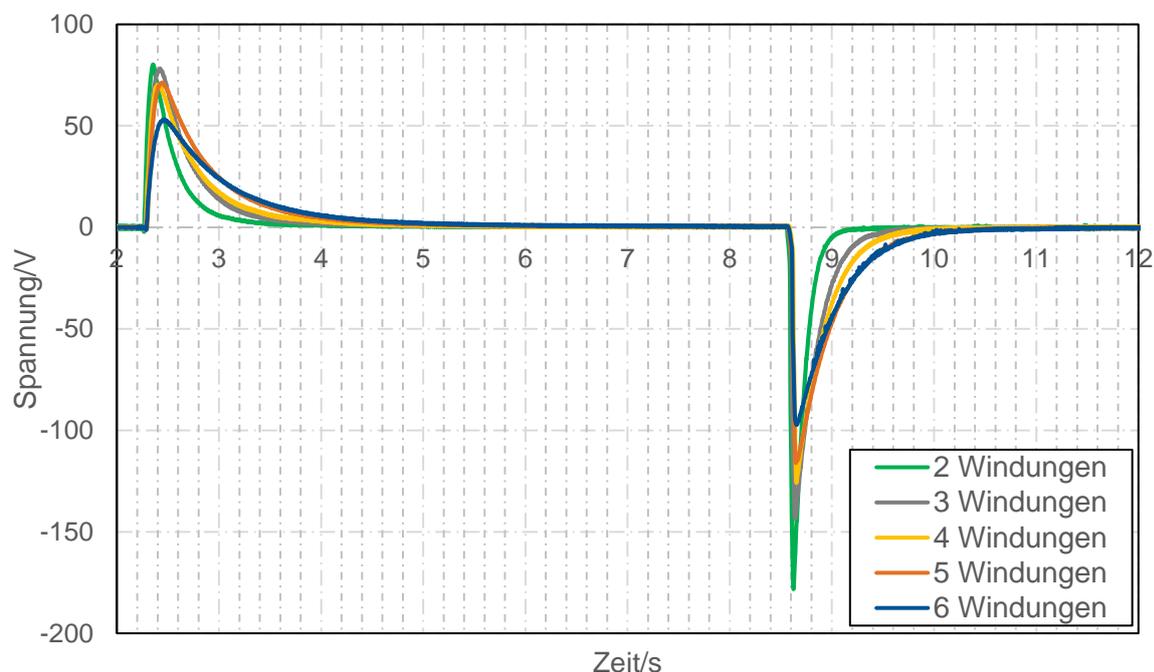


Abbildung 44: Spannungsverlauf der Wickel mit unterschiedlichen Windungszahlen über einen Gesamtwiderstand von 5 M Ω

Um die Energie pro Puls zu berechnen werden die einzelnen Werte für die Momentanleistung genutzt, die das Programm mit Hilfe von Formel (13) generiert. Dabei ist P_i die Momentanleistung am Messpunkt i und U_i die korrespondierende Spannung. Diese lässt sich mit Hilfe der gemessenen Spannung U_{M_i} und dem Teilverhältnis aus den beiden Widerständen R_1 und R_2 berechnen. Die Berechnung der Energie erfolgt nach Formel (14) indem das Produkt aus den einzelnen Momentanteilungen mit der Dauer der einzelnen Messpunkte Δt für alle n Messpunkte eines Pulses aufsummiert wird. Die Dauer zwischen zwei Messpunkten ist die Umkehrfunktion der Abtastfrequenz und beträgt in diesem Fall 0,002 Sekunden.

$$P_i = \frac{U_i^2}{R_{ges}} = \frac{(U_{M_i} \frac{R_1 + R_2}{R_2})^2}{R_1 + R_2} \quad (13)$$

$$E = \sum_1^n P_i \Delta t \quad (14)$$

Um die Abhängigkeit der Ausgangsenergie von der belastenden Kraft zu bestimmen, wurden vier Wickel mit der selben Windungszahl gleichzeitig getestet und die Energie des einzelnen Wickels berechnet. Aus den Ergebnissen wurde für jede Kraftstufe der Mittelwert für die Energie pro Belastung und Entlastung berechnet. Diese Ergebnisse sind in Abbildung 45 zu sehen. Wie zu erwarten, steigt die Energie pro Puls mit zunehmender Belastungskraft. Das lässt sich dadurch begründen, dass eine höhere Belastung zu einer größeren Dehnung führt, jedoch nur solange das Scharnier nicht durchgedrückt wird und auf die Unterlage aufliegt. Tritt nämlich letzterer Fall auf, ist die maximale Dehnung erreicht und die Energieaufnahme gesättigt. Die überschüssige Kraft wird dann über das Scharniergelenk in die Unterlage weitergeleitet. In Abbildung 45 (oben) sind die Mittelwerte der erzeugten Energien während der Belastung und die dazugehörigen Standardabweichungen in Form von Fehlerbalken zu sehen. Die höchste Energie pro Belastungspuls wird von Wickel mit drei Windungen gewandelt und beträgt pro Wickel ca. 1,5 mWs. Während der Entspannung der Wickel nach einer Belastung mit der gleichen Kraft liefern Wickel mit vier und sechs Windungen die höchsten Energiewerte von jeweils ca. 2,5 mWs. Die dazugehörigen Kurven sind in der gleichen Abbildung unten zu sehen. Der Grund für den höheren Output während dem Entlastungsvorgang im Vergleich zur Belastung kann mit Hilfe von Formel (6) erklärt werden. Im Gegensatz zur Dehnung entspannen sich die Lagen während dem Entlastungsvorgang

4 Piezoelektrische Harvester zur Aufnahme von Druckimpulsen

schlagartig sobald der Luftdruck abgeschaltet wird. Diese schnelle Änderung der mechanischen Spannung im Material, $\frac{d\sigma}{dt}$, und damit auch die der elektrischen Ladung, $\frac{dQ}{dt}$, resultiert in einem höheren Strom, der für höhere Energiewerte beim Entlasten im Vergleich zum Belasten sorgt.

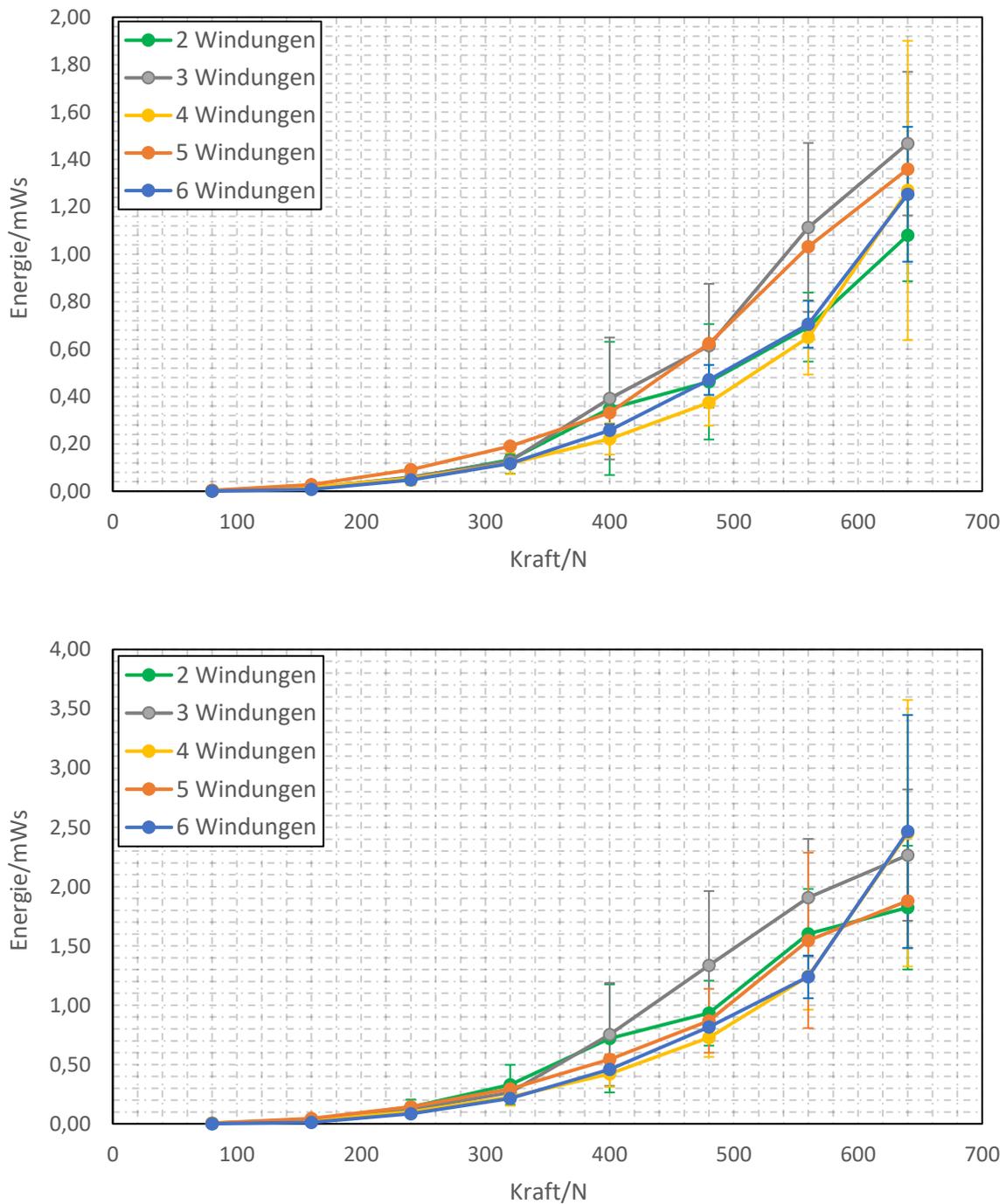


Abbildung 45: Energie pro Puls in Abhängigkeit von der Belastungskraft für Wickel mit unterschiedlichen Windungszahlen während der Belastung (oben) und der Entlastung (unten)

Entgegen der Erwartungen ist in Abbildung 45 im getesteten Kraftbereich keine klare Sättigung der Energiewandlung zu erkennen. Bei Wickel mit großen Windungszahlen, liegt es daran, dass diese noch nicht vollständig durchgedrückt werden und somit im verfügbaren Kraftbereich ihre maximale Dehnung noch nicht erreichen. Der Verlauf dieser Kurven ist also parabelförmig aufgrund des quadratischen Einflusses der Dehnung. Im Fall von Wickeln mit kleineren Windungszahlen, zum Beispiel zwei und drei, kann die stetige Steigung dadurch erklärt werden, dass die vier Wickel einer Wickelsorte nicht alle bei der gleichen Kraftstufe durchgedrückt wurden. Während also der erste Wickel schon seine maximale Dehnung erreicht hat und bei höheren Kraftstufen keinen weiteren Energiezuschuss liefert, haben die restlichen Wickel der gleichen Sorte erst später diese Dehnung erreicht und bis dahin einen Zuschuss an Energie geliefert. Somit steigt der Mittelwertverlauf weiterhin und zeigt keine Sättigung. Dass die einzelnen Wickel einer Sorte bei unterschiedlichen Kraftstufen ihre maximale Dehnung erreichen ist anhand der Fehlerindikatoren zu erkennen. Bei kleinen Kräften, sind diese kaum zu erkennen und deuten auf eine ähnliche Dehnung der einzelnen Wickel. Bei größeren Kräften steigt die Abweichung, da die Wahrscheinlichkeit größer ist, dass ein Wickel bereits durchgedrückt wird. Steigt die Kraft ausreichend an, sodass alle Wickel durchgedrückt werden, müsste die Abweichung wieder sinken, da die erzeugte Energie der einzelnen Wickel wieder ähnlich wäre. Um dies zu verdeutlichen, ist in Abbildung 46 der Verlauf der Standardabweichung dargestellt. Am Beispiel der Wickel mit zwei Windungen (grün) wird ersichtlich, dass das Maximum der Standardabweichung bei 400 N liegt, wo der erste Wickel durchgedrückt wird. Danach nimmt die Abweichung ab, da dieser keine zuschüssige Energie liefert, aber die drei anderen Wickel weiter gedehnt werden. Dadurch nähern sich die Energiewerte an. Zwei der restlichen Wickel werden bei 560 N durchgedrückt und der letzte erst bei 640 N. Ein ähnlicher Verlauf ist bei Wickel mit drei Windungen (grau) zu sehen, wobei hier das Maximum der Abweichung verschoben ist, da diese Wickelsorte bei höheren Kräften durchgedrückt wird. Wickel mit vier und sechs Windungen zeigen eine stetige Steigung, da diese deutlich später durchgedrückt werden und innerhalb dieses Testbereichs nicht vollständig gedehnt werden. Theoretische Werte für die notwendige Kraft für die maximale Dehnung F_{\max} lassen sich in Abhängigkeit von dem Betrag der Dehnung ϵ_{\max} , dem Elastizitätsmodul E_{Modul} und dem effektiven Querschnitt A_{Qeff} nach Formel (15) berechnen. Der effektive Querschnitt setzt sich nach Formel (16) zusammen, dabei entspricht d_{ges} der Dicke der PVDF-Folie und der PP-Elektrodenfolie, b_F deren Breite und n_W die Anzahl der Windungen. Bedingt durch den Wickelprozess und unabhängig von der Anzahl der aktiven Windungen sind weitere drei passive Windungen außen zum Zusammenschweißen notwendig. Diese vergrößern den effektiven Querschnitt. Die

resultierenden Querschnittsflächen und die korrespondierende Kraft sind in Tabelle 5 aufgelistet. Die maximale Dehnung beträgt dabei nach Abschnitt 4.2 1,3 % und das gesamte E-Modul E_{ges} , kombiniert aus den jeweiligen E-Moduli der zwei Materialien, beträgt 2,5 GPa [85][88].

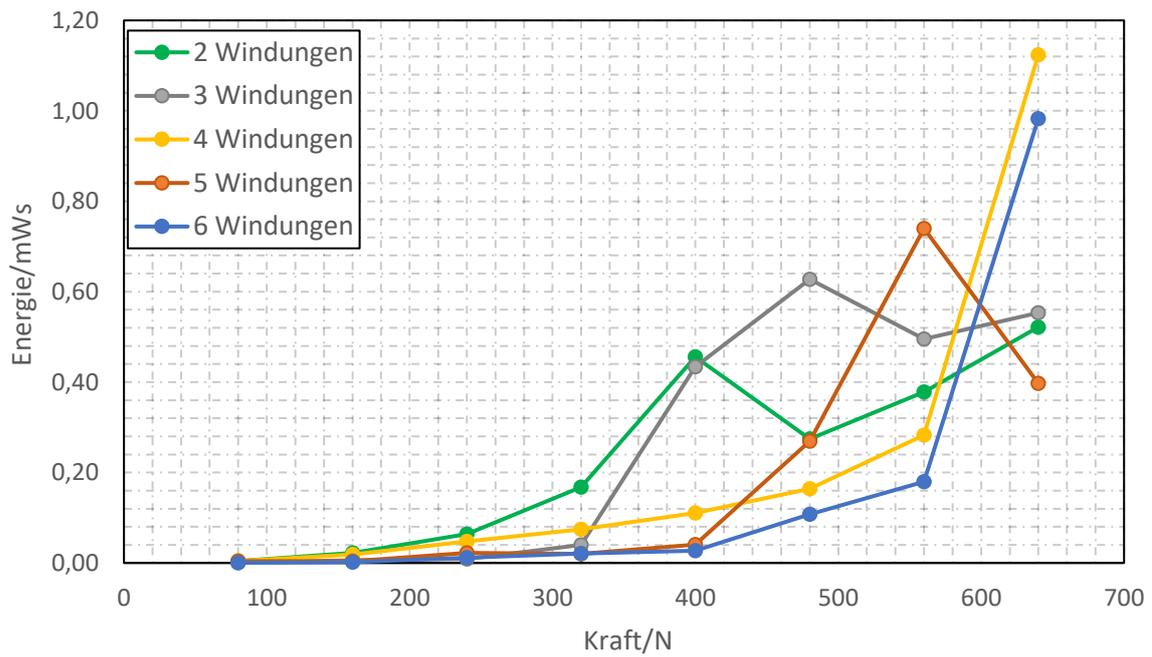
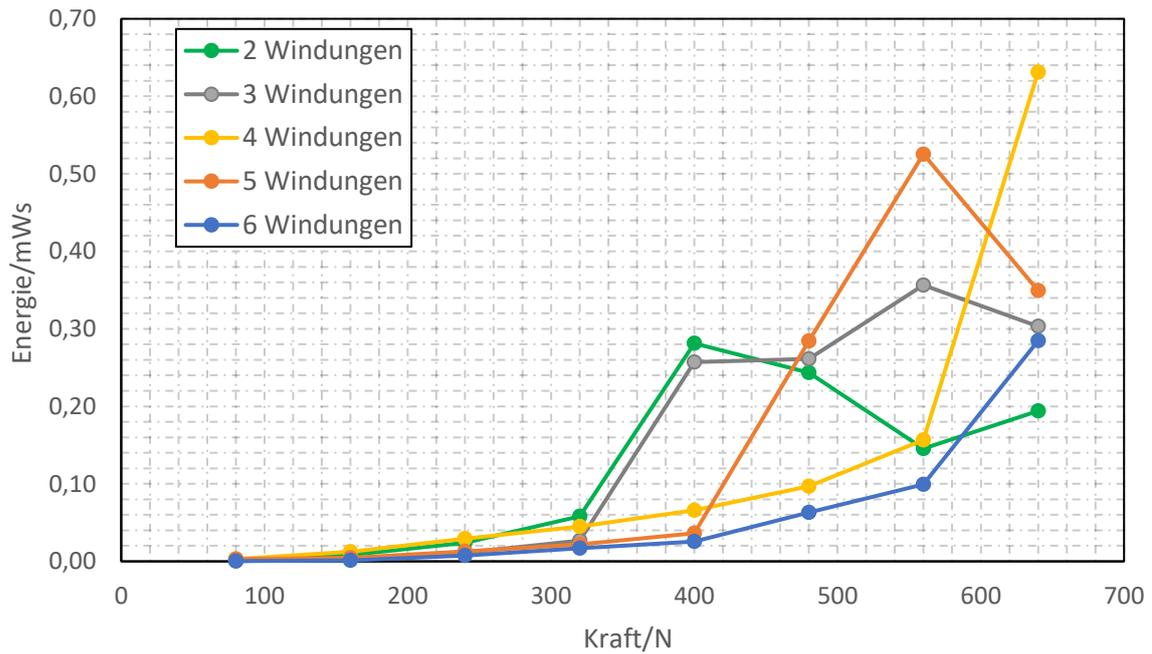


Abbildung 46: Verlauf der Standardabweichung in Abhängigkeit von der Belastungskraft für die verschiedenen Wickelserien während der Belastung (oben) und der Entlastung (unten)

$$F_{max} = A_{Qeff} E_{ges} \varepsilon_{max} \quad (15)$$

$$A_{Qeff} = 2b_F(n_W * d_{ges} + 3 * d_{PVDF}) \quad (16)$$

Tabelle 5: Windungszahlabhängige Querschnittsflächen und die korrespondierende Kraft für maximale Dehnung

Windungszahl n	Querschnittsfläche A_{Qeff}	Kraft für maximale Dehnung
2	0,17 cm ²	641 N
3	0,21 cm ²	792 N
4	0,25 cm ²	943 N
5	0,29 cm ²	1093 N
6	0,33 cm ²	1244 N

Die Werte für die Kraft in Tabelle 5 übersteigen den verfügbaren Kraftbereich des Testaufbaus, der bis zu 640 N reicht. Dadurch kann das vollständige Durchdrücken der Scharniere nicht garantiert werden. Das begründet, warum keine Sättigung des Energieverlaufs zu erkennen ist.

Warum sich einige Wickel bereits ab 400 N durchdrücken lassen, kann an einer Abweichung des tatsächlichen E-Moduls von der Datenblattangabe liegen. Fertigungstoleranzen könnten zusätzlich Ursache sein, warum einige Wickel bereits bei kleineren Kräften durchgedrückt werden. Ist beispielsweise ein Wickel weniger straff gewickelt als der andere, so ist dessen effektiver ungedehnter Umfang größer und somit die maximale Dehnung kleiner. Diese tritt dann bei einer geringeren Kraft ein.

4.5.2. Abhängigkeit des Outputs von der Zyklenzahl

Um Alterungserscheinungen hervorzurufen und dadurch die Eignung der Wickel für den langfristigen Einsatz zu untersuchen, wurden die Wickel mit beschleunigter Frequenz belastet und die Spannung aufgezeichnet. Ein Abfall der Spannung bei steigenden Zyklenzahlen deutet dabei auf eine Alterung hin. In einem ersten Versuchsdurchgang wurden Scharniere mit einer geringeren Stärke von nur 2 mm eingesetzt. Bereits nach 500 Belastungszyklen war die Effektivspannung auf die Hälfte ihres Anfangswerts gesunken. Eine Untersuchung der Testmuster im Nachhinein deutete auf das Scharnier als Ursache dieses schnellen Rückgangs der Wandlungseffizienz. Das abgenutzte Scharnier war deutlich verbogen, wodurch dessen maximaler Umfang reduziert und folglich die Folien weniger

gedehnt wurden. Abbildung 47 zeigt die starke Verformung, die den Grund hinter den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Scharnierdesignänderungen bildet.

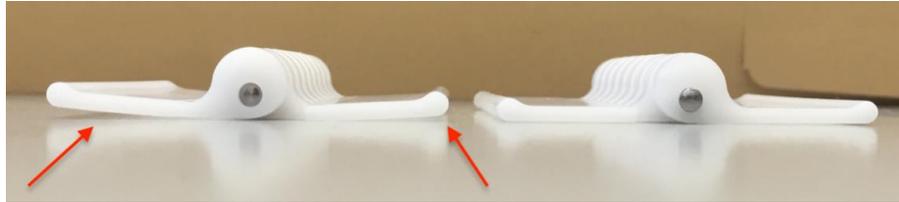


Abbildung 47: Deutliche Verformung eines Scharniers bei Dauerbelastung (links) im Vergleich zu einem unbenutzten (rechts)

Mit Hilfe der verstärkten Scharniere aus Abbildung 41 wurde der Test erneut durchgeführt. Diesmal fiel die Effektivspannung erst nach 10^5 Zyklen auf die Hälfte ihres ursprünglichen Werts ab. Um zu überprüfen, dass die verstärkten Scharniere bei einer Dauerbelastung tatsächlich nicht mehr nachgeben wurde eine weitere Testreihe durchgeführt, die sich auf $30 \cdot 10^3$ Zyklen beschränkte. Anders als bei der vorherigen Reihe wurde hier im Abstand von $10 \cdot 10^3$ Zyklen die abgenutzten Scharniere durch unbenutzte ersetzt. In Abbildung 48 ist der Verlauf des Mittelwerts zu sehen der aus den Effektivspannungen der vier parallel untersuchten Wickel gebildet ist. Die unterschiedlich gefärbten Segmente stehen für die unterschiedlichen Scharnierserien. Zu erkennen ist ein starker Anstieg der Spannung nach jedem Einsatz einer neuen Scharnierserie. Auf dem ersten Blick könnte das bedeuten, dass die Scharniere trotz Verstärkung immernoch nachgeben. Das erklärt jedoch nicht, warum die zweite Scharnierserie eine Effektivspannung von 40 V erreicht, die höher als der Anfangswert von 34 V ist. Der Grund für diesen sprunghaften Anstieg der Spannung nach dem Einlegen neuer Scharniere könnte zusätzlich darin liegen, dass das Einführen der Scharniere in die Wickel eine Bewegung der Folien mit sich zieht. Dadurch ist der effektive Umfang der innersten Windungen solange kleiner bis sich die Lagen straff gezogen haben. Dieser kleinere Umfang resultiert in einer größeren Dehnung der innersten Windungen und somit zu einer höheren Spannung. Da in der Praxis die Scharniere nie ausgetauscht werden sollen, muss dieser Effekt bei den Untersuchungen herausgerechnet und ignoriert werden. Realisiert wurde das indem die ersten 2000 Zyklen nach der Einlage eines Scharniers bei den Berechnungen ignoriert worden sind. Für den resultierenden Graph wurde dann eine logarithmische Trendlinie erzeugt, die extrapoliert auf die Lebensdauer hinweist. Diese Trendlinie ist in Abbildung 49 zu sehen.

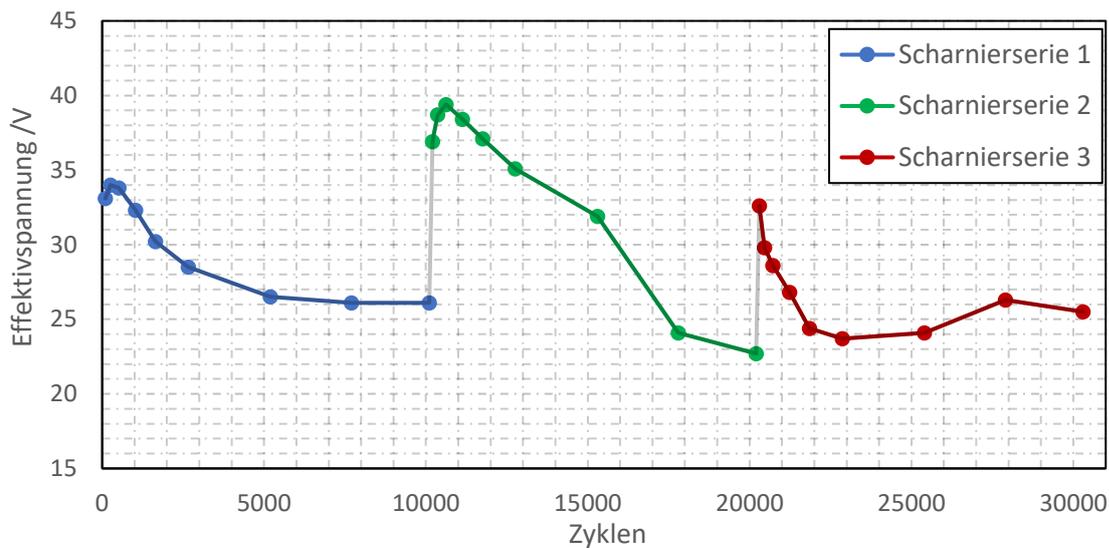


Abbildung 48: Verlauf der Effektivspannung im Dauerbetrieb mit 2 Hz

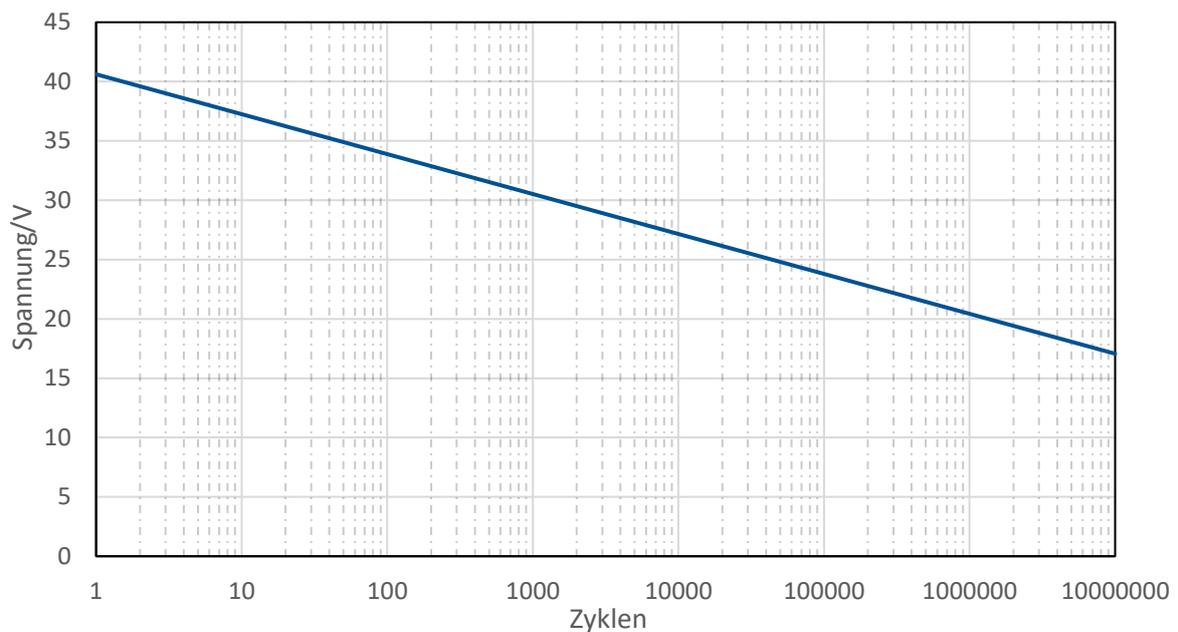


Abbildung 49: Extrapolierte logarithmische Trendlinie aus dem gefiltertem Spannungsverlauf

Entsprechend der Trendlinie würde die Spannung erst nach mehreren Millionen Zyklen auf die Hälfte abfallen. In der Praxis fällt die Spannung jedoch bereits bei 10^5 Zyklen auf die Hälfte ihres ursprünglichen Werts. Das kann mit Effekten der Kontaktierung der Elektroden verbunden sein, die in der Trendlinie nicht berücksichtigt sind. Die Kontaktierung erfolgte nach Abbildung 42. Dadurch, dass die Kupferblätter lose zwischen den Folien liegen, kommt es zu deren Bewegung und somit zum Abrieb der Metallisierung. Dadurch wird der Kontakt

mit steigenden Belastungszyklen beeinträchtigt, sodass die Ladung möglicherweise nicht vollständig abgegriffen werden kann.

4.6. Energiemanagement

Die elektrische Energie, die von Energy Harvestern bereitgestellt wird, kann selten direkt genutzt werden um einen Verbraucher zu versorgen. Besonders bei piezoelektrischen Wandlern ist die resultierende Spannung meist zu hoch und die Ströme sehr gering. Zudem liefern die Wandler ein Wechselsignal. Aus diesen Gründen ist eine Regulierung dieser Energie mit Hilfe von Schaltungen zwischen dem Wandler und dem Verbraucher unerlässlich. Typische Bausteine einer solchen Schaltung sind in Abbildung 50 zu sehen. Das gelieferte Wechselsignal wird zuerst gleichgerichtet und anschließend auf die benötigte Betriebsspannung des Verbrauchers reguliert und gespeichert. Abhängig von der verwendeten Technologie und den Eigenschaften des Harvesterausgangs variiert die Effizienz der Energiemanagement-Bausteine. Um eine hohe Effizienz zu erreichen, muss die Eingangsimpedanz der Energiemanagement-Schaltung mit der Ausgangsimpedanz der Quelle angeglichen werden [89]. In diesem Abschnitt werden mögliche Schaltungen in Bezug auf die Bodenharvester diskutiert und verglichen.

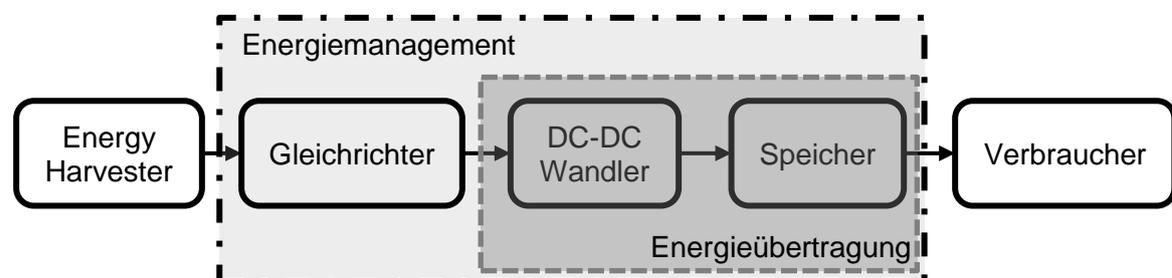


Abbildung 50: Bausteine einer Energiemanagement-Zwischenschaltung

4.6.1. Gleichrichter

Typische Methoden zum Gleichrichten einer Wechselspannung nutzen einen Vollbrückengleichrichter. Mit Hilfe von vier passiven Dioden wird die negative Halbwelle invertiert. Durch den Spannungsabfall über jeweils zwei Dioden in einem Pfad ist die Anwendung solcher Gleichrichter limitiert auf Quellen mit relativ hohen Spannungssignalen. Je geringer die Spannung, desto geringer die Effizienz des Gleichrichters. Fällt die Spannung unter die Summe zweier Schwellspannungen, so fließt kein Strom und die Effizienz sinkt auf Null [89]. Um dies zu verhindern, gibt es Alternativen die mit Hilfe aktiver Komponenten die

Gleichrichtung übernehmen. Gesteuerte MOSFETs schalten gezielt, um das Wechselsignal gleich zu richten [90]. Besonders bei geringen Eingangsspannungen ist die Effizienz der aktiven Gleichrichter mit 70 bis 80 % deutlich höher als typische Gleichrichter mit passiven Dioden. Diese haben bei Eingangsspannungen im Bereich von 1 V eine Effizienz von 10 % [90]. Das Problem solcher Ansätze ist die üblicherweise externe Steuerung der MOSFETs. Für Energy Harvesting Applikationen ist eine externe Versorgungsquelle nicht vorgesehen. Aus diesem Grund wurden selbstversorgende Ansätze für die aktive Gleichrichtung untersucht, die die MOSFETs und Steuerschaltungen über den Speicherkondensator versorgen [91]. Folglich erhöht sich die Komplexität der Schaltung. Nur im Fall eines Mehrwerts durch solche Schaltungen, der den Verbrauch und den Aufwand übersteigt, machen solche Ansätze Sinn.

Im Fall des diskutierten Bodenharvesters liegt die Ausgangsspannung der Wandler laut Abbildung 44 betragsmäßig zwischen 50 und 180 V. Die Schwellspannungen der passiven Dioden sind somit vernachlässigbar. Eine Komplikation der Schaltung durch alternative Gleichrichter bringt also keinen erheblichen Mehrwert und wird aus diesem Grund für diese Anwendung nicht in Betracht gezogen. Stattdessen wurde ein handelsüblicher IC-Gleichrichter des Typs B40D von der Firma Diotec Semiconductor eingesetzt.

4.6.2. Energieübertragung

Unter Energieübertragung ist die Extraktion der Energie aus dem Wandler in einen Speicher zu verstehen. Diese kann direkt passieren, in dem das Speicherelement direkt an dem Ausgang des Gleichrichters angeschlossen wird, oder mit Hilfe von Zwischenschaltungen, die die Effizienz dieser Übertragung erhöhen sollen. Wie in Abschnitt 3.3 besprochen, wird die maximale Leistung dann abgegeben, wenn die Eingangsimpedanz der Last an die Ausgangsimpedanz der Quelle angeglichen ist. Das stellt im Fall eines direkten Anschlusses des Speichers an die Quelle beziehungsweise den Gleichrichter ein Problem dar. Aufgrund des kapazitiven Aufbaus von piezoelektrischen Wandlern, liegt deren Ausgangsimpedanz im oberen Kiloohm- bis Megaohmbereich. Speicherelemente wie Kondensatoren haben nach Formel (17) abhängig von der Kapazität C und der Kreisfrequenz ω betragsmäßig sehr kleine Eingangsimpedanzen Z_C . Soll eine Impedanzanpassung erfolgen muss die Kapazität sehr klein gewählt werden. Dadurch wird die Energie die maximal auf dem Kondensator gespeichert werden kann limitiert und die Energieübertragung ist stark verlustbehaftet. Mit Hilfe von passiven induktiven Lasten wäre eine Impedanzanpassung theoretisch möglich, jedoch würden Induktivitäten in einer Größenordnung von mehreren Henrys oder sogar hunderte von Henrys benötigt werden [92]. Passive Induktivitäten würden jedoch nur bei einer

bestimmten Kreisfrequenz die Anpassung schaffen und haben weiterhin aufgrund der Baugröße einen großen Platzbedarf und sind somit nicht uneingeschränkt geeignet für Energy Harvesting Anwendungen.

$$\underline{|Z_C|} = \frac{1}{\omega C} \quad (17)$$

Um dieses Problem zu umgehen, können Schaltungen zwischen dem Speicher und der Quelle verwendet werden, die gegenüber dem Ausgang der Quelle eine passende Impedanz besitzen und dadurch die Effizienz der Übertragung erhöhen. Beispiele solcher Schaltungen sind Maximum Power Point Tracker (MPPT). Durch inkrementelle Veränderung des Lastwiderstands und Berechnung der resultierenden Leistung wird der Punkt maximaler Leistungsübertragung gesucht und eingestellt [93]. Alternativ wird die Leerlaufspannung der Quelle gemessen und der Lastwiderstand so eingestellt, dass die darüber abfallende Spannung die halbe Leerlaufspannung beträgt [94]. Diese Schaltungen sind geeignet für Quellen die eine betriebsabhängige Impedanz aufweisen, wie Solarzellen oder Vibrationsharvester. Zusätzlich zu den MPPT-Schaltungen können Vibrationsharvester von einer weiteren Möglichkeit für eine effiziente Energieübertragung profitieren, die Synchronized Switch Harvesting on Inductor (SSHI). Mit Hilfe eines Schalters und einer Induktivität wird der kapazitive Anteil der Quellenimpedanz kompensiert. Die Induktivität wird aufgeladen und durch den Schalter von der Quelle abgetrennt. Der Schwingkreis aus Induktivität und Speicher sorgt dann für ein schnelles und effizientes Aufladen des Speichers [95]. Um die Notwendigkeit eines MPPT vor der SSHI-Schaltung zu eliminieren, wurde die Schaltung modifiziert, sodass die Induktivität während ihres Ladevorgangs vom Speicher und während des Aufladens des Speichers von der Quelle getrennt ist [96]. Diese Schaltung ist unter dem Namen Synchronous Electric Charge Extraction (SECE) bekannt. Wichtig bei allen Varianten ist die Kenntniss des Eingangssignals, um die Steuerzeiten der unterschiedlichen Schalter richtig einzustellen.

4.6.2.1. Peak Detector

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Schaltung eingesetzt, die von Liang und Liao mit dem Namen Peak Detector bezeichnet wurde [97]. Liang und Liao nutzten diese Schaltung als Teil einer SSHI-Schaltung, um ohne externe Versorgung oder Steuerung die Schaltzeiten zu ermitteln. Dadurch wird eine Fehlanpassung der Impedanz zwischen Quelle und Last

eliminiert. In diesem Abschnitt wird die in Abbildung 51 dargestellte Schaltung genauer erklärt und anschließend mit SSHI-Schaltungen und Vollbrückengleichrichter verglichen.

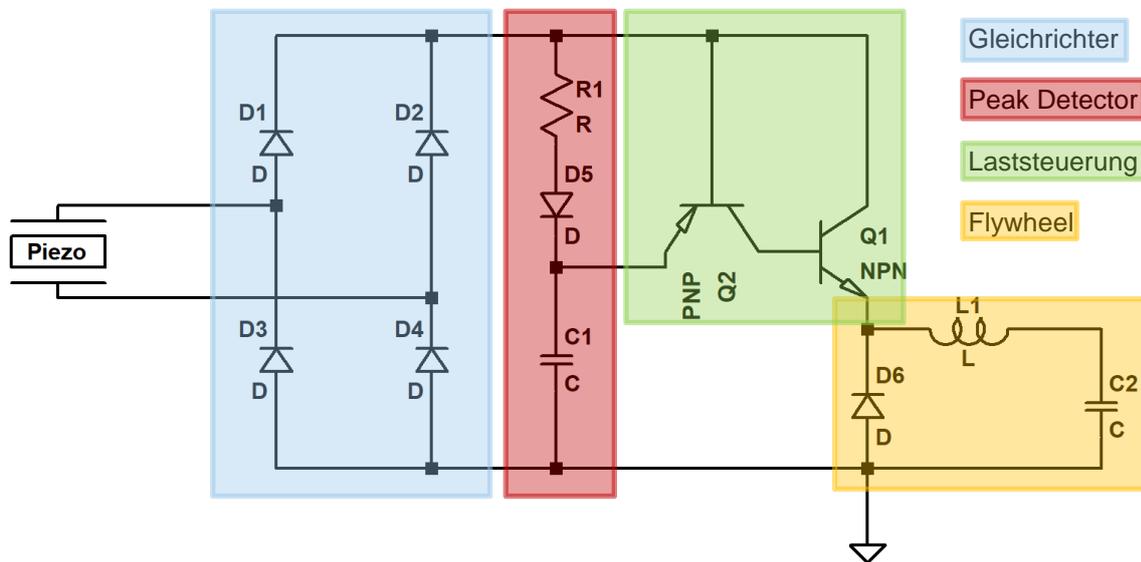


Abbildung 51: Modell der Energiemanagement-Schaltung mit Peak Detector

Wie in Abschnitt 4.6.1 erwähnt, wird für die Gleichrichtung des Harvesterausgangs ein üblicher Vollbrückengleichrichter eingesetzt. Erfährt das Piezomodul eine Belastung, so steigt die Spannung und der gleichgerichtete Strom führt über Widerstand $R1$ und Diode $D5$ in einen kleinen Kondensator $C1$. Abgesehen von dem Spannungsabfall über dem Widerstand und der Diode wird aufgrund der geringen Kapazität des Kondensators die Spannung vollständig abgebildet. Die Energie, die dabei in den Kondensator fließt, kann dabei aufgrund der geringen Kapazität vernachlässigt werden. Beginnt die Spannung am Eingang dieses Peak Detectors zu fallen, so blockiert die Diode $D5$ den Rückfluss der Ladung und das Potential des Kondensators $C1$ übersteigt das Potential am Eingang. Dadurch wird der PNP-Transistor $Q2$ geschaltet. In diesem Fall liegt das Potential des Kondensators $C1$ auch an der Basis des NPN-Transistors $Q1$, wodurch dieser ebenso geschaltet wird. Nun fließt die komplette Ladung vom Piezomodul über den NPN-Transistor $Q1$ in die Spule $L1$ und den Speicherkondensator $C2$. Diode $D6$ ist dabei in Sperrichtung und verhindert den Ladungsfluss zur Erde. Die Transistoren leiten den Strom so lange in die sogenannte „Flywheel“-Schaltung bis die Spannung am Kondensator $C1$ die notwendige Basisspannung unterschreitet. Ab diesem Moment bricht das Magnetfeld an der Spule $L1$ zusammen und die gespeicherte Energie fließt aus der Spule in den Kondensator $C2$ sodass dieser weiterhin geladen wird. Durch die Schwingung des LC-Glieds, verhält sich die Schaltung wie ein elektronisches Schwungrad und kann dadurch mehr Energie aus dem Impuls übertragen. Dadurch wird eine höhere Effizienz

erreicht. Der Spannungsverlauf der Simulationsschaltung ist vergrößert in Abbildung 52 zu sehen. Die rote Linie gibt den Verlauf am Ausgang des Gleichrichters an. Der Anstieg der Spannung liegt dabei im unteren Millisekundenbereich. Nachdem die rote Kurve ihr Maximum erreicht hat und der Spannungsrückgang begonnen hat, werden die Transistoren geschaltet, was in dem abrupten und steilen Zusammenbruch der Spannung zu erkennen ist. Gleichzeitig steigt zum selben Zeitpunkt die blaue Linie, die die Spannung am Speicherkondensator repräsentiert.

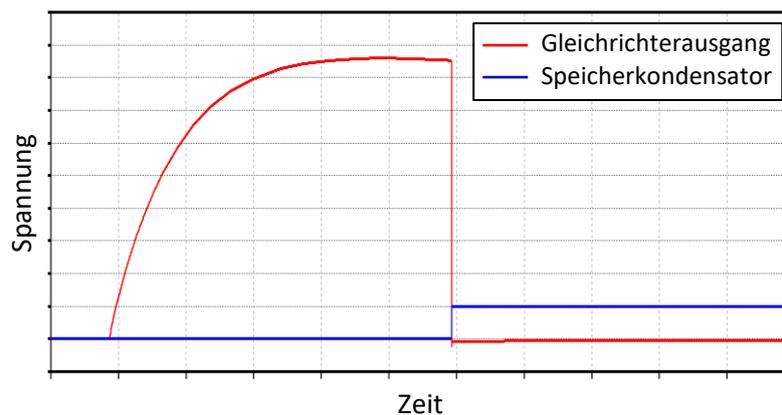


Abbildung 52: Simulierter Spannungsverlauf während dem Aufladen des Speicherkondensators nach einem Belastungsimpuls

Nachdem die Funktion der Schaltung durch Simulationen bewiesen wurde, wurden die Ergebnisse experimentell validiert. Bei dieser Untersuchung waren vier Folienwickel elektrisch und mechanisch parallel geschaltet und an die Energiemanagementschaltung angeschlossen. Der Speicherkondensator am Ausgang der Schaltung wurde variiert, um eine optimale Energieübertragung zu ermitteln. Um die Effizienz der Übertragung zu bestimmen, wurde die Energie als Referenz gesetzt, die in eine angepasste resistive Last umgesetzt wurde. Für die Berechnungen wurde die Energie über einen vollständigen Zyklus berechnet, Belastung und Entlastung.

Neben der Peak Detector Schaltung wurde die direkte Übertragung mit einem Vollbrücken-Gleichrichter untersucht. Zusätzlich wurden selbstversorgende Varianten der seriellen [98] und parallelen [97] SSHI-Schaltungen in diesem Vergleich geprüft. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind in Abbildung 53 zu sehen. Die gestrichelte rote Linie gibt den Referenzwert der Energie aus einem vollen Zyklus bei einer reinen resistiven Last von $8\text{ M}\Omega$ an und beträgt $1400\text{ }\mu\text{Ws}$. Da der Ausgang bei dieser Schaltung nicht gleichgerichtet ist, ist die direkte Nutzung dieser Energie nicht möglich. Von den restlichen Schaltungen, die einen gleichgerichteten Ausgang liefern, liefert der Peak Detector die besten Ergebnisse und

extrahiert 63 % des Referenzwerts. Neben der größeren extrahierten Energiemenge bietet diese Schaltung den Vorteil einer größeren Bandbreite in Bezug auf die Speicherkapazität. Die maximale Energieübertragung lässt sich mit unterschiedlichen Kapazitäten zwischen 1 μF und 4,7 μF erreichen. Anders als bei den restlichen Schaltungen, die genau bei einer Kapazität ihr Maximum aufweisen, toleriert die Peak Detector Schaltung eine gewisse Fehlanpassung der Last. Die direkte Aufladung der Kapazität mit Hilfe eines Gleichrichters ist durch die grüne Kurve repräsentiert und liefert nur einen Bruchteil der Referenzenergie. Prinzipiell deckt sich dieses Verhalten mit der Literatur [92] wobei der Faktor hier im Vergleich zu den idealisierten Berechnungen deutlich geringer ist. Interessanterweise schneiden die SSHI-Schaltungen verglichen mit den Ergebnissen aus der Literatur deutlich schlechter ab. Eine Wandlungseffizienz von maximal 51 % konnte mit der parallelen Variante erreicht werden, statt möglichen 876 % aus der Literatur [92]. Dieser Unterschied könnte durch die ineffiziente Selbstversorgung begünstigt sein, jedoch ist die Abweichung so groß, dass sich die Frage ergibt, ob die typischen Schaltungen für piezoelektrisches Energy Harvesting für Impulse geeignet sind oder nur für Schwingungsharvester.

DuToit et al. zeigten, dass die maximale Leistung bei Schwingungsharvestern dann extrahiert werden kann, wenn die elektrische Dämpfung und die mechanische Dämpfung des Systems gleich sind [8]. Nach Dicken et al. streben Energy Harvesting Schaltungen wie SSHI die Vergrößerung der elektrischen Dämpfung an, um die parasitäre mechanische Dämpfung anzugleichen [92]. Dieses Prinzip ist für Schwingungsharvester sinnvoll und sogar notwendig aber laut Abbildung 53 nicht für den Bodenharvester geeignet. Es ist naheliegend, dass die mechanisch übergedämpfte Natur des Bodenharvesters der Grund für die abweichenden Resultate ist. Durch das Wickeldesign ist das System so stark gedämpft, dass komplexe Harvester-schaltungen keine nennenswerte Dämpfungsanpassung erreichen können und durch die zusätzlichen Komponenten einen höheren Verbrauch generieren. Dadurch sinkt die Effizienz der Wandlung. Für nicht schwingende Systeme ist somit die Anwendung solcher Schaltungen ungeeignet.

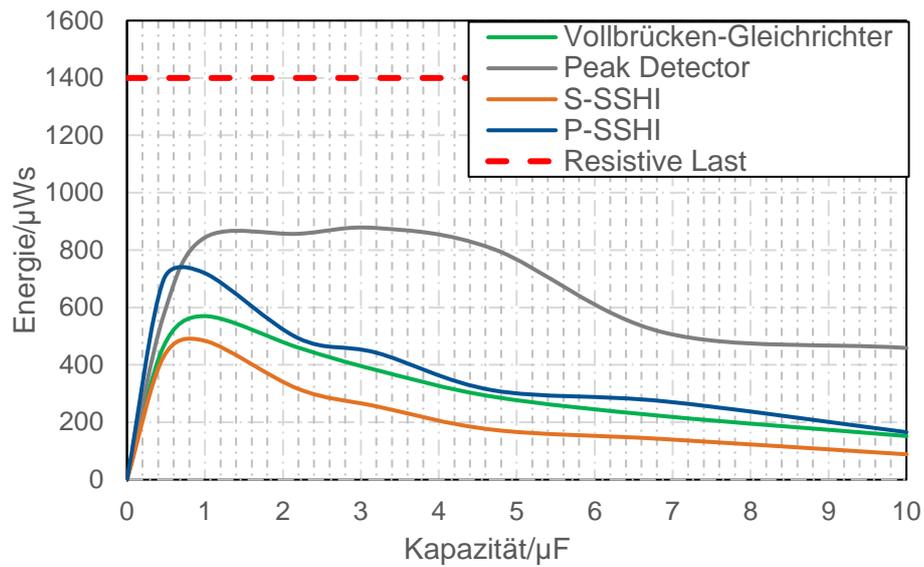


Abbildung 53: Vergleich der extrahierten Energie mit Hilfe verschiedener Schaltungen in Abhängigkeit der Speicherkapazität

4.7. Alternative Implementierung des Druckharvesters

Ein alternativer Aufbau zum Wandeln von mechanischen Belastungsenergien wurde ebenfalls untersucht. Anders als der Harvester aus Abschnitt 4.1 wurde der alternative Aufbau so einfach wie möglich gehalten. Weiterhin war das Ziel, den Quereffekt zu nutzen.

4.7.1. Aufbau

Der neue Aufbau bewirkt eine brückenähnliche Aufspannung einer beidseitig metallisierten PVDF-Folie. Durch eine von oben wirkende mechanische Kraft, wird die Folie nach unten gedrückt und somit gedehnt. Der Aufbau ist in Abbildung 54 dargestellt.

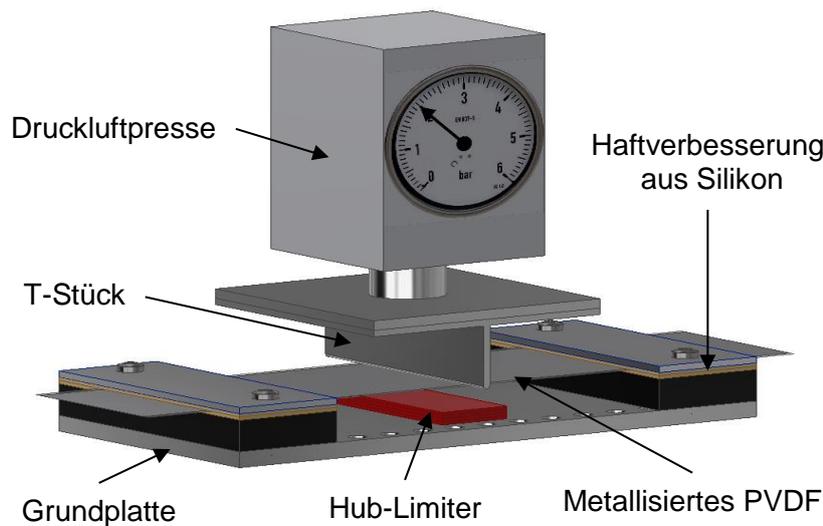


Abbildung 54: Alternativer Aufbau zum Dehnen von PVDF-Folien und Harvesten durch Schrittereignisse

Mit Hilfe von zwei POM-Blöcken, die in einem bestimmten Abstand zu einander auf der Aluminiumgrundplatte befestigt sind, wird die PVDF-Folie erhöht aufgespannt. Das ermöglicht ein Ausweichen der Folie bei einer von oben wirkenden Kraft und somit die Nutzung des piezoelektrischen Quereffekts. Die Folie wird zwischen beiden Blöcken aufgespannt und von Aluminiumplättchen mit Hilfe von Schraubenverbindungen fest gehalten. Zwischen POM-Block und Al-Plättchen sind auf jeder Seite zwei Silikonmatten zwischen denen die Folie durchgeführt wird. Diese sorgen für einen besseren Haft der Folie und verhindern ein Verrutschen während der Belastung. Die Blöcke werden von unten mit Schraubenverbindungen an die Grundplatte befestigt. Die zusätzlichen Bohrungen in der Grundplatte ermöglichen das Verstellen der Position und somit die Veränderung der gespannten Folienlänge.

4.7.2. Untersuchung der Ausgangsenergie in Abhängigkeit vom Volumen

Um die Effektivität dieses Aufbaus und den möglichen Energieertrag zu evaluieren wurde eine experimentelle Charakterisierung durchgeführt. Von Interesse war dabei die mögliche Ausgangsenergie in Abhängigkeit von dem aktiven PVDF-Volumen und von der erreichten Dehnung im Material. Um den Einfluss des Volumens festzustellen, wurden zwei Dimensionen, Länge und Breite, verändert und die resultierende Energie am Ausgang registriert. Als Erstes wurde die Länge des gespannten Folienabschnitts variiert, indem der Abstand zwischen den POM-Blöcken von 100 mm in 10 mm Schritten verändert wurde. Der minimale Abstand bei diesem Aufbau war 20 mm. Da eine Verkürzung der Folienlänge bei

gleichbleibendem Hub zwangsläufig zu einer vergrößerten Dehnung führen würde, wurde der Hub mit Hilfe von Unterlegmatten (in Abbildung 54 rot dargestellt) begrenzt. Durch eine geeignete Begrenzung des Hubs kann die Dehnung unabhängig von der Folienlänge konstant gehalten werden und somit der reine Volumeneffekt evaluiert werden. Als nächstes wurde die Folienbreite ausgehend von 40 mm schrittweise um jeweils 10 mm reduziert. Die minimale Breite im Rahmen dieser Versuche war 10 mm. Um vergleichbare Resultate zu erhalten, wurden alle Versuche mit derselben Folie durchgeführt. Dafür wurden die Versuche zur Längenabhängigkeit vollständig für eine Folienbreite durchgeführt bevor diese in der Breite gekürzt wurde. Für die neue Breite wurde die gleiche Versuchsreihe zur Längenabhängigkeit durchgeführt. Das wurde so oft wiederholt, bis der längenabhängige Energieverlauf für jede Folienbreite ermittelt worden war. Die effektive Dehnung wurde auf 2 % über die ganze Versuchsreihe konstant gehalten. Für die Belastung wurde eine Kraft von 160 N mit Hilfe der gleichen Luftdruckpresse aus Abschnitt 4.4.1 eingestellt. Diese Kraft ist ausreichend, um unabhängig von den Foliendimensionen die vollständige Dehnung zu realisieren. Der Druckstempel wurde mit Hilfe eines T-Stücks modifiziert, damit die Kraft die Folie nur mittig belastet. Aus diesem Grund kann die Hubbegrenzung auf Basis des Satzes von Pythagoras vereinfacht berechnet werden. Die Realisierung erfolgte mit Hilfe der Unterlegmatten. Die resultierende Versuchsmatrix mit den entsprechenden Energiewerten ist in Tabelle 6 zu sehen. Dabei erfolgten die Versuche zeilenmäßig von oben nach unten und spaltenmäßig von links nach rechts.

Tabelle 6: Versuchsmatrix für die Energie in Abhängigkeit von der Folienfläche bei einer Dehnung von 2 %

Länge Breite	100 mm	90 mm	80 mm	70 mm	60 mm	50 mm	40 mm	30 mm	20 mm
40 mm	442 μWs	320 μWs	298 μWs	210 μWs	169 μWs	113 μWs	65 μWs	53 μWs	52 μWs
30 mm	420 μWs	300 μWs	277 μWs	180 μWs	178 μWs	103 μWs	60 μWs	51 μWs	47 μWs
20 mm	330 μWs	290 μWs	270 μWs	176 μWs	174 μWs	101 μWs	50 μWs	43 μWs	41 μWs
10 mm	119 μWs	100 μWs	99 μWs	80 μWs	62 μWs	53 μWs	41 μWs	30 μWs	25 μWs

Für die Bestimmung der Energie wurde die Spannung bei jedem Versuch über einen Lastwiderstand gemessen. Aufgrund der geringen Folienfläche und der daraus resultierenden hohen Impedanz des Harvesters war eine Last von 21 MΩ notwendig für einen Betrieb im Bereich der maximalen Leistungsübertragung. Mit Hilfe der Spannung, des

Lastwiderstands und der Pulsdauer wurde dann die Energie berechnet. Die Folie wurde so lange belastet bis die Ladung vollständig abgeflossen war und somit die erzeugte Energie vollständig registriert wurde. Die in Tabelle 6 aufgelisteten Energiewerte beziehen sich auf die Gesamtenergie pro Zyklus, also der Ertrag während dem Belasten und dem Entlasten zusammen. Abbildung 55 zeigt diese Werte in Abhängigkeit vom Folienvolumen für die unterschiedlichen Folienbreiten.

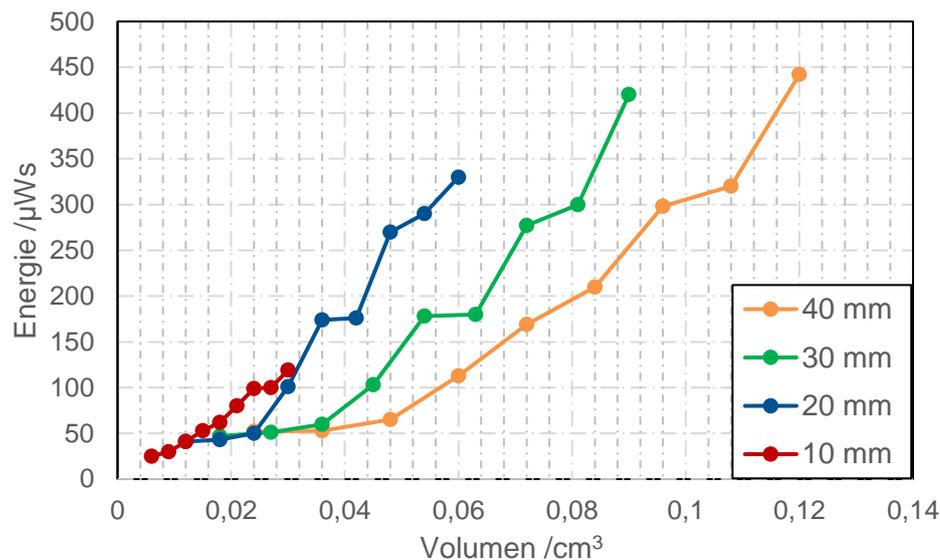


Abbildung 55: Abhängigkeit der Energie von dem Folienvolumen für verschiedene Folienbreiten

Wie zu erwarten wird bei gleicher Dehnung die höchste Energie mit dem größten Volumen gewandelt. Diese beträgt 442 μWs bei einer aktiven Fläche von 40 cm^2 bzw. einem aktiven Volumen von 0,12 cm^3 . Mit abnehmendem Volumen sinkt die erzeugte Energie. Auffällig ist die steigende Wandlungseffizienz bzw. Energiedichte mit schmal werdenden Folien. Abbildung 55 verdeutlicht, dass bei gleichem Volumen Folien mit geringerer Breite deutlich mehr Energie wandeln als breitere Folien. Bei einem Volumen von 0,06 cm^3 wandelt die 40 mm breite Folie 113 μWs während die 30 mm breite Folie 180 μWs wandelt und die 20 mm Folie sogar 330 μWs wandelt. Die Energiedichte ist also bei schmaleren Folien fast drei Mal so groß wie bei den breiteren. Obwohl bei beiden Varianten die gleiche Dehnung und das gleiche Volumen eingestellt ist, gibt es einen erheblichen Unterschied. Ein Blick auf Formel (10) in Abschnitt 3.3 zeigt neben Volumen und mechanischer Spannung auch eine Frequenzabhängigkeit, die als Ursache für dieses Ergebnis anzunehmen ist. Durch die Reduktion der Folienbreite im Gegensatz zur Folienlänge, ändert sich der dehnungsrelevante Querschnitt. Dadurch wird die gleiche Dehnung bei geringerer Kraft erzeugt. Bei konstanter mechanischer Kraft führt eine Reduktion des Querschnitts zu einer schnelleren Bewegung

der Folie und somit einer höheren Pulsfrequenz. Es entsteht daher ein positiver Effekt in Hinsicht auf die Wandlungseffizienz. Dieser Effekt ist jedoch nicht gleichzusetzen mit dem negativen Volumeneffekt. Dadurch wird die Abnahme der Ausgangsenergie bei einer Reduktion der Folienbreite nur verlangsamt gegenüber der Abnahmerate bei einer Längenreduktion.

4.7.3. Untersuchung der Ausgangsenergie in Abhängigkeit von der Dehnung

Neben dem Volumen spielt die resultierende Dehnung eine ausschlaggebende Rolle auf die Ausgangsenergie. Um ihren Effekt zu untersuchen, wurden im Rahmen der Messreihe aus Abschnitt 4.7.2 weitere Messungen vorgenommen, die darüber Aufschluss geben sollen. Dafür wurde für jede Folienbreite, bei einer auf 50 mm festgelegten Länge, unterschiedliche elastische Dehnungen zwischen 0,5 % und 3 % durch die Hubeinstellung erzeugt. Aus der gemessenen Spannung über den 21 M Ω Lastwiderstand wurde die Energie berechnet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abbildung 56 dargestellt. Neben der Erkenntnis über den in Abschnitt 4.7.2 diskutierten Volumeneffekt ist hier eine klare Steigung der gewandelten Energie mit steigender Dehnung erkennbar. Für Folien mit einer Breite von 40 mm wird bei einer Dehnung von 3 % eine elektrische Energie von 215 μ Ws erzeugt. Dieser Wert ist fast doppelt so hoch wie der des gleichen Folienabschnitts bei einer Dehnung von 2 %. Die Ergebnisse dieses Kapitels sollen bei der Auswahl von geeigneter Harvester-Konfigurationen dienen. Abhängig von den verfügbaren Kräften, Dimensionen und der gewünschten Ausgangsenergie, lässt sich mit Hilfe dieser Werte die notwendige Harvester-Konfiguration in Hinsicht auf Folienbreite, -Länge und -dehnung finden. Aus Abbildung 56 ist weiterhin zu erkennen, dass der Output der Folie mit 10 mm Breite stark abweicht von den restlichen Breiten. Das liegt daran, dass das Schneiden der Folie einen Kurzschluss verursacht hatte, der durch das Abreiben der Metallisierung an den Folienrändern wieder verhindert wurde. Dieses Abreiben verkleinerte die Elektrodenfläche um einen Anteil, der bei dieser geringen Folienbreite sichtbare Auswirkungen hatte.

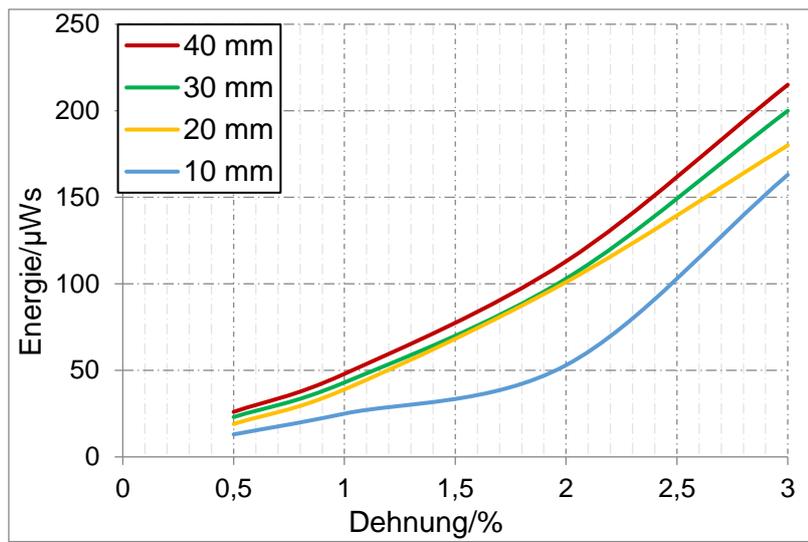


Abbildung 56: Energieverlauf in Abhängigkeit der Dehnung für unterschiedliche Folienbreiten

5. Perspektivische Applikation – Autarke Sensoren

In diesem Kapitel sollen mögliche perspektivische Applikationen der Energy Harvester diskutiert werden. Ziel ist es, die Eignung der Energy Harvester für praktische Applikationen festzustellen. Diese Eignung ist dann gegeben wenn mindestens einer der folgenden Kriterien erfüllt ist:

- Ein Batteriebetrieb ist unmöglich oder ungenügend und kann durch einen Harvester ersetzt oder ergänzt werden.
- Der Harvester übernimmt neben der Energieversorgung eine weitere Funktion wie beispielsweise die Sensorfunktion.

Ein reiner Batteriebetrieb ist unter anderem dann nicht möglich, wenn die Applikation so lange betrieben werden soll, dass eine Entladung der Batterie unvermeidbar ist und die Batterie ohne größeren Aufwand unzugänglich ist. In diesem Fall ist ein Batteriewechsel ökonomisch unvorteilhaft. Auch Applikationumgebungen, die aufgrund von extremen Temperaturen für Batterieeinsätze nicht geeignet sind, könnten den Einsatz von Energy Harvestern rechtfertigen. Harvester können entweder im Mischbetrieb als Ergänzung zu aufladbaren Speichern, wie Akkumulatoren, eingesetzt werden, oder versorgen die Last komplett eigenständig. Welcher dieser beiden Einsatzmöglichkeiten in der Praxis sinnvoll ist, hängt zum einen von der Wandlungseffizienz und der verfügbaren Umgebungsenergie ab und zum anderen von dem Energieverbrauch der Applikation. Der Energieoutput der jeweiligen Harvester ist in Kapitel 3 und 4 diskutiert. Im folgenden liegt der Fokus auf dem Aufbau und dem Energieverbrauch von perspektivischen Applikationen, speziell: Funksensoren. Funksensoren haben einen sehr geringen Energieverbrauch und werden oft in Einsatzbereichen benötigt, die eine Verkablung nicht zulassen. In diesen Fällen ist ein reiner Batteriebetrieb der Stand der Technik. Mit Hilfe von Energy Harvestern ist nun eine weitere Alternative gegeben, die den Einsatz solcher Sensoren an kritischen Positionen erlaubt und dadurch hochauflösende Systeme ermöglicht.

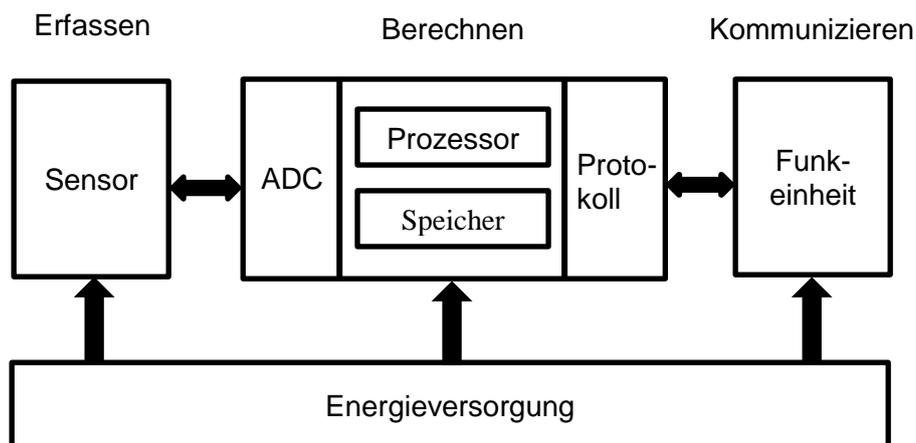


Abbildung 57: Vereinfachte Architektur eines Sensorknotens [95]

Um den Energieverbrauch einer solchen Applikation zu bestimmen hilft eine Analyse der einzelnen Komponenten eines solchen Systems und deren Verbrauch. Abbildung 57 zeigt eine vereinfachte Architektur eines Sensorknotens mit den notwendigsten Komponenten. Abhängig von dem konkreten Einsatzszenario des Knotens ändert sich dessen Verbrauch. Aus diesem Grund wird für die Bestimmung der minimalen Energie, der einfachste Einsatz des Sensors als Kippschalter festgelegt. Der Knoten soll bei der Veränderung des Zustands eine Funknachricht mit dem neuen Zustand versenden. Bis zur nächsten Zustandsänderung bleibt der Knoten im Schlafmodus und spart Energie. Diese Funktion kann zum Steuern von Verbrauchern oder zur Belegungserkennung genutzt werden. Im folgenden Abschnitt, wird die Funktion, die Implementierung und der Energieverbrauch näher erläutert.

5.1. Analyse des Energieverbrauchs

Die Analyse des Energieverbrauchs der einzelnen Knotenbausteine ist in diesem Abschnitt dargestellt. Die Summe aller Verbräuche ergibt den Gesamtverbrauch des Knotens.

5.1.1. Energieverbrauch des Sensors

Beginnend beim Sensor hat die festgelegte Applikation ihre ersten Vorteile. Die zu detektierenden Ereignisse sind eindeutig und können nur einen von zwei Zuständen annehmen, 0 und 1. Dadurch lässt sich die Länge des Datenpakets theoretisch auf einen Bit reduzieren. Weiterhin kann die Sensorfunktion vollständig von einem Energy Harvester übernommen werden, der impulsbasiert eine Wechselspannung liefert. Ein Beispiel solcher Harvester ist in Kapitel 4 beschrieben. Eine Belastung dieses Harvesters führt zu einem positiven Spannungspuls der als „Zustand 1“ registriert werden kann. Bei der Entlastung

ensteht ein negativer Puls der den „Zustand 0“ signalisiert. Durch die Übernahme der Detektion vom Energy Harvester ist die notwendige Energie für die Zustandserfassung praktisch Null. Die Implementierung der Detektion ist schaltungstechnisch realisiert worden und in Abschnitt 5.2 beschrieben.

5.1.2. Energieverbrauch des Rechners

Die Energie, die für die Berechnung notwendig ist, hängt zum Teil von der Struktur und Ausführung des Programms ab, aber auch von dem eingesetzten Mikrocontroller (μC) und dessen Energieverbrauch. Ist also ein μC für low-power Applikationen ausgelegt aber das Programm unnötig kompliziert oder fehlerbehaftet geschrieben, steigt der Verbrauch trotzdem. Das gleiche gilt für effiziente Programme die mit ineffizienter Hardware ausgeführt werden. Für die Berechnungen in diesem Kapitel wurde ein μC aus der MSP430-Serie der Firma Texas Instruments™ verwendet. Dieser μC ist Teil des Entwicklungskits EZ430-RF2500, welches speziell für ultra-low-power Funkapplikationen ausgelegt ist und zu den effizientesten Rechnern dieser Klasse gehört [99]. Der μC kann bei einer Betriebsspannung von 2,2 V und einer Taktung von 1 MHz bereits ab einer Stromaufnahme von ca. 270 μA betrieben werden. Abhängig vom Schlafmodus kann der Verbrauch in Standby laut dem Datenblatt auf 700 nA gesenkt werden [100]. Wie lange der μC im aktiven Modus verweilt, hängt vom Programm ab. Um diese Zeit zu minimieren, wurde das Programm so geschrieben, dass der μC nur im Fall eines Ereignisses aus dem Schlafmodus aufwacht. Dieses eventbasierte Aufwachen wurde mit Hilfe von General Purpose Input Output Pins (GPIO-Pins) realisiert. Sobald eine Flanke an diesen Eingängen registriert wird, wird mit Hilfe eines Interrupts der Schlafmodus unterbrochen und das Programm gestartet. Zwei GPIO-Pins wurden dafür verwendet, wobei einer bei einer positiven Flanke vom Harvester getriggert wird und der andere bei einer negativen. Somit sind keine weiteren Berechnungen notwendig. Wird die Unterbrechung von GPIO-Pin 1 ausgelöst, ist automatisch der „Zustand 1“ erfasst worden und das entsprechende Bit wird auf 1 gesetzt und gesendet. Bei einer Unterbrechung durch GPIO-Pin 2 herrscht der „Zustand 0“ und das Bit wird auf 0 gesetzt und versendet. Beide Fälle bilden separate einfache While-Schleifen, die nach dem Verschicken der Daten den μC wieder in den Schlafmodus schicken. Die aktive Dauer des μC beträgt laut Messungen ca. 2,5 ms. Dadurch beträgt der Basisverbrauch des μC im Betrieb ca. 1,5 μWs . Damit ist die Voraussetzung für low-power Applikationen gegeben. In der Praxis fällt der Energieverbrauch der Hardware durch Schaltungsmaßnahmen für die Signalverarbeitung,

wie Pull-Up-Widerstände, deutlich höher an. Die gemessenen Verbrauchswerte sind am Ende dieses Kapitels dargestellt.

5.1.3. Energieverbrauch des Funkmoduls

Die Energie für die Kommunikation der Daten hängt von mehreren Faktoren ab. Das Netzwerkprotokoll gibt die Netzwerktopologie an und bestimmt Eigenschaften wie die Übertragungsfrequenz und die maximale -rate. Dadurch wird der Verbrauch durch die Wahl des Protokolls stark beeinflusst. Weiterhin ist die Paketgröße ein wichtiger Faktor. Die Sendeleistung beeinflusst ebenfalls den Energieverbrauch. Nicht zuletzt besitzt der Verbrauch im Schlafmodus einen großen Anteil des Gesamtverbrauchs des Funkmoduls. In Tabelle 7 ist eine Übersicht einiger Funkprotokolle und deren Werte für den Verbrauch aufgelistet.

Tabelle 7: Vergleich einiger Funkprotokolle und deren Verbrauch bei der Datenkommunikation [101],[102]

	BLE	ZigBee	EnOcean	LoRa	SigFox
Protokollstandard	offen	offen	proprietär	offen	proprietär
Reichweite	ca. 10 m	10 m - 100 m	30 m - 300 m	2 km - 15 km	3 km - 50 km
Übertragungsfrequenz	2.4 - 2.485 GHz	EU: 868 MHz USA: 915 MHz weltweit: 2.4 GHz	868 MHz, 902 MHz, 928 MHz	EU: 433 MHz 868 MHz USA: 915 MHz	EU: 868 MHz USA: 902 MHz
Datenübertragungsrate	bis 2 Mbit/s	bis 250 kbit/s	125 kbit/s	bis 50 kbit/s	600 bit/s
Verschlüsselungsverfahren	128-bit AES	128-bit AES	Rolling Code + 128-bit AES	128-bit AES	n. a.
Leistung beim Senden eines 256 bit Datenpakets	15 mW - 57.6 mW	93 mW - 148.5 mW	108 mW	432 mW	252 mW
Leistung beim Empfangen eines 256 bit Datenpakets	16.2 mW - 46.8 mW	78 mW - 165 mW	148.5 mW	10,8 mW	108 mW
Leistung im Deep-Sleep-Modus	1.44 μ W - 9.36 μ W	1.2 μ W - 30 μ W	0.9 μ W	0,36 μ W	5 mW
Energieverbrauch beim Senden eines 256 bit - Datenpakets	1.92 μ Ws - 59 μ Ws	95.2 μ Ws - 152.1 μ Ws	221.2 μ Ws	2,2 mWs	107 mWs
Energieverbrauch beim Empfangen eines 256 bit - Datenpakets	2.1 μ Ws - 47.7 μ Ws	79.9 μ Ws - 169 μ Ws	304 μ Ws	55,3 μ Ws	46 mWs
Energieverbrauch im Deep-Sleep-Modus	1.44 μ Ws - 9.36 μ Ws	1.2 μ Ws - 30 μ Ws	0.9 μ Ws	0,36 μ Ws	5 mWs
Funkmodule auf dem Markt	ja	ja	ja	ja	ja

In diesem Kapitel bildet das Funkmodul CC2500 von Texas Instruments™ die Grundlage der Verbrauchsanalyse. Das Modul ist Teil des Entwicklungskit EZ430-RF2500 und gilt somit als optimierte Ergänzung für den μ C. Das Funkmodul nutzt das proprietäre Protokoll SimpliciTI® und sendet mit 2,4 GHz Daten mit einer Rate von bis zu 500 kbit/s. Beim Senden mit einer Sendeleistung von 0 dBm verbraucht das Modul 21 mA bei einer Betriebsspannung zwischen 1,8 V und 3,6 V [100]. Im Ruhezustand verbraucht der Chip 400 nA [103]. Um den Verbrauch beim Senden zu minimieren, wurde das Datenpaket auf einen einzigen 8-Bit Wert festgelegt,

der für die Erfassung der zwei möglichen Zustände ausreichend ist. Dadurch wurde die Zeit verkürzt, die das Funkmodul für das Versenden der Daten benötigt.

5.2. Implementierung

Dieser Abschnitt beschreibt die Implementierung des drahtlosen Funkschalters näher. Insbesondere wird die schaltungstechnische Realisierung der Detektion beschrieben, sowie die notwendigen Maßnahmen für die Versorgung der Applikation mit Hilfe des Energy Harvesters.

5.2.1. Detektionsimplementierung

In den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 sind die zwei möglichen Zustände (0 und 1) dieses Schalters beschrieben und wie diese mit Hilfe von GPIO Pins vom μC erfasst werden.

Für die Implementierung der Detektion wurde aufgrund der Verfügbarkeit ein PVDF-Wickel mit fünf Windungen eingesetzt. Dieser liefert bei Belastung und Entlastung einen Verlauf wie in Abbildung 44 dargestellt. Da der positive Puls eine Belastung signalisiert und der negative Puls eine Entlastung, werden diese unterschiedlichen Vorzeichen für die Änderung der jeweiligen GPIO Pinzustände genutzt. Laut μC -Programmierung wird ein Interrupt ausgeführt, wenn eine fallende Flanke am GPIO Pin registriert wird. Das erfordert, dass die Pins standardmäßig hochgesetzt sind und bei der Detektion des entsprechenden Ereignisses auf Null gezogen werden. Dieses Hochsetzen der Pins wird mit Hilfe von pull-up Widerständen realisiert, die die jeweiligen Pins über einen hochohmigen Widerstand mit der Betriebsspannung verbinden. Wird ein Ereignis erfasst, wird über einen Schalter, konkret einem N-Kanal-MOSFET, der GPIO Pin mit der Masse verbunden und somit eine fallende Flanke realisiert. Abbildung 58 zeigt die schaltungstechnische Implementierung. Dabei wird bei positiver Flanke MOSFET M1 über einen Spannungsteiler R3-R2 gesteuert. Bei negativer Harvesterspannung wird MOSFET M2 über den anderen Teiler R6-R5 gesteuert. Die Spannungsteiler realisieren einen Schwellwert, ab dem die MOSFETs geschaltet werden, um eine Fehldetektion zu vermeiden. Abhängig vom Teilverhältnis muss eine ausreichend hohe Kraft den Harvester belasten und eine ausreichend hohe Spannung generieren, um den MOSFET zu schalten. Neben dem Teilverhältnis ist auch die Höhe des Gesamtwiderstands wichtig, da dieser den Harvester entlädt. Fließt zu viel Strom über diesen Widerstand ab, steigt der Verbrauch dieser Schaltung. Dadurch bleibt weniger Energie übrig, die für die Versorgung der restlichen Komponenten genutzt werden kann. Bei der Implementierung

wurde ein Teilverhältnis von 3:1 und ein Gesamtwiderstand von $40\text{ M}\Omega$ gewählt. Auch die Höhe der pull-up Widerstände R1 und R4 ist wichtig, da im leitenden Zustand der MOSFETs die Betriebsspannung U_{CC} darüber abfällt. Sind die Widerstände zu niedrig, fließt zu viel Strom und die Energie aus dem Speicherkondensator ist schnell verbraucht. Für die Implementierung wurde deswegen eine externe Schaltung mit $1\text{ M}\Omega$ bevorzugt. Abbildung 59 zeigt den Verlauf der Spannung an den beiden GPIO Pins in Verbindung mit dem Ausgang des Gleichrichters während dem Be- und Entlasten. Die Dauer, in der Strom durch den pull-up Widerstand fließt, entspricht dem Bereich in dem die rote Kurve gleich null ist. Diese Dauer ist für die Belastung länger, da das Dehnen der Folien im Gegensatz zu deren Entspannung nicht schlagartig passiert. Dadurch ist die Eingangspulsdauer länger.

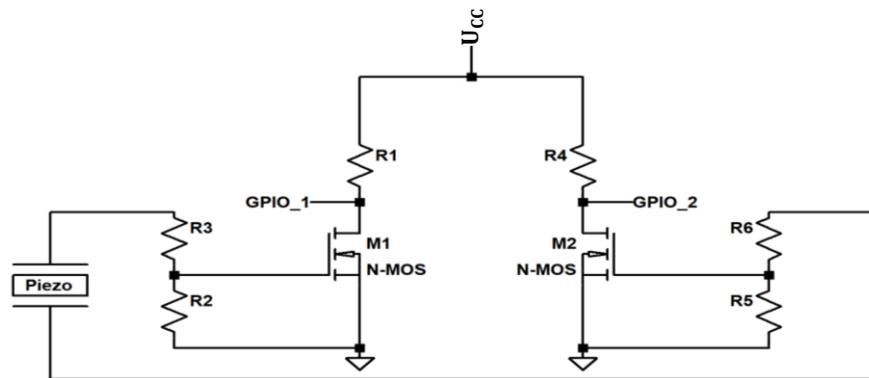


Abbildung 58: Implementierung von Triggersignalen für die Zustandserkennung mit Hilfe des Energy Harvesters und pull-up Widerständen [104]

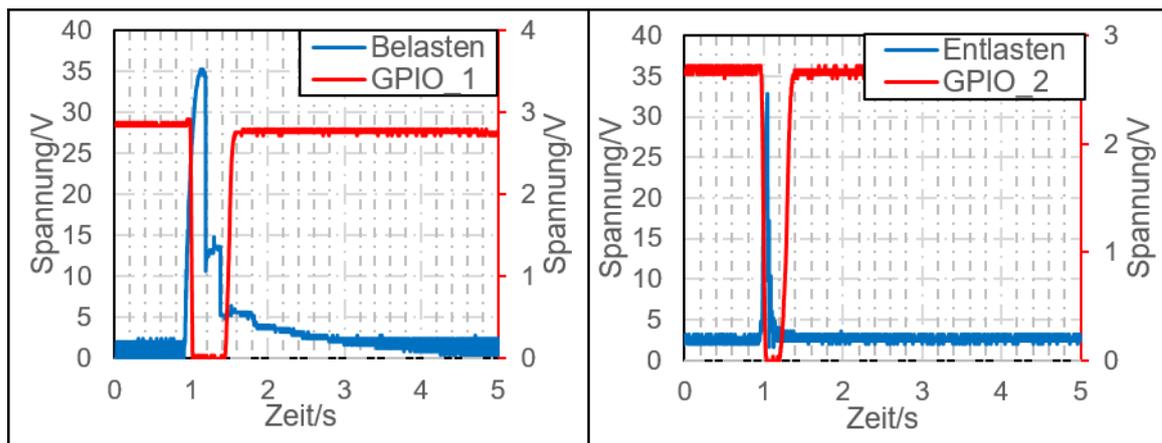


Abbildung 59: Verlauf der GPIO Spannungen während dem Belasten (links) und dem Entlasten (rechts)

5.2.2. Implementierung der Energieversorgung

Die beschriebene Applikation benötigt eine regulierte und kontinuierliche Gleichspannung für eine korrekte Operation. Die im Rahmen dieser Arbeit diskutierten Harvesteransätze liefern jedoch ein Wechselsignal, welches im Fall des Bodenharvesters sogar nicht periodisch ist. Aus diesem Grund muss der Output mit Hilfe der Schaltung aus Abbildung 51 gleichgerichtet und zwischengespeichert werden.

Das Einstellen der richtigen Betriebsspannung kann mit Hilfe von zwei Methoden realisiert werden. Entweder über die Größe des Kondensators C_2 , der dann direkt an die Last angeschlossen wird, oder mit Hilfe eines zusätzlichen DC-DC-Wandlers, der abhängig von der Eingangsspannung eine Vergrößerung (Boost) oder Verkleinerung (Buck) vornimmt und die Ladung auf einen weiteren Kondensator überträgt. Beide Varianten haben eine Effizienz kleiner 1 und verbrauchen einen Teil der Energie. Neben der Wandlungseffizienz spielt die Größe des Speicherkondensators ebenfalls eine Rolle im Zusammenhang mit der Betriebsspannung. Ist der Kondensator groß, steigt die Spannung bei gleicher Energie deutlich geringer an als bei kleinen Kondensatoren. Wird ein kleiner Kondensator gewählt, um die richtige Betriebsspannung mit geringerer Energie zu erreichen, so bricht die Spannung bei einer Energieentnahme schneller ab. Um diesen Konflikt zu vermeiden, wurde ein relativ großer $220\ \mu\text{F}$ Kondensator eingesetzt und auf ca. $3,3\ \text{V}$ vorgeladen. Durch das Vorladen auf die entsprechende Betriebsspannung ist der Nachteil großer Kapazitäten eliminiert worden. Während des Entladens mit typischen Verbrauchswerten von einigen zehn bis hundert Mikrojoule fällt die Spannung nur geringfügig um einige zehn bis hundert Millivolt ab. In der Praxis lässt sich der vorgeladene Kondensator durch eine sekundäre Batterie ersetzen. Dadurch ist die Betriebsspannung stabilisiert. Wichtig ist, dass die nachgeladene Energie aus dem Harvester, der verbrauchten Energie gleicht oder diese übertrifft.

5.3. Resultate

Zur Validierung der Applikation muss die Energie charakterisiert werden, die bei dieser Implementierung tatsächlich von einem Wickel nachgeladen wird. Weiterhin wird der Energieverbrauch der einzelnen Komponenten gemessen und der nachgeladenen Energie gegenüber gestellt. Mit Hilfe dieser Ergebnisse wurde die Eignung des Energy Harvesters für die Versorgung einer einfachen drahtlosen Applikation für eine Belegungserkennung untersucht.

5.3.1. Speicheraufladung

Der Einsatz eines Energy Harvesters ist sinnvoll, wenn durch dessen Energiezufuhr die operative Lebensdauer des Verbrauchers deutlich verlängert werden kann. Dafür muss die gewandelte Energie einen signifikanten Anteil der Speicherentladung ausgleichen. Neben dem Verbrauch der Applikation im Aktiv- und Schlafmodus, kann die Selbstentladung des Speicherelements eine entscheidende Rolle für den Einsatz eines Harvesters spielen. Die Selbstentladung fällt für unterschiedliche Speicherelemente unterschiedlich hoch. Aus diesem Grund wurde die Ladeeffizienz für zwei Speichermöglichkeiten untersucht. Als erstes wurde ein Kondensator aufgeladen. Kondensatoren bieten den Vorteil einer direkten Abhängigkeit der Energie von der Spannung und ermöglichen eine einfache Ermittlung der Ladeeffizienz. Aufgrund hoher Leckströme weisen Kondensatoren jedoch eine höhere Selbstentladung als Akkumulatoren auf. Die Effizienz beim Laden eines Akkumulators durch den Energy Harvester wurde in einem zweiten Versuch ermittelt. Für die Untersuchungen wurde ein Harvester mit fünf Windungen mit einer Kraft von 400 N belastet.

5.3.1.1. Aufladung eines Kondensators

Die Impedanz eines Kondensators hängt eng mit dessen Betriebsparametern zusammen. Ist der Kondensator vollständig entladen und die Spannung null, so ist der Ladestrom sehr hoch. Mit steigender Spannung sinkt der Ladestrom. Diese Ladungszustandsabhängigkeit der Impedanz beeinflusst die Effizienz des Nachladens. Um geeignete Betriebsparameter und die dazugehörige speicherbare Energie zu identifizieren, wird der Kondensator bei unterschiedlichen Ladezuständen nachgeladen und die zugeführte Energie mit Hilfe des Spannungsanstiegs bestimmt. Abbildung 60 zeigt das Ergebnis dieser Untersuchung und deutet auf eine Effizienzsteigerung bei geladenem Kondensator im Vergleich zum vollständig entladenen. Diese Steigerung erreicht ihren Höhepunkt im Bereich von 3 V, wo die maximale Energie beim Belasten 66 μ Ws und beim Entlasten 82 μ Ws beträgt. Im Vergleich zu den Ergebnissen aus den Abschnitten 4.5.1 und 4.6.2 ist die Gesamteffizienz deutlich geringer. Die Gesamteffizienz gibt das Verhältnis zwischen aufgeladener Energie und die maximal umgesetzte Energie in einer ohmschen Last. Für die Belastung beträgt die Gesamteffizienz 20 % und für die Entlastung 15 %. Diese geringen Werte sind auf die Größe des Kondensators zurückzuführen, die mit 220 μ F deutlich über dem optimalen Bereich liegt (vgl. Abbildung 53).

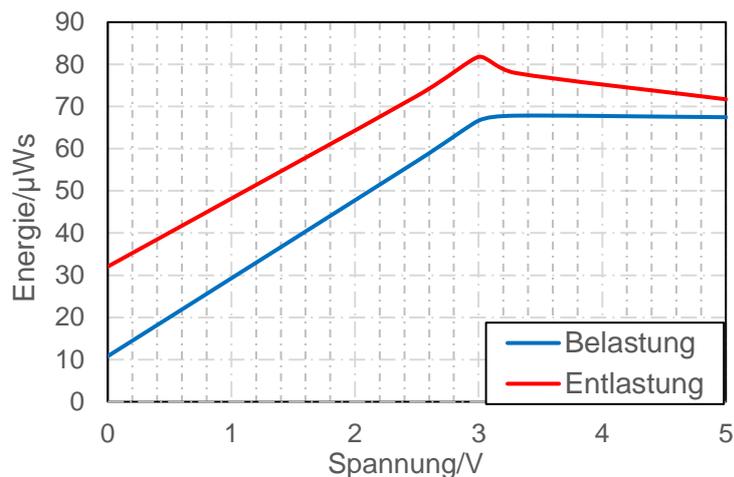


Abbildung 60: Nachgeladene Energie beim Be- und Entlasten des Harvesters in Abhängigkeit vom Ladezustand des 220 µF Speicherkondensators

5.3.1.2. Aufladung eines Dünnsfilm-Akkumulators

Batterien haben im Vergleich zu den meisten Kondensatoren höhere Energiedichten und kleinere Leckströme., Aus diesen Gründen sind sie sehr gut für den langfristigen Einsatz geeignet. Sekundäre Batterien oder Akkumulatoren lassen sich wieder aufladen und eignen sich somit gut für den Einsatz mit Energy Harvestern. Dünnsfilmvarianten haben den weiteren Vorteil des geringeren Platzbedarfs. Um zu untersuchen, wieviel Energie der Harvester in einen solchen Akku nachladen kann, wurde die Schaltung aus Abbildung 51 verwendet. Parallel zum Pufferkondensator C2 wurde zusätzlich ein Li-Ion Akku (THINERGY® MEC101) geschaltet. Zwischen den beiden Speicherelementen befand sich noch ein Widerstand, der für die Strommessung genutzt wurde. Anhand des Stroms, der vom Kondensator in den Akku fließt, der Spannung des Akkus und der Dauer des Aufladevorgangs, kann die Energie bestimmt werden. Die Größe des Pufferkondensators spielt bei der Ladeeffizienz eine Rolle. Zum einen beeinflusst sie die Effizienz bei der Extrahierung der Energie aus dem Harvester. Zum anderen beeinflusst sie die Effizienz der Übertragung vom Kondensator auf den Akku. Um ein Optimum zu finden, wurden unterschiedliche Kapazitäten untersucht und die resultierende Energie bestimmt. Bei fünf getesteten Kapazitäten zwischen 50 nF und 4,7 µF erwies sich laut Abbildung 61 eine Kapazität von 150 nF als optimal. Die nachgeladene Energie beträgt dabei 43 µWs für eine Belastung und 57 µWs für die Entlastung. Damit liegt die Ladeeffizienz des Akkus mit Hilfe des Energy Harvesters um 30 % niedriger im Vergleich zum Nachladen des 220 µF Kondensators.

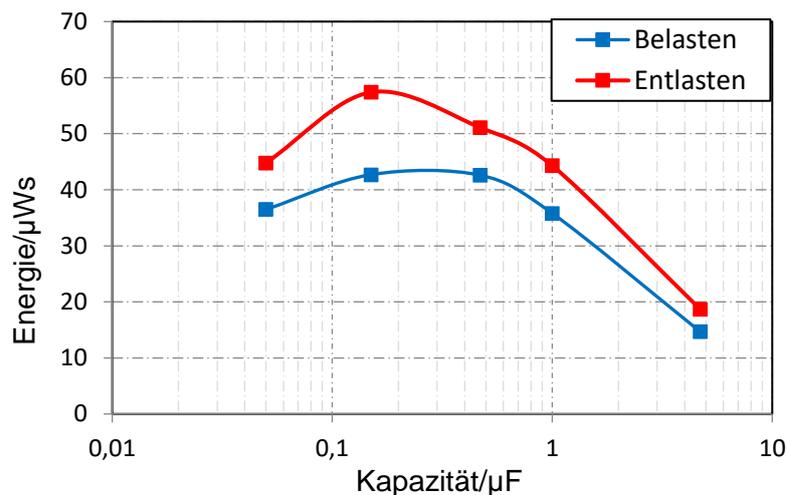


Abbildung 61: Nachgeladene Energie in einem 1 mAh Dünnsfilm-Akku während dem Be- und Entlasten in Abhängigkeit der Kapazität des Pufferkondensators

5.3.2. Energieverbrauch

Der Gesamtverbrauch der Applikation lässt sich in zwei Hauptkomponenten aufteilen. Ein Teil dieses Verbrauchs wird durch die Detektionsschaltung verursacht, der andere Teil ist auf das Endgerät (μC + Funkmodul) zurück zu führen. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Verbrauchsmessung präsentiert und diskutiert.

5.3.2.1. Verbrauch der Detektionsschaltung

Der Verbrauch der Detektionsschaltung ist auf den Stromfluss durch die Spannungsteiler und die pull-up Widerstände sowie auf den Verbrauch der MOSFETs zurück zu führen. Sowohl Spannungsteiler als auch MOSFETs werden direkt vom Harvester versorgt. Somit reduzieren sie die Energie, die im Kondensator gespeichert wird. Um deren Verbrauch zu bestimmen, wurde die Energie im Speicherkondensator C2 aus Abbildung 51 ermittelt. Im Anschluss wurde der gleiche Versuch wiederholt, wobei diesmal die Detektorschaltung zusätzlich angeschlossen war. Aus dem Unterschied der beiden Energien ergibt sich der Energieverbrauch der Schaltung E_S . Für die Belastung entspricht dieser Verbrauch $15,5 \mu\text{Ws}$. Während der Entlastung wird aufgrund des höheren Gesamtwiderstands des Spannungsteilers nur $13,3 \mu\text{Ws}$ verbraucht. Die pull-up Widerstände, die vom Kondensator versorgt werden, waren dabei nicht angeschlossen und somit unberücksichtigt. Um deren Verbrauch E_p zu bestimmen, wird nach Formel (18) das Quadrat der Versorgungsspannung U_{CC} durch den pull-up Widerstand R_p geteilt und mit der Dauer t_{an} , die die jeweiligen MOSFETs angeschaltet sind, multipliziert.

$$E_p = \frac{U_{CC}^2}{R_p} * t_{an} \quad (18)$$

Die Dauer t_{an} beträgt nach den Messungen aus Abbildung 59 ca. 0,5 s für die Belastung und 0,35 s für die Entlastung. Mit dem pull-up Widerstand von 1 M Ω und einer Betriebsspannung von 3 V ergibt das einen Verbrauch von 4,5 μ Ws für die Belastung und 3,15 μ Ws für die Entlastung. Diese sind das Resultat einer Optimierung im Vergleich zum Verbrauch der internen pull-up Schaltung, die zuvor mit einem Widerstand von nur 50 k Ω zu Verbrauchswerten bis zu 90 μ Ws führten. Der Verbrauch der Detektorschaltung E_D , als Summe der beiden Verbrauchswerten E_S und E_p , beträgt somit 20 μ Ws für die Belastung und 16,45 μ Ws für die Entlastung.

5.3.2.2. Verbrauch des Endgeräts

Neben dem Verbrauch der Detektorschaltung verbraucht das Endgerät für die Berechnungen und für das Verschicken der Daten per Funk eine gewisse Energie. Um diese Energie E_E zu bestimmen, wurde über einem Shunt-Widerstand die Spannung als Indikator über den Strom gemessen. Aus dem Effektivwert U_{eff} , dem Shunt-Widerstand R_S , der Betriebsspannung U_{CC} und der Dauer einer Sendung t_{Tx} wurde der Verbrauch nach Formel (19) ermittelt.

$$E_E = \frac{U_{eff}}{R_S} * U_{CC} * t_{Tx} \quad (19)$$

Da diese Energie unter anderem von der Sendeleistung abhängt, wurde diese von 0 dBm auf -10 dBm reduziert. Der resultierende Stromverbrauch als Spannung über dem 8 Ω Shunt-Widerstand ist in Abbildung 62 (links) dargestellt. Für eine Betriebsspannung von 3 V ergibt sich aus diesem Stromverlauf ein Energieverbrauch von 120 μ Ws für 0 dBm Sendeleistung und 92 μ Ws für die reduzierte Sendeleistung. Neben der Sendeleistung hängt der Verbrauch auch von der Betriebsspannung ab. Diese wurde zwischen 2,1 V und 3,6 V variiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind ebenso in Abbildung 62 (rechts) dargestellt. Durch eine Reduktion der Betriebsspannung auf 2,1 V sinkt der Verbrauch auf ca. 62 μ Ws für Sendungen mit -10 dBm.

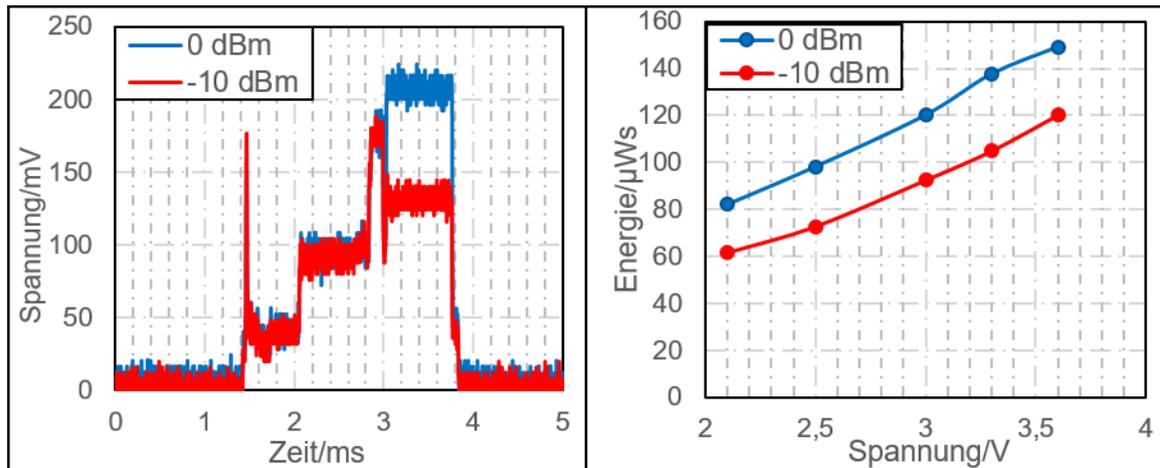


Abbildung 62: Stromverbrauch des Endgeräts bei der Detektion eines Ereignisses gemessen als Spannung über einen 8Ω Shunt-Widerstand für eine Sendeleistung von 0 dBm und -10 dBm (links). Resultierender Energieverbrauch während dem Senden in Abhängigkeit von der Betriebsspannung (rechts)

5.3.3. Energiebilanz

Nachdem die einzelnen Verbrauchswerte berechnet und messtechnisch ermittelt wurden, wurde daraus die Eignung des Energy Harvesters für die Versorgung festgestellt. Dafür wurden alle Komponenten des Gesamtsystems gleichzeitig untersucht und die Energiebilanz experimentell anhand des Spannungsverlaufs am Speicherkondensator analysiert. Weiterhin wurde eine Berechnung der Lebensdauer für batteriebetriebene Applikationen durchgeführt. Der schematische Aufbau des Gesamtsystems ist in Abbildung 63 dargestellt. Die Energiemanagementschaltung entspricht die aus Abbildung 51. Die Detektionsschaltung ist die aus Abbildung 58. Der grüne Rahmen beinhaltet die Komponenten des Endgeräts und verdeutlicht den Programmablauf.

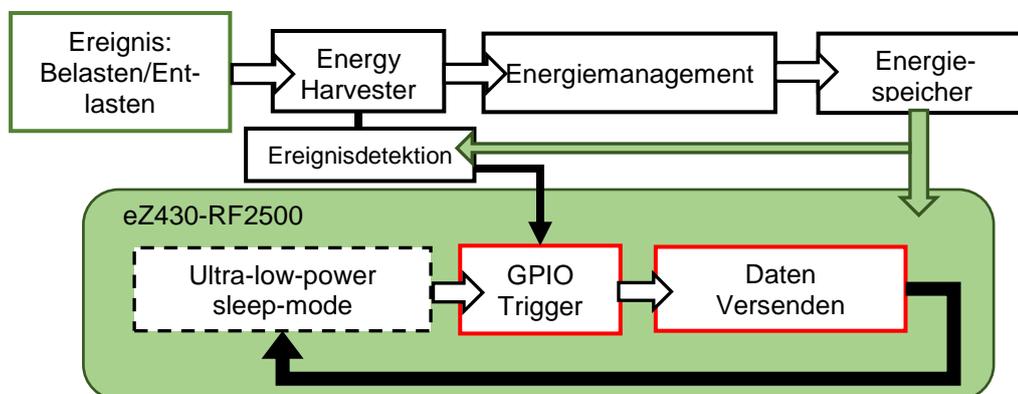


Abbildung 63: Aufbau des Gesamtsystems eines harvesterbetriebenen drahtlosen Belegungsdetektor [104]

Abhängig von der Applikation können unterschiedliche Testszenarien von Interesse sein. Eins dieser Testszenarien ist das Versenden eines Datenpakets bei jedem Ereignis, also sowohl bei einer Belastung als auch bei einer Entlastung. Dadurch könnte beispielsweise die Belegung und das Freiwerden einer Fläche registriert werden. Ein weiteres Szenario ist das Versenden eines Datenpakets nach einem vollständigen Zyklus also Be- und Entlasten zusammen. Das könnte zum Beispiel in einem Durchgangsbereich als Zähler verwendet werden. Weitere Möglichkeiten, die nicht explizit untersucht worden sind, könnten ein Versenden der Daten nach einer bestimmten Anzahl von Schritten oder vollständig unabhängig von der Schrittzahl nach einer bestimmten Dauer sein.

5.3.3.1. Kondensatorbetriebene Applikation

Für den Betrieb mit einem Speicherkondensator wurden die ersten beiden Szenarien aus Abschnitt 5.3.3 untersucht und deren Ergebnisse im folgenden dargestellt. Dabei wurde die Sendeleistung einmal auf 0 dBm und einmal auf -10 dBm eingestellt. Abbildung 64 zeigt den Spannungsverlauf am Speicherkondensator beim Senden mit 0 dBm. Die linke Abbildung verdeutlicht den Unterschied durch den Einsatz des Energy Harvesters. Dieser vergrößert die Anzahl der versendeten Datenpakete von 9 auf 34. Die Energie, die durch den Harvester nachgeladen wird, deckt somit ca. 74 % des kompletten Energiebedarfs, also den Verbrauch im Aktiv- und im Schlafmodus. Dadurch wird die Betriebsdauer um den Faktor 3,8 verlängert. In der rechten Abbildung ist das Szenario zu erkennen, bei dem die Sendung nach einem vollständigen Zyklus verschickt wird. Hier reicht die geerntete Energie aus, um den Verbrauch vollständig abzudecken und zusätzlich den Kondensator von einer initialen Spannung von 2,5 V auf 3,4 V aufzuladen. Da ein weiterer Anstieg aufgrund der Kapazitätsgröße nur langsam geschieht, wurde die Untersuchung nach 20 Minuten abgebrochen. Das Ergebnis deutet darauf hin, dass sich die Applikation mit Hilfe des Harvesters auf unbegrenzte Zeit betreiben lässt. Die Periode eines vollen Zyklus beträgt in diesem Fall 17 s und beeinflusst den Verbrauchsanteil, der durch den Schlafmodus verursacht wird.

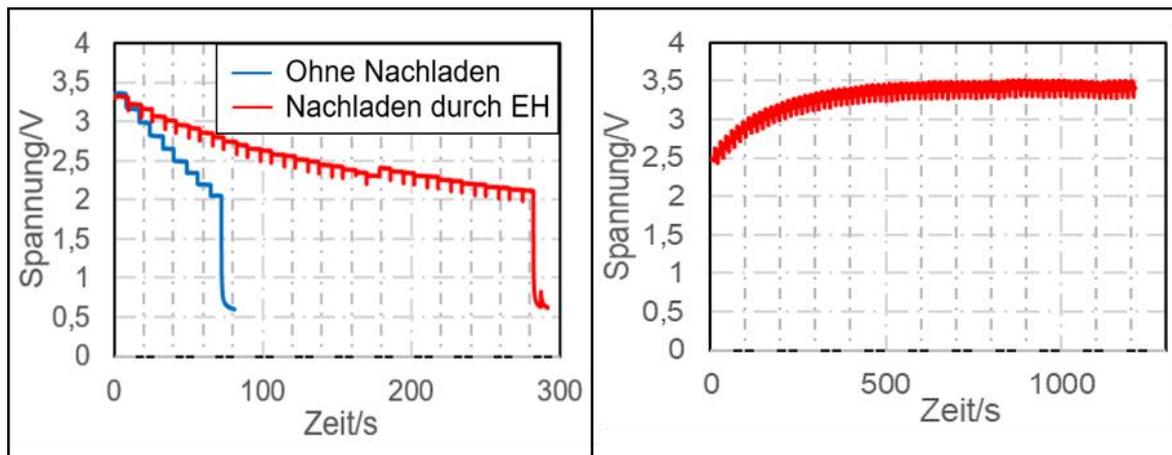


Abbildung 64: Spannungsverlauf des Speicherkondensators beim Versenden der Daten mit 0 dBm bei jedem Ereignis (links) und beim Versenden der Daten nach jedem Zyklus (rechts)

Der rechte Graph aus Abbildung 64 bestätigt die Möglichkeit eines unbegrenzten Betriebs bei einer Sendeleistung von 0 dBm, wenn die Datenübermittlung nach jedem vollen Zyklus durchgeführt wird. Für den Fall einer Datenübermittlung nach jedem Ereignis (links) reicht die Energie nicht aus, um den Verbrauch bei 0 dBm vollständig auszugleichen. Aus diesem Grund wurde die Leistung auf -10 dBm reduziert und der Versuch wiederholt. Auch hier wurde der Kondensator auf 3,3 V vorgeladen und der Sensorknoten initialisiert, bevor die externe Versorgung abgetrennt wurde.

Abbildung 65 zeigt den resultierenden Verlauf. Gegenüber dem Betrieb ohne Energy Harvester hat sich die Anzahl der möglichen Sendungen von 10 auf 216 erhöht. Somit deckt der Harvester in diesem Szenario ca. 95 % des Verbrauchs ab. Bei höheren Betriebsspannungen übersteigt der Verbrauch die nachgeladene Energie, weshalb die Spannung abnimmt. Im Bereich 2,3 V kommt es dann zu einer Stabilisierung der Spannung. Eine Vergrößerung des Verlaufs in diesem Bereich ist in Abbildung 65 (rechts) zu sehen. Bei ersten Knick in der Kurve wird der Harvester belastet und ein Datepaket versendet. Die nachgeladene Energie reicht dabei nicht vollständig aus, um diesen Verbrauch zu kompensieren. Beim zweiten Knick, also beim Entlasten des Harvesters, reicht die geerntete Energie aus, um den initialen Spannungswert vor der Belastung zu erreichen. Die Verbrauchswerte anhand dieses Spannungsverlauf betragen für 2,3 V im Schnitt 58 μ Ws pro Sendung. Die geerntete Energie ist im Schnitt 61 μ Ws. Aufgrund des Energieverbrauchs des Knotens im Schlafmodus wird der Speicher zwar langsam aber trotzdem mit der Zeit entladen bis die Spannung bei 2 V nach 216 Sendungen und einer Betriebsdauer von ca. 1750 s abbricht.

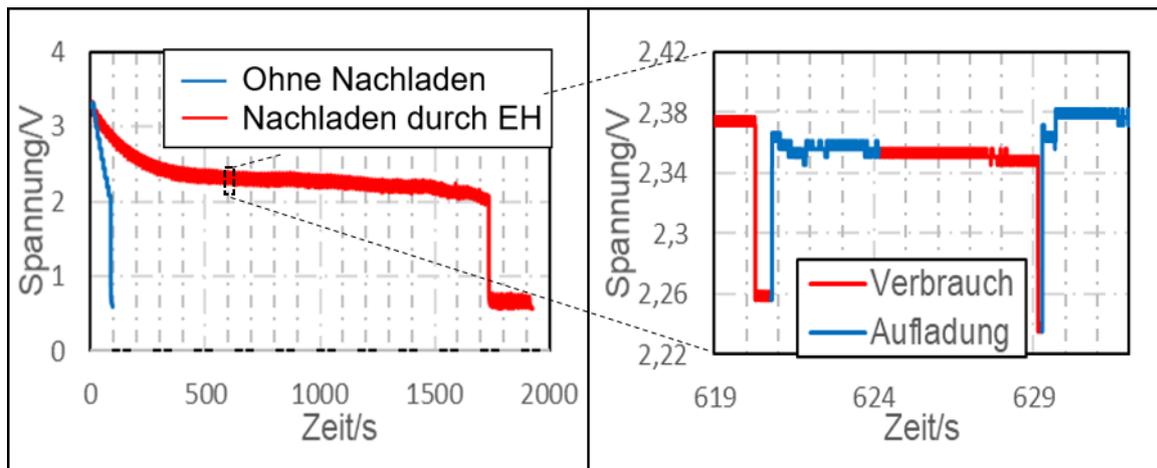


Abbildung 65: Spannungsverlauf des Speicherkondensators beim Versenden der Daten mit -10 dBm bei jedem Ereignis (links) und eine Vergrößerung des Verlaufs während einer Be- und Entlastung (rechts)

5.3.3.2. Batteriebetriebene Applikation

Batteriebetriebene Sensorknoten ermöglichen eine bestimmte Betriebsdauer bis die Batterie entladen wird und der Betrieb unterbrochen wird. Die Betriebsdauer hängt dabei neben der Speichergröße vor allem vom Energieverbrauch ab. Dieser wird von den Verbrauchswerten im Aktiv- und Schlafmodus bestimmt und von dem Tastgrad, der das Verhältnis zwischen der Dauer im Aktivmodus und der Periodendauer angibt. Im folgenden soll eine Applikation als Schrittzähler untersucht werden, der die gleiche Hardware aus Abschnitt 5.2 nutzt und nach jedem vollendeten Schritt, d.h. nach der Be- und Entlastung des Harvesters, eine Funksendung verschickt. Die mögliche Betriebsdauer dieses Schrittzählers wurde für den reinen Batteriebetrieb und für den Mischbetrieb mit dem Energy Harvester ermittelt und verglichen.

Der Gesamtverbrauch dieser Applikation, der die mögliche Betriebsdauer bestimmt, setzt sich aus dem Verbrauch im Aktivmodus und dem im Schlafmodus zusammen. Abbildung 66 verdeutlicht das Applikationsszenario. Der Stromverbrauch im Aktivmodus lässt sich mit Hilfe der Resultate aus Abschnitt 5.3.2.2 berechnen. Der Verbrauch im Schlafmodus ist aus der Dokumentation des Entwicklungsmoduls entnommen [105]. Die Dauer, die das Modul im Aktivmodus verbringt, ist anhand des Verlaufs aus Abbildung 62 (links) zu erkennen und beträgt 2,5 ms.

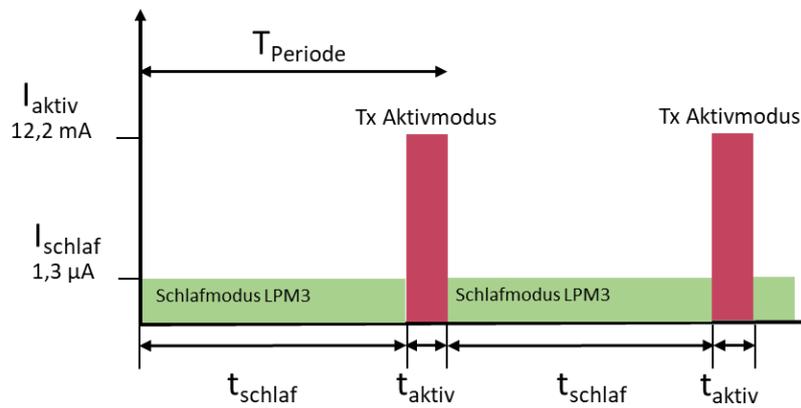


Abbildung 66: Überblick des Verbrauchsszenarios bei einer Sendung pro Zyklus

Mit einer Periodendauer T_{Periode} , in der das Endgerät nur für die Dauer von t_{aktiv} aktiv ist und die restliche Dauer im Schlafmodus verbringt, lässt sich mit Hilfe des Aktiv- und Schlafverbrauchs, I_{aktiv} und I_{schlaf} , der durchschnittliche Verbrauch $I_{\text{verbrauch}}$ nach Formel (20) berechnen.

$$I_{\text{verbrauch}} = \frac{t_{\text{aktiv}}}{T_{\text{Periode}}} * I_{\text{aktiv}} + \left(1 - \frac{t_{\text{aktiv}}}{T_{\text{Periode}}}\right) * I_{\text{schlaf}} \quad (20)$$

Unter der Voraussetzung, dass die Batterie bei Betriebsbeginn vollgeladen ist, lässt sich die Lebensdauer einer batteriebetriebenen Applikation t_{Bat} mit Hilfe der Nennkapazität C_N und dem durchschnittlichen Verbrauch nach Formel (21) bestimmen.

$$t_{\text{Bat}} = \frac{C_N}{I_{\text{verbrauch}}} \quad (21)$$

Durch die Erweiterung der Applikation mit einem Energy Harvester würde die sekundäre Batterie nachgeladen werden und dadurch die Betriebsdauer verlängert. Der durchschnittliche Ladestrom I_{Lade} innerhalb einer Periode lässt sich mit Hilfe der einzelnen Ladeströme während der Be- und Entlastung des Harvesters $I_{\text{Lade,Belastung}}$ und $I_{\text{Lade,Entlastung}}$ und der Ladedauer t_{Lade} nach folgender Formel bestimmen.

$$I_{\text{Lade}} = \frac{t_{\text{Lade}}}{T_{\text{Periode}}} * (I_{\text{Lade,Belastung}} + I_{\text{Lade,Entlastung}}) \quad (22)$$

Die Werte der einzelnen Variablen aus Formel (22) wurden im Rahmen des Versuchs aus Abschnitt 5.3.1.2 ermittelt und sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Messergebnisse beim Nachladen einer Batterie mit Hilfe eines Energy Harvesters

Variable	Wert
t_{Lade}	125 μ s
$I_{Lade,Belastung}$	85 mA
$I_{Lade,Entlastung}$	100 mA

Die durch den Harvestereinsatz verlängerte Betriebsdauer $t_{Harvester}$ lässt sich im Allgemeinen nach Formel (23) berechnen.

$$t_{Harvester} = \frac{C_N}{I_{Verbrauch} - I_{Lade}} \quad (23)$$

Da bei größeren Periodendauern der Einfluss des Verbrauchs im Schlafmodus stark zunimmt, ändert sich dementsprechend auch der Einfluss des Harvesters auf die mögliche Betriebsdauer. Abbildung 67 zeigt die Verlängerung der Lebensdauer des Sensorknotens beim Betrieb mit einem Harvester zusätzlich zur Batterie.

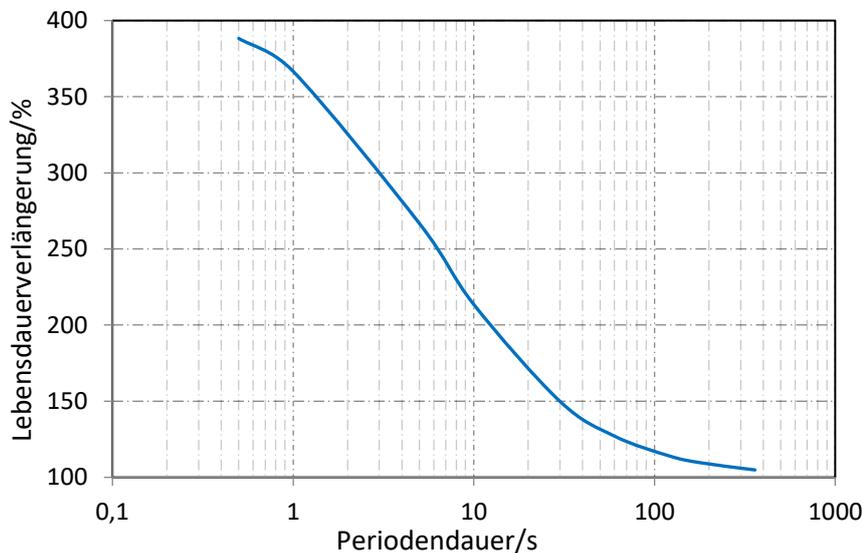


Abbildung 67: Lebensdauererlängerung durch einen Harvestereinsatz bei batteriebetriebenen Applikationen in Abhängigkeit von der Periodendauer

Die Verlängerung bezieht sich auf einen reinen Batteriebetrieb. Bei extrem kurzen Periodendauern von unter einer Sekunde verlängert der Harvester die Lebensdauer auf fast ein Vierfaches. Je höher die Periodendauer, umso höher der Verbrauch aufgrund des steigenden Schlafverbrauchs und gleichbleibender Energie, die nachgeladen wird. Bei

Periodendauern ab 360 Sekunden ist der Einfluss durch den Harvester mit wenigen Prozenten vernachlässigbar. Für Applikationen mit Periodendauern in diesem Bereich oder größer, eignet sich eine komplette Trennung der Energieversorgung in den Ruhephasen statt dem Betrieb im Schlafmodus. Dadurch entfällt der Verbrauch im Schlafmodus komplett. Der Nachteil dieser Betriebsstrategie ist der hohe Energieverbrauch bei jedem Initialisieren, sobald das Endgerät mit Energie versorgt wird. Durch den Verbrauch von ca. 710 μWs bei jedem Initialisieren, eignet sich dieser Betrieb erst ab einer Periodendauer von 180 Sekunden [106].

6. Zusammenfassung, Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde die Sinnhaftigkeit vom Energy Harvesting untersucht. Die elektrische Energie die durch solche Konzepte bereitgestellt wird, ist sehr gering und muss sinnvoll eingesetzt werden, um die Rentabilität in der Praxis zu gewähren. Die Kriterien für einen sinnvollen Einsatz schließen den Einsatz anderer Versorgungsformen, wie Batterien oder Stromnetz, aus. Aufgrund dieser Kriterien wurden zwei beispielhafte Applikationsszenarien erarbeitet und untersucht. Beide Fälle nutzen mechanische Energie, um Funksensoren elektrisch zu versorgen und einen autarken Betrieb zu ermöglichen. Für die Wandlung dieser mechanischen Energie wurde der piezoelektrische Quereffekt durch den Einsatz von PVDF-Folien genutzt. Der piezoelektrische Effekt ist aufgrund der Wartungsfreiheit, der geringen Baugrößen und der einfachen Herstellung der Wandler gegenüber anderen Effekten vorteilhaft. PVDF wurde anderen piezoelektrischen Materialien bevorzugt, da es mechanisch robuster ist und somit eine Langlebigkeit garantiert. Da das Material in Massen produziert werden kann, ist PVDF gegenüber Keramiken günstiger. Für die Kompensation der geringen Piezokoeffizienten wurden die PVDF-Folien in beiden Einsatzfällen in doppellagiger Ausführung mehrfach gewickelt, um das aktive Volumen zu vergrößern.

Im ersten Fall werden die PVDF-Wickel in Rohrsystemen eingebaut, um einen Teil der kinetischen Strömungsenergie in elektrische zu wandeln. Mit dieser elektrischen Energie sollen kleine Sensorsysteme im Rohrinernen autark betrieben werden. Die Rohrleitungen sind oft für mehrere Jahre oder Jahrzehnte begraben oder eingemauert und somit unzugänglich. Dadurch ist der Einsatz von Batterien aufgrund der Austausch- und Wartungsarbeiten unwirtschaftlich. Ein Netzanschluss ist nicht immer zugänglich oder zugelassen, weshalb die Kriterien für den Einsatz von Energy Harvestern erfüllt sind. Um die Rentabilität dieses Harvestingkonzepts zu ermitteln, wurden Prototypen experimentell in Wind- und Wasserströmungen getestet. Es wurde ein ringförmiger Störkörper im Rohr eingesetzt, der für eine dynamische Beanspruchung der Folien mit Hilfe der induzierten Wirbel sorgt. Eine ausreichende mechanische Beanspruchung der Lagen ist für die Energiewandlung ausschlaggebend. Um diese Beanspruchung zu ermöglichen, wurden unterschiedliche Fixierungsformen der Folien im Rohr experimentell untersucht. Aufgrund der unterschiedlichen Mediumdichte, eignen sich unterschiedliche Fixierungsformen für den Einsatz in Luft und Wasser. Neben der Fixierungsform wurde auch die Anzahl der Windungen

und die elektrische Konfiguration der PVDF-Lagen untersucht. Im Wasser erwies sich die Reduktion der Windungsanzahl als vorteilhaft. Bei größeren Windungszahlen wird aufgrund des größeren Volumens der Wickel träge und bei gleichbleibenden Strömungseigenschaften weniger mechanisch beansprucht. Wickel mit PVDF-Lagen, die elektrisch in Serie konfiguriert sind, wandelten im Durchschnitt deutlich mehr Energie bei gleichen Strömungsbedingungen um. Im Rahmen der Tests war die maximale elektrische Leistung an einer angepassten ohmschen Last 540 nW mit einem Wickel mit vier Windungen in einer Luftströmung mit einer Geschwindigkeit von 7 m/s. Die Effektivspannung betrug dabei 1,4 V. Im Wasser konnten 530 nW mit einem Wickel mit drei Windungen und einer Strömungsgeschwindigkeit von 0,68 m/s erreicht werden. Eine Effektivspannung von 1,1 V wurde dabei aufgezeichnet.

Der zweite Einsatzfall für die PVDF-Wickel nutzt mechanische Druckimpulse, um ebenso elektrische Energie für autarke Sensorknoten bereitzustellen. Diese Druckimpulse können durch die Bewegung von Menschen oder Gütern verursacht werden. Eine Vielzahl der Sensoren kann genutzt werden, um die Lokalisierung der Personen oder Güter zu ermöglichen. Dadurch lässt sich beispielsweise eine effiziente Gebäudeautomatisierung oder bessere Planung im Logistikbereich ermöglichen. Da diese Applikation nur durch den Einsatz von vielen Sensoren, die teilweise verstreut und mobil sein müssen, effektiv ist, ist auch hier der Einsatz von typischen Versorgungsquellen unpraktisch. Weiterhin kann ein piezoelektrischer Harvester applikationsabhängig auch die Funktion des Sensors übernehmen und reduziert dadurch zusätzlich die Systemkomponenten. Auch hier wurden unterschiedliche Prototypenkonfigurationen unter praxisnahen Bedingungen im Labor experimentell untersucht. Hierfür wurden die PVDF-Wickel mit Hilfe einer pneumatischen Pressvorrichtung mechanisch belastet. Um die vertikale Kraft für die Nutzung des Quereffektes zu übersetzen, wurde ein Scharnier in den Wickeln eingelegt. Beim Belasten dieser Scharniere werden sie aufgeklappt, wodurch sich der Wickelumfang vergrößert und die piezoelektrischen Lagen gedehnt werden. Nach dem Ende des Druckimpulses ziehen sich die Lagen aufgrund der Federkraft wieder in den ungedehnten Zustand zusammen und das Scharnier kehrt in seinen Ursprung zurück. Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Scharnierdesign erstellt. Das konzipierte Scharnier ist aus POM und wurde erfolgreich mit Hilfe von Spritzgussverfahren hergestellt. Die neuen Designmaßnahmen und Dimensionen ermöglichen einen Betrieb mit minimaler Reibung und garantieren die Rückkehr in den Ursprung und somit die dynamische Belastung der Wickel. Die Dimensionen wurden so ausgelegt, dass die Dehnung der PVDF-Folien die elastische Grenze des Materials nicht überschreitet. Für die Charakterisierung der Wandlungseffizienz wurden Wickel mit

unterschiedlichen Windungszahlen untersucht. Dabei wurde auch der Einfluss der mechanischen Eingangsenergie untersucht, indem die Druckkräfte variiert wurden. Neben der steigenden elektrischen Energie mit zunehmenden Kräften, zeigte sich weiterhin, dass für eine gegebene mechanische Belastung, Wickel mit weniger Windungen eine höhere Wandlungseffizienz aufweisen. Da diese jedoch bei geringeren Kräften ihre maximale Dehnung erreichen, werden überschüssige Kräfte nicht genutzt. In der Praxis soll daher in Abhängigkeit von den zu erwartenden Kräften die Konfiguration gewählt werden, die die geringste Anzahl an Windungen aufweist und trotzdem den Kraftbereich abdeckt bevor die maximale Dehnung erreicht wird. Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wandelten Wickel mit drei Windungen die meiste Energie pro Druckimpuls. Im Schnitt lieferten diese 3,7 mWs bei einer Kraft von 640 N. Die Amplitude der Spannung erreichte dabei mehrere hundert Volt.

Das Langzeitverhalten dieses Harvestingkonzepts wurde anhand von beschleunigten Alterungstests untersucht. Das Resultat dieser Untersuchungen deutet auf einen Rückgang der Wandlungseffizienz in Abhängigkeit von der Anzahl der Belastungszyklen. Bei etwa sieben Millionen Zyklen ist mit einem Abfall der Effektivspannung auf die Hälfte zu rechnen, was einen Rückgang in der Leistung auf ein Viertel entspricht. Der Rückgang ist unter anderem auf eine suboptimale Kontaktierung der Elektroden zurückzuführen. Für einen kommerziellen Einsatz dieser Harvester sind an dieser Stelle weiterführende Untersuchungen notwendig.

Um die Energie des Wandlers zu regulieren und zu speichern, wurde eine Energiemanagementschaltung implementiert und getestet. Anders als bei den Harvesterschaltungen für piezoelektrische Wandler aus der Literatur, erwies sich hier eine Peak Detektor Schaltung, aufgrund der sporadischen Natur der Druckimpulse, als effizienteste Variante. In dem der Speicherkondensator bis zum maximalen Aufbau der Harvesterspannung von der Quelle getrennt bleibt, konnte mit dieser Schaltung eine Effizienz von 63 % bezogen auf die Energie, die in einer reinen ohmschen Last umgesetzt wurde, erreicht werden.

Alternativ zu dem Konzept mit gewickelter mehrlagiger Folie, wurde ein einfacheres Konzept für den Einsatz für Druckimpulse untersucht. Durch eine erhöhte Aufspannung einer einzelnen beidseitig metallisierten PVDF-Folie wird bei vertikaler Krafteinwirkung eine Dehnung erzeugt und Energie gewandelt. Untersuchungen in Abhängigkeit von der Foliendimension und den mechanischen Dehnungen deuten auf eine ähnliche Energiedichte bei gleicher

Dehnung hin. Aufgrund des einfacheren Aufbaus, der hohen Energiedichte und der geringeren Belastungskraft, ist dieser Aufbau vielversprechend und in zukünftigen Forschungsarbeiten näher zu betrachten.

Gegenüber der Energy Harvester und deren gewandelten Energie stehen die Sensorapplikationen und deren Energiebedarf. Damit ein Energy Harvester in der Praxis eingesetzt wird, muss vor allem die gewandelte Energie einen signifikanten Anteil des Energiebedarfs vom Sensor decken, sodass ein Mehrwert entsteht. Um das zu prüfen, wurde eine Sensorapplikation entwickelt und analysiert. Hierfür wurde ein Belegungssensor entwickelt, der einen von zwei möglichen Zuständen erfasst und per Funk überträgt. Das schaltungstechnische Design, die eingesetzte Hardware sowie die Programmierung des μCs wurde auf ultra-low-power optimiert. Der gesamte Verbrauch des Sensorknotens wurde im Rahmen der Tests im Schnitt mit $58 \mu\text{Ws}$ pro Sendung bei einer Betriebsspannung von $2,3 \text{ V}$ gemessen. Dabei wurde der Sensorknoten über einen vorgeladenen Speicherkondensator versorgt, der von einem Druckwandler nachgeladen wurde. Der PVDF-Wickel mit fünf Windungen konnte bei einer Belastung mit 400 N im Schnitt eine Energie von $61 \mu\text{Ws}$ pro Impuls im Speicher nachladen. Somit ist der Harvester in der Lage, die Einsatzdauer des Sensorknotens signifikant zu verlängern. Die Nutzung von Energy Harvestern in Verbindung mit Akkumulatoren wurde ebenso untersucht. Die Akkumulatoren bieten den Vorteil einer höheren Energiedichte und geringere Leckströme, weisen jedoch eine schlechtere Effizienz beim Nachladen durch den Harvester auf. Theoretische Berechnungen für diesen Fall ergaben, dass der Harvester die Einsatzdauer des Sensors bei Applikationen mit einer Periodendauer unter einer Sekunde auf fast das vierfache verlängern würde. Mit steigender Periodendauer, wächst der Anteil des Energieverbrauchs im Schlafmodus und die nachgeladene Energie vom Harvester verliert an Signifikanz.

Anhand der Erkenntnisse dieser Arbeit ist eine kritische Betrachtung über Energy Harvester und deren Einsatz notwendig. Die Untersuchungen über die Abhängigkeit der Wandlungseffizienz von der Anzahl der Windungen deutet darauf hin, dass das Wickeln der PVDF-Folie unvorteilhaft ist. Für Harvester in strömenden Medien waren die gewandelten Energien zu gering, um eine praktische Applikation zu betreiben. Neben der geringen Effektivspannung, die bei herkömmlichen Gleichrichteransätzen die Vorwärtsspannung der Dioden nicht übersteigt, ist auch der erzeugte elektrische Strom zu gering, um die Nutzung üblicher Boost-Schaltungen zu ermöglichen. Höhere Effektivspannungen wären mit einfacheren flaggenähnlichen Konzepten erdenklich, die bei gleichen Strömungsbedingungen stärker beansprucht werden. Allgemein ist der Einsatz von Energy Harvestern in

geschlossenen Rohrsystemen zu hinterfragen. Da die Funksensoren ihre Daten an einem nahegelegenen Empfänger senden müssen, ist die Wahrscheinlichkeit eines zugänglichen Stromnetzes sehr groß. Das bietet alternative Versorgungsmöglichkeiten für Sensoren in geschlossenen Rohrsystemen. Einer dieser Alternativen ist die induktive Energieübertragung, die in diesem Fall die gleichen Vorteile des Energy Harvesters bieten könnten. Diese Möglichkeit sollte in weiteren Arbeiten näher untersucht werden.

Energy Harvesting zur Aufnahme von Druckimpulsen haben sich dagegen als deutlich effektiver erwiesen, wobei die Rentabilität stark von der praktischen Applikation und deren Anforderungen, wie Energiebedarf und Periodendauer, abhängt. Für Applikationen mit höherem Energiebedarf, können mehrere PVDF-Wickel parallel eingesetzt werden. Eine Verbesserung der Wandlungseffizienz wäre mit dem Umstieg auf metallisierter PVDF-Folie realisierbar, denn dadurch verringern sich nämlich parasitäre Kapazitäten, die durch Lufteinschlüsse zwischen den aktiven Lagen und den Elektroden entstehen. In zukünftigen Forschungsarbeiten müsste diese Annahme validiert werden. Weiterhin sollte die Harvesterschaltung näher untersucht werden. Der Einsatz von kleineren Zwischenkondensatoren und DC-DC-Wandler vor dem Speicherkondensator könnte die Gesamteffizienz beim Laden erhöhen im Vergleich zum direkten Laden eines großen Speicherkondensators, der deutlich außerhalb des optimalen Bereichs liegt.

Literaturverzeichnis

- [1] International Electrotechnical Commission *et al.*, "Internet of Things: Wireless Sensor Networks," *Int. Electron. Commision*, no. December, pp. 1–78, 2014.
- [2] F. K. Shaikh and S. Zeadally, "Energy harvesting in wireless sensor networks: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 55, pp. 1041–1054, 2016.
- [3] T. J. Kazmierski and S. Beeby, *Energy harvesting systems*. Springer, 2014.
- [4] S. Boisseau, G. Despesse, and B. A. Seddik, "Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting," pp. 1–39, 2012.
- [5] H. Kawai, "The piezoelectricity of poly (vinylidene fluoride)," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 8, no. 7, p. 975, 1969.
- [6] K. P. Shih, S. S. Wang, H. C. Chen, and P. H. Yang, "COLLECT: Collaborative event detection and tracking in wireless heterogeneous sensor networks," *Comput. Commun.*, vol. 31, no. 14, pp. 3124–3136, 2008.
- [7] S. H. Lee, S. Lee, H. Song, and H. S. Lee, "Wireless sensor network design for tactical military applications : Remote large-scale environments," in *MILCOM 2009 - 2009 IEEE Military Communications Conference*, 2009, pp. 1–7.
- [8] N. E. DuToit, B. L. Wardle, and S. G. Kim, "Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters," *Integr. Ferroelectr.*, vol. 71, pp. 121–160, 2005.
- [9] G. Tuna and R. Das, "Wireless Sensor Network-Based Health Monitoring System for the Elderly and Disabled," *Int. J. Comput. Networks Appl.*, vol. 2, no. 6, pp. 247–253, 2015.
- [10] N. Schwesinger, C. Dehne, and F. Adler, *Lehrbuch Mikrosystemtechnik: Anwendungen, Grundlagen, Materialien und Herstellung von Mikrosystemen*. Oldenbourg Verlag, 2009.
- [11] L. Ruan, X. Yao, Y. Chang, L. Zhou, G. Qin, and X. Zhang, "Properties and Applications of

- the β Phase Poly(vinylidene fluoride),” pp. 1–27, 2018.
- [12] S. Priya and D. J. Inman, *Energy harvesting technologies*, vol. 21. Springer, 2009.
- [13] Y. Xin *et al.*, “The use of polyvinylidene fluoride (PVDF) films as sensors for vibration measurement: A brief review,” *Ferroelectrics*, vol. 502, no. 1, pp. 28–42, Sep. 2016.
- [14] P. Romano, F. Viola, F. Viola, P. Romano, R. Miceli, and G. Acciari, “Harvesting rainfall energy by means of piezoelectric transducer Harvesting rainfall energy by means of piezoelectric transducer,” no. April 2014, pp. 20–23, 2013.
- [15] D. Vatansever, R. L. Hadimani, T. Shah, and E. Siores, “An investigation of energy harvesting from renewable sources with PVDF and PZT,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 5, 2011.
- [16] S. Li, J. Yuan, and H. Lipson, “Ambient wind energy harvesting using cross-flow fluttering,” *J. Appl. Phys.*, vol. 109, no. 2, pp. 107–110, 2011.
- [17] D. Wang, H. Pham, C. Chao, and J. M. Chen, “A Piezoelectric Energy Harvester Based on Pressure Fluctuations in Kármán Vortex Street,” *World Renew. Energy Congr.*, pp. 1456–1463, 2011.
- [18] A. Delnavaz and J. Voix, “Flexible piezoelectric energy harvesting from jaw movements,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 23, no. 10, 2014.
- [19] J. Granstrom, J. Feenstra, H. A. Sodano, and K. Farinholt, “Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps,” *Smart Mater. Struct.*, vol. 16, no. 5, pp. 1810–1820, 2007.
- [20] W. C. Turkenburg and A. Faaij, “Renewable energy technologies,” UNDP/UNDESA/WEC: Energy and the Challenge of Sustainability. World Energy Assessment. New York: UNDP, 219-272, 2000.
- [21] D. Hoffmann, A. Willmann, R. Göpfert, P. Becker, B. Folkmer, and Y. Manoli, “Energy harvesting from fluid flow in water pipelines for smart metering applications,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 476, no. 1, 2013.
- [22] G. W. Taylor, “Energy Harvesting Eel,” OCEAN POWER TECHNOLOGIES INC TRENTON NJ, 1998.

-
- [23] J. J. Allen and A. J. Smits, "Energy harvesting eel," *J. Fluids Struct.*, vol. 15, no. 3–4, pp. 629–640, 2001.
- [24] S. Pobering, S. Ebermeyer, and N. Schwesinger, "Generation of electrical energy using short piezoelectric cantilevers in flowing media," p. 728807, 2009.
- [25] H. Lee, S. Sherrit, L. Tosi, P. Walkemeyer, and T. Colonius, "Piezoelectric Energy Harvesting in Internal Fluid Flow," *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 26039–26062, 2015.
- [26] X. Gao, W.-H. Shih, and W. Y. Shih, "Flow Energy Harvesting Using Piezoelectric Cantilevers With Cylindrical Extension," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 3, pp. 1116–1118, 2013.
- [27] C. Sun, J. Shi, D. J. Bayerl, and X. Wang, "PVDF microbelts for harvesting energy from respiration," *Energy Environ. Sci.*, vol. 4, no. 11, pp. 4508–4512, 2011.
- [28] N. Fadhil, D. Saber, and P. Patra, "Energy harvesting using nano scale dual layers PVDF film for blood artery," *9th Annu. Conf. Long Isl. Syst. Appl. Technol. LISAT 2013*, pp. 2–7, 2013.
- [29] S. Abrol and D. Chhabra, "Harvesting piezoelectricity using different structures by utilizing fluid flow interactions," *Int. J. R&D Eng. Sci. Manag.*, vol. 5, no. 7, pp. 24–36, 2017.
- [30] R. Cross, "Standing, walking, running, and jumping on a force plate," *Am. J. Phys.*, vol. 67, no. 4, pp. 304–309, 1999.
- [31] T. Starner, "Human-powered-wearable-computing," *IBM Syst. J.*, vol. 35, no. 3.4, pp. 618–629, 1996.
- [32] N. S. Shenck and J. A. Paradiso, "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics," *IEEE Micro*, vol. 21, no. 3, pp. 30–42, 2001.
- [33] J. Zhao and Z. You, "A Shoe-Embedded Piezoelectric Energy Harvester for Wearable Sensors," *Sensors*, vol. 14, no. 7, pp. 12497–12510, 2014.
- [34] H. Kalantarian and M. Sarrafzadeh, "Pedometers without batteries: An energy harvesting shoe," *IEEE Sens. J.*, vol. 16, no. 23, pp. 8314–8321, 2016.

- [35] J. Kymissis, C. Kendall, and J. Paradiso, "Power harvesting in shoes," *Proc. 2nd IEEE Int. Symp. Wearable Comput.*, pp. 132–140, 1998.
- [36] H. O. C. Houg, S. Parasuraman, and M. K. A. A. Khan, "Energy harvesting from human locomotion," in *India Conference (INDICON), 2013 Annual IEEE*, 2013, pp. 1–6.
- [37] "Pavegen." [Online]. Available: www.pavegen.com/. [Accessed: 29-Aug-2018].
- [38] "Energy Floors." [Online]. Available: <https://www.energy-floors.com/>. [Accessed: 29-Aug-2018].
- [39] N. B. Seow, Zhen Liang, Chen, Song Tao, Khairudin, "An investigation into energy generating tiles : Pavegen Title," *UBC Soc. Ecol. Econ. Dev. Stud. Student Reports*, 2011.
- [40] M. Smit, "Human-powered small-scale generation system for a sustainable dance club," no. July, pp. 20–26, 2011.
- [41] F. Duarte, A. Ferreira, and J. Champalimaud, "Waynergy Vehicles—An Innovative Pavement Energy Harvest System," in *2nd International Congress on Energy Efficiency and Energy Related Materials (ENEFM2014)*, 2015, pp. 343–348.
- [42] M. Liu *et al.*, "Design, simulation and experiment of a novel high efficiency energy harvesting paver," *Appl. Energy*, vol. 212, no. February, pp. 966–975, 2018.
- [43] O. Puscasu, N. Counsell, M. R. Herfatmanesh, R. Peace, J. Patsavellas, and R. Day, "Powering Lights with Piezoelectric Energy-Harvesting Floors," *Energy Technol.*, vol. 6, no. 5, pp. 906–916, 2018.
- [44] N. Sharpes, D. Vučković, and S. Priya, "Floor Tile Energy Harvester for Self-Powered Wireless Occupancy Sensing," *Energy Harvest. Syst.*, vol. 3, no. 1, pp. 43–60, 2016.
- [45] T. Nakajima, K. Okaya, K. Ohta, T. Furukawa, and S. Okamura, "Performance of piezoelectric power generation of multilayered poly(vinylidene fluoride) under high mechanical strain," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 50, no. 9 PART 3, 2011.
- [46] Y. Lin and C. Liu, "Smart Pipe : Nanosensors for Monitoring Water Quantity and Quality in Public Water Systems," 2009.
- [47] N. Metje, D. N. Chapman, D. Cheneler, M. Ward, and A. M. Thomas, "Smart pipes-

- instrumented water pipes, can this be made a reality?," *Sensors*, vol. 11, no. 8, pp. 7455–7475, 2011.
- [48] M. Klingajay and T. Jitson, "Real-time Laser Monitoring based on Pipe Detective Operation," *World Acad. Sci. Eng. Technoogy*, vol. 2, no. 6, pp. 114–119, 2008.
- [49] S. K. Sinha and M. A. Knight, "Intelligent system for condition monitoring of underground pipelines," *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 42–53, 2004.
- [50] Y. Gao, M. J. Brennan, P. F. Joseph, J. M. Muggleton, and O. Hunaidi, "On the selection of acoustic/vibration sensors for leak detection in plastic water pipes," *J. Sound Vib.*, vol. 283, no. 3–5, pp. 927–941, 2005.
- [51] M. R. Nakhkash, M. and Mahmood-Zadeh, "Water leak detection using ground penetrating radar," *Gr. Penetrating Radar, 2004. GPR 2004. Proc. Tenth Int. Conf.*, pp. 525–528, 2004.
- [52] T. P. Lambrou, C. C. Anastasiou, and C. G. Panayiotou, "A nephelometric turbidity system for monitoring residential drinking water quality," *Lect. Notes Inst. Comput. Sci. Soc. Telecommun. Eng.*, vol. 29 LNICST, pp. 43–55, 2010.
- [53] Hatch, "GuardianBlue Early Warning System." [Online]. Available: <https://www.hach.com/event-detection-and-security/guardianblue-early-warning-system/family?productCategoryId=35547627778>. [Accessed: 04-Sep-2018].
- [54] F. Regan *et al.*, "A demonstration of wireless sensing for long term monitoring of water quality," *2009 IEEE 34th Conf. Local Comput. Networks*, no. October, pp. 819–825, 2009.
- [55] T. P. Lambrou, C. C. Anastasiou, C. G. Panayiotou, and M. M. Polycarpou, "A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems," *IEEE Sens. J.*, vol. 14, no. 8, pp. 2765–2772, 2014.
- [56] A. Sadeghioon, N. Metje, D. Chapman, and C. Anthony, "SmartPipes: Smart Wireless Sensor Networks for Leak Detection in Water Pipelines," *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 3, no. 1, pp. 64–78, 2014.
- [57] A. Bahga and V. Madisetti, *Internet of Things: A hands-on approach*. Vpt, 2014.

- [58] Energy Information Administration, "Commercial buildings energy consumption survey," 2003.
- [59] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, "A review on buildings energy consumption information," *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008.
- [60] V. Garg and N. K. Bansal, "Smart occupancy sensors to reduce energy consumption," *Energy Build.*, 2000.
- [61] C. de Bakker, M. Aries, H. Kort, and A. Rosemann, "Occupancy-based lighting control in open-plan office spaces: A state-of-the-art review," *Build. Environ.*, vol. 112, pp. 308–321, 2017.
- [62] X. Wang, T. Tjalkens, and J. P. Linnartz, "Smart office lighting control using occupancy sensors," *Proc. 2017 IEEE 14th Int. Conf. Networking, Sens. Control. ICNSC 2017*, pp. 453–458, 2017.
- [63] B. Dong *et al.*, "An information technology enabled sustainability test-bed (ITEST) for occupancy detection through an environmental sensing network," *Energy Build.*, vol. 42, no. 7, pp. 1038–1046, 2010.
- [64] S. Meyn, A. Surana, Y. Lin, and S. Oggianu, "A sensor-utility-network method for estimation of occupancy distribution in buildings," *Proc. IEEE*, pp. 1494–1500, 2009.
- [65] J. Hutchins, A. Ihler, and P. Smyth, "Modeling count data from multiple sensors: a building occupancy model," in *Computational Advances in Multi-Sensor Adaptive Processing, 2007. CAMPSAP 2007. 2nd IEEE International Workshop on*, 2007, pp. 241–244.
- [66] G. Diraco, A. Leone, and P. Siciliano, "People occupancy detection and profiling with 3D depth sensors for building energy management," *Energy Build.*, vol. 92, pp. 246–266, 2015.
- [67] N. Li, G. Calis, and B. Becerik-Gerber, "Measuring and monitoring occupancy with an RFID based system for demand-driven HVAC operations," *Autom. Constr.*, vol. 24, pp. 89–99, 2012.
- [68] G. Ye *et al.*, "Energy Harvesting from Water Distribution Systems," *Energy Eng.* © *Asce*, vol. 138, no. May, pp. 7–17, 2012.

- [69] H. D. Akaydin, "Piezoelectric Energy Harvesting From Fluid Flow," vol. 4, no. 1, pp. 23–36, 2012.
- [70] Wikipedia, "Water turbine." [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Water_turbine. [Accessed: 06-Sep-2018].
- [71] G. W. Taylor, J. R. Burns, S. M. Kammann, W. B. Powers, and T. R. Welsh, "The energy harvesting Eel: A small subsurface ocean/river power generator," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 539–547, 2001.
- [72] A. Betz, "Das Maximum der theoretisch möglichen Ausnutzung des Windes durch Windmotoren," *Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen*, vol. 20, 1920.
- [73] N. W. Hagood and A. von Flotow, "Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks," *J. Sound Vib.*, vol. 146, no. 2, pp. 243–268, Apr. 1991.
- [74] D. H. Turnbull, M. D. Sherar, and F. S. Foster, "Determination of electromechanical coupling coefficients in transducer materials with high mechanical losses," *IEEE 1988 Ultrason. Symp. Proceedings.*, pp. 631–634, 1988.
- [75] H. D. Akaydin, N. Elvin, and Y. Andreopoulos, "Energy harvesting from highly unsteady fluid flows using piezoelectric materials," *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 21, no. 13, pp. 1263–1278, 2010.
- [76] E. Bischur and N. Schwesinger, "Energy harvesting in floors," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 1, pp. 45–55, 2010.
- [77] R. Finsterbusch and N. Schwesinger (Hrsg.), "Untersuchung von Energiewandlung und möglichen Ausfallmechanismen von PVDF- Folienwickelgeneratoren," Technische Universität München, 2014.
- [78] R. Mitry and N. Schwesinger (Hrsg.), "Charakterisieren von flexiblen Energy Harvestern in Wasserrohrsysteme," Technische Universität München, 2016.
- [79] Dürholdt, "Leistungstabellen für Rohrleitungen." [Online]. Available: <https://www.duerholdt.de/?id=232>. [Accessed: 19-Sep-2018].
- [80] S. Keddis and N. Schwesinger, "Powering In-pipe Wireless Sensors Using Flexible

- Piezoelectric Microgenerators," *Energy Harvest. Syst.*, vol. 3, no. 13, pp. 223–228, 2016.
- [81] T. Von Kármán, "Über den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Körper in einer Flüssigkeit erfährt," *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Math. Klasse*, vol. 1911, pp. 509–517, 1911.
- [82] S. Keddis, R. Mitry and N. Schwesinger, „Piezoelectric flow harvesting for in-pipe metering systems," in *Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XII (Vol. 10595, p. 105950P)*. International Society for Optics and Photonics, 2018.
- [83] Maschinenbau-Wissen, "Grundlagen der Biegebelastung." [Online]. Available: <http://www.maschinenbau-wissen.de/skript3/mechanik/balken-biegung/209-biegung-berechnen>. [Accessed: 25-Sep-2018].
- [84] E. Bischur, "Energy Harvesting auf Basis monoaxial gereckter PVDF Folie und der Technologie von Folienkondensatoren," 2016.
- [85] KUREHA Corporation, "Piezo film properties." [Online]. Available: <http://www.piezofilms.com/products.html>. [Accessed: 17-Oct-2018].
- [86] Amcor, "Aluminum Capacitor Foil." [Online]. Available: <https://www.amcor.com/product-listing/capacitor-foil>. [Accessed: 23-Oct-2018].
- [87] N. Schwesinger and S. Keddis, "Piezoelectric pressure harvester for autonomous sensors," in *Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0 (Vol. 10973, p. 1097304)*. International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [88] Steinerfilm GmbH & CO. KG, "Metallisierte BOPP Folie." [Online]. Available: <https://www.steinerfilm.de/unsere-produkte/steinerfilm-p/>. [Accessed: 10-Jan-2019].
- [89] S. Priya, H. Song, Y. Zhou, R. Varghese, and A. Chopra, "A Review on Piezoelectric Energy Harvesting : Materials , Methods , and Circuits," 2017.
- [90] S. S. Hashemi, M. Sawan, and Y. Savaria, "A High-Ef fi ciency Low-Voltage CMOS Recti fi er for Harvesting Energy in Implantable Devices," vol. 6, no. 4, pp. 326–335, 2012.
- [91] C. Peters, J. Handwerker, D. Maurath, and Y. Manoli, "An Ultra-Low-Voltage Active

- Rectifier for Energy Harvesting Applications," *Proc. 2010 IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 889–892, 2010.
- [92] J. Dicken, P. D. Mitcheson, S. Member, I. Stoianov, E. M. Yeatman, and S. Member, "Power-Extraction Circuits for Piezoelectric Energy Harvesters in Miniature and Low-Power Applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 11, pp. 4514–4529, 2012.
- [93] J. Sankman, S. Member, D. Ma, and S. Member, "A 12- μ W to 1.1-mW AIM Piezoelectric Energy Harvester for Time-Varying Vibrations With 450-nA I_Q," vol. 30, no. 2, pp. 632–643, 2015.
- [94] M. Shim, S. Member, J. Kim, and S. Member, "Self-Powered 30 μ W to 10 mW Piezoelectric Energy Harvesting System With 9.09 ms / V Maximum Power Point Tracking Time," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 50, no. 10, pp. 2367–2379, 2015.
- [95] L. Wu, X. Do, S. Lee, and D. S. Ha, "A Self-Powered and Optimal SSHI Circuit Integrated With an Active Rectifier for Piezoelectric Energy Harvesting," vol. 64, no. 3, pp. 537–549, 2017.
- [96] M. Dini, A. Romani, M. Filippi, and M. Tartagni, "A Nanopower Synchronous Charge Extractor IC for Low-Voltage Piezoelectric Energy Harvesting With Residual Charge Inversion," vol. 31, no. 2, pp. 1263–1274, 2016.
- [97] J. Liang, W. Liao, and S. Member, "Improved Design and Analysis of Self-Powered Synchronized Switch Interface Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 59, no. 4, pp. 1950–1960, 2012.
- [98] S. Pang and J. Kan, "An Improved Self-Powered P-SSHI Circuit for Piezoelectric Energy Harvesting," *J. Comput. Inf. Syst.*, 2015.
- [99] F. Kühne, Claus; Riemenschneider, "Welche Ultra-Low-Power-Mikrocontroller sind energieeffizient?," 2015. [Online]. Available: <https://www.elektroniknet.de/design-elektronik/halbleiter/welche-ultra-low-power-mikrocontroller-sind-energieeffizient-120997-Seite-13.html>. [Accessed: 13-Dec-2018].
- [100] Texas Instruments, "eZ430-RF2500 Development Tool User's Guide," 2015. [Online]. Available: www.ti.com/lit/ug/slau227f/slau227f.pdf. [Accessed: 27-Feb-2019].

- [101] C. Müller and N. Schwesinger (Hrsg.), "Topologien und Protokolle drahtloser Netzwerke für Energy-Harvesting Applikationen," 2017.
- [102] T. M. Jung, "Vergleich aktueller LPWAN-Technologien im Internet der Dinge unter Einbindung von," 2017.
- [103] Texas Instruments, "CC2500 - Low-Cost-Low-Power 2.4GHz RF Transceiver." [Online]. Available: www.ti.com/lit/ds/swrs040c/swrs040c.pdf. [Accessed: 27-Feb-2019].
- [104] S. Keddis, R. Mitry, and N. Schwesinger, "Self-powered Wireless Occupancy Detector based on Flexible Piezoelectric Film," *Proc. 3rd Int. Conf. Energy Harvest. Storage, Transf.*, pp. 1–8, 2019.
- [105] M. Morales and Z. Shivers, "Wireless Sensor Monitor Using the eZ430-RF2500," 2011.
- [106] R. Mitry and N. Schwesinger (Hrsg.), "Untersuchung der Eignung von Energy Harvestern für autarke Funkapplikationen," 2019.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über mögliche Energiequellen und Wandlungseffekte für Energy Harvesting	2
Abbildung 2: Typische Energiequellen für Energy Harvester und deren Leistungsdichten [4]	3
Abbildung 3: Konzept (links) und Prototyp (rechts) zum Wandeln von Strömungsenergien in Wasserrohren [21].....	9
Abbildung 4: PZT-Strömungsharvester zum Versorgen von Sensoren in Ölquellen [25].....	10
Abbildung 5: Testaufbau zum Untersuchung von Strömungsharvestern aufgrund menschlicher Atmung [27]	11
Abbildung 6: Verschiedene Schuhharvester-Designs von Zhao [33] (oben links), Paradiso [32] (unten links), Kalantarian [34] (oben rechts) und Kymissis [35] (unten rechts)	13
Abbildung 7: Smart-Floor Konzepte von <i>Pavegen</i> (links) inkl. Explosionsdarstellung des elektromagnetischen Generators [37] und Energy-Floors (rechts) [38].....	14
Abbildung 8: Energy Harvesting Bodenbelag mit verbesserter Effizienz durch Schwungrad [42]	15
Abbildung 9: Energy Harvesting Stufen für Notfallbeleuchtung (oben rechts) mit Hilfe von PZT-Scheiben (oben links) die mechanisch vorbelastet sind (unten) [43].....	16
Abbildung 10: PVDF-Wickel mit mehreren Windungen (links) für Energy Harvesting in Bodenplatten (rechts) [45].....	17
Abbildung 11: Konzept (links) und Prototyp (rechts) eines echtzeitfähigen Wasserqualitätsüberwachungssystems [55].....	19
Abbildung 12: Mögliche Generatoren für Hydroenergie auf elektromagnetischer Basis (links) [70] und piezoelektrischer Basis (rechts) [71]	24
Abbildung 13: Wickelprinzip zur Vergrößerung der aktiven Fläche. Doppelschichtausführung (rechts) zur Vermeidung von Kurzschlüssen bei einfacher Ausführung (links)	26
Abbildung 14: Prinzipskizze des vollständigen Harvestersystems	27
Abbildung 15: Vorrichtung zum manuellen Fertigen von mehrlagigen PVDF-Wickeln [78].	28
Abbildung 16: Vorrichtung zum Verschweißen der Folien a) quer miteinander und b) entlang des Umfangs	29
Abbildung 17: Hauptschritte bei der Herstellung der prototypischen Strömungsharvester	30

Abbildung 18: Messaufbau für die Charakterisierung der PVDF-Wickel im Windkanal mit Hilfe eines Oszilloskops	33
Abbildung 19: Aufbau des Messplatzes für Wasseruntersuchungen.....	35
Abbildung 20: Untersuchung des Strömungsverhalten mit Hilfe eines Tintenstrahls bei 10 % (a), 50 % (b) und 100 % (c) der Pumpleistung.....	36
Abbildung 21: Visualisierung der Karmannschen Wirbelstrasse von Jürgen Wagner (CC BY 4.0 DE).....	37
Abbildung 22: Prinzipskizze der einzelnen untersuchten Fixierungsformen im Rohr.....	38
Abbildung 23: Wickelfixierung im Wasserrohr mit Hilfe einer Federspange.....	39
Abbildung 24: Verlauf der mechanischen Spannung in einem Biegebalken [83].....	40
Abbildung 25: Unterschiedliche elektrische Konfiguraton der PVDF-Lagen	41
Abbildung 26: Leerlaufspannungsverlauf eines Wickels in "Aal"-Form getestet im Windkanal	43
Abbildung 27: Leerlaufspannungsverlauf eines Wickels in Stiefelform getestet im Windkanal	43
Abbildung 28: Leerlaufspannungsverlauf eines Wickels in L-Form getestet im Windkanal..	44
Abbildung 29: Leerlaufspannungsverlauf eines Wickels in umgekehrter "Aal"-Form getestet im Windkanal	45
Abbildung 30: Leistungsanpassung eines umgekehrten "Aals" im Wind mit 4 Windungen bei opimalem Abstand und freier Länge	46
Abbildung 31: Einschaltgeschwindigkeiten für umgekehrte "Aals" in Wasser (rot) und Wind (blau)	47
Abbildung 32: Leistungsanpassung eines umgekehrten "Aals" im Wasser mit 5 Windungen	48
Abbildung 33: Leistungsanpassung einer Ellipsenform im Wasser mit 4 Windungen	48
Abbildung 34: Leistungsanpassung beim direkten Vergleich eines Wickels mit 4 Windungen in umgekehrter "Aal"-Form und Ellipsenform.....	49
Abbildung 35: Vergleich der unterschiedlichen PVDF-Konfigurationen, um eine Ladungsneutralisierung zu vermeiden	50
Abbildung 36: Abhängigkeit der gewandelten Leistung von der Windungszahl und PVDF-Konfiguration für ellipsenförmige Wickel im Wasser.....	51
Abbildung 37: Störkörper aus Gießharz mit flexibler Leiterplatine und Micro-USB-Schnittstelle	53
Abbildung 38: Explosionsdarstellung des Aufnahmesystems des Strömungsharvesters im Rohr.....	54

Abbildung 39: Wandlung der vertikalen Kraft zur Nutzung des Quereffekts mit Hilfe eines eingelegten Scharniers [84]	57
Abbildung 40: Scharniere aus POM für die Kraftübertragung. a) Ursprüngliches Design und b) verstärktes Design mit besserer Kompatibilität zum Spritzgussverfahren	58
Abbildung 41: Designzeichnung des Scharniers und Darstellung des Aufklappens	59
Abbildung 42: Prinzipskizze der beschichteten Kunststoffe Elektroden und die Maßnahme für deren Kontaktierung	61
Abbildung 43: Messplatzaufbau zum Untersuchen der Druckharvester [84].....	62
Abbildung 44: Spannungsverlauf der Wickel mit unterschiedlichen Windungszahlen über einen Gesamtwiderstand von 5 M Ω	64
Abbildung 45: Energie pro Puls in Abhängigkeit von der Belastungskraft für Wickel mit unterschiedlichen Windungszahlen während der Belastung (oben) und der Entlastung (unten)	66
Abbildung 46: Verlauf der Standardabweichung in Abhängigkeit von der Belastungskraft für die verschiedenen Wickelserien während der Belastung (oben) und der Entlastung (unten)	69
Abbildung 47: Deutliche Verformung eines Scharniers bei Dauerbelastung (links) im Vergleich zu einem unbenutzten (rechts)	71
Abbildung 48: Verlauf der Effektivspannung im Dauerbetrieb mit 2 Hz	72
Abbildung 49: Extrapolierte logarithmische Trendlinie aus dem gefiltertem Spannungsverlauf.....	72
Abbildung 50: Bausteine einer Energiemanagement-Zwischenschaltung	73
Abbildung 51: Modell der Energiemanagement-Schaltung mit Peak Detector	76
Abbildung 52: Simulierter Spannungsverlauf während dem Aufladen des Speicherkondensators nach einem Belastungsimpuls.....	77
Abbildung 53: Vergleich der extrahierten Energie mit Hilfe verschiedener Schaltungen in Abhängigkeit der Speicherkapazität.....	79
Abbildung 54: Alternativer Aufbau zum Dehnen von PVDF-Folien und Harvesten durch Schrittenenergien	80
Abbildung 55: Abhängigkeit der Energie von dem Folienvolumen für verschiedene Folienbreiten	82
Abbildung 56: Energieverlauf in Abhängigkeit der Dehnung für unterschiedliche Folienbreiten	84
Abbildung 57: Vereinfachte Architektur eines Sensorknotens [95]	86

Abbildung 58: Implementierung von Triggersignalen für die Zustandserkennung mit Hilfe des Energy Harvesters und pull-up Widerständen [104].....	91
Abbildung 59: Verlauf der GPIO Spannungen während dem Belasten (links) und dem Entlasten (rechts).....	91
Abbildung 60: Nachgeladene Energie beim Be- und Entlasten des Harvesters in Abhängigkeit vom Ladezustand des 220 μ F Speicherkondensators.....	94
Abbildung 61: Nachgeladene Energie in einem 1 mAh Dünnschicht-Akku während dem Be- und Entlasten in Abhängigkeit der Kapazität des Pufferkondensators	95
Abbildung 62: Stromverbrauch des Endgeräts bei der Detektion eines Ereignisses gemessen als Spannung über einen 8 Ω Shunt-Widerstand für eine Sendeleistung von 0 dBm und -10 dBm (links). Resultierender Energieverbrauch während dem Senden in Abhängigkeit von der Betriebsspannung (rechts).....	97
Abbildung 63: Aufbau des Gesamtsystems eines harvesterbetriebenen drahtlosen Belegungsdetektor [104].....	97
Abbildung 64: Spannungsverlauf des Speicherkondensators beim Versenden der Daten mit 0 dBm bei jedem Ereignis (links) und beim Versenden der Daten nach jedem Zyklus (rechts)	99
Abbildung 65: Spannungsverlauf des Speicherkondensators beim Versenden der Daten mit -10 dBm bei jedem Ereignis (links) und eine Vergrößerung des Verlaufs während einer Be- und Entlastung (rechts).....	100
Abbildung 66: Überblick des Verbrauchsszenarios bei einer Sendung pro Zyklus	101
Abbildung 67: Lebensdauererweiterung durch einen Harvestereinsatz bei batteriebetriebenen Applikationen in Abhängigkeit von der Periodendauer	102

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ermittelte Durchflussrate und Strömungsgeschwindigkeit des Messplatzes.....	36
Tabelle 2: Auswirkung des Wickelabstands vom Störkörper auf die mechanische Beanspruchung.....	45
Tabelle 3: Leistungsdichte bezogen auf die aktiven Volumina bei paralleler und serieller Anordnung der Harvester	52
Tabelle 4: Dimensionen des Scharniers	60
Tabelle 5: Windungszahlabhängige Querschnittsflächen und die korrespondierende Kraft für maximale Dehnung.....	70
Tabelle 6: Versuchsmatrix für die Energie in Abhängigkeit von der Folienfläche bei einer Dehnung von 2 %.....	81
Tabelle 7: Vergleich einiger Funkprotokolle und deren Verbrauch bei der Datenkommunikation [98],[99]	89
Tabelle 8: Messergebnisse beim Nachladen einer Batterie mit Hilfe eines Energy Harvesters	102

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

Symbole

Symbol	Definition	Einheit
A	Rohrquerschnittsfläche	m ²
a	Schenkellänge des Scharniers	m
A _{Qeff}	Effektiver Querschnitt aus allen Folienlagen	m ²
b	Elektrodenbreite	m
b _s	Scharnierbreite	m
b1	Abstand zwischen Übergang und Gelenkmittelpunkt	m
b2	Breite der Gelenkaufnahmeabschnitte	m
b3	Aussparung zwischen den Gelenkaufnahmeabschnitten	m
b _{Al}	Breite der Aluminiumfolie	m
b _F	Folienbreite beim Druckharvester	m
b _{PVDF}	Breite der PVDF-Folie	m
C	Kapazität des Kondensators	F
C ₀	Kapazität der Folienanordnung	F
C1-C2	Kondensatoren 1 - 2	F
c _B	Betz-Zahl	-
C _N	Nennkapazität des Akkumulators	Ah
D	Dielektrische Verschiebung	As/m ²
d	Elektrodenabstand	m
D1-D4	Dioden 1 - 4	-
d _{Al}	Dicke der Aluminiumfolie	m
d _{ges}	Summe der Dicken einer PVDF- und einer PP-Folie	m
d _{ij}	piezoelektrischer Ladungskoeffizient	C/N
d _{PVDF}	Dicke der PVDF-Folie	m
D _S	Durchmesser der Stifaufnahme	m
E	Elektrische Energie	Ws
E _D	Gesamtenergieverbrauch der Detektorschaltung	Ws
E _E	Energieverbrauch des Endgeräts im Aktivmodus	Ws
E _F	Elektrische Feldstärke	V/m
E _{ges}	Kombiniertes Elastizitätsmodul	N/m ²
E _{modul}	Elastizitätsmodul	N/m ²
E _p	Energieverbrauch durch Pull-up Widerstände	Ws
E _S	Energieverbrauch der Detektorschaltung ohne Pull-up Widerstände	Ws
F _{max}	Kraft für maximale Dehnung	N
h	Höhe des Scharniers im aufgeklappten Zustand	m
h1	Höhe der Stifaufnahme	m

Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

h_2	Höhenunterschied zwischen Schenkellänge und Übergang	m
h_3	Höhenunterschied zwischen Übergang und Gelenkaufnahme	m
i	Index des Messpunkts	-
I_{KS}	Kurzschlussstrom	A
I_{Lade}	Durchschnittlicher Ladestrom des Harvesters pro Periode	A
$I_{Lade, Belastung}$	Ladestrom während der Belastung des Harvesters	A
$I_{Lade, Entlastung}$	Ladestrom während der Entlastung des Harvesters	A
I_{Schlaf}	Stromverbrauch im Schlafmodus	A
$I_{Verbrauch}$	Durchschnittlicher Stromverbrauch	A
k	elektromechanischer Kopplungskoeffizient	-
l	Elektrodenlänge	m
L_1	Spule 1	H
l_R	Rechtcklänge eines flachgedrückten Wickels	m
l_s	Länge zwischen Scharnierstützpunkten	m
$M1-M2$	MOSFETs 1 - 2	-
n	Anzahl der Messpunkte	-
n_w	Anzahl der Wickelwindungen	-
P_i	Momentanleistung des jeweiligen Messpunkts	W
P_L	Elektrische Leistung bei Lastanpassung	W
P_{max}	Verlustleistung	W
Q	Elektrische Ladung	C
$Q1-Q2$	Bipolartransistoren 1 - 2	-
r_1	Radius der Schenkelabrundung	m
R_1	Widerstand	Ω
r_2	Radius der Gelenkaufnahme	m
R_2	Widerstand	Ω
r_3	Übergangsradius	m
R_{ges}	Gesamtwiderstand des Spannungsteilers	Ω
R_L	Scheinwiderstand	Ω
R_p	Pull-up Widerstände	Ω
R_s	Shunt-Widerstand	Ω
t_{aktiv}	Dauer des Endgeräts im Aktivmodus	s
t_{an}	Dauer der MOSFETs in eingeschaltetem Zustand	s
t_{Bat}	Referenzlebensdauer mit reiner Akkuversorgung	s
$t_{Harvester}$	Verlängerte Lebensdauer durch den Einsatz des Harvesters	s
t_{Lade}	Ladedauer	s
$T_{Periode}$	Periodendauer aus Aktiv- und Schlafzeit	s
t_{Tx}	Dauer des Endgeräts im Aktivmodus	s
U_{CC}	Betriebsspannung des Mikrocontrollers	V
U_{eff}	Effektivspannung	V
U_L	Lastspannung	V
U_{LL}	Leerlaufspannung	V
u_{max}	Maximaler Umfang des Wickels	m
U_{Mi}	Gemessener Spannungswert des jeweiligen Messpunkts	V

v_1	Fluidgeschwindigkeit vor dem Störkörper	m/s
v_2	Fluidgeschwindigkeit nach dem Störkörper	m/s
v_∞	Fluidgeschwindigkeit	m/s
V_{aktiv}	Aktiver Volumenanteil des Wickels	m^3
\underline{Z}	Komplexe Impedanz	Ω
\underline{Z}_C	Eingangsimpedanz des Kondensators	Ω
Δt	Dauer zwischen zwei Messpunkten	s
ϵ	Dielektrische Leitfähigkeit	As/Vm
ϵ_0	Dielektrizitätskonstante für Vakuum	As/Vm
ϵ_{max}	Maximale Dehnung	-
ϵ_r	Relative Dielektrizitätskonstante	-
σ	Mechanische Spannung	N/m ²
τ	Zeitkonstante	s
ω	Kreisfrequenz	1/s
ρ	Dichte	kg/m ³

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
μC	Mikrocontroller
3D	Dreidimensional
Al	Aluminium
ASCE	American Society of Civil Engineers
BPM	Beats per minute
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DC-DC	Gleichstromwandler
EH	Energy Harvester
E-Modul	Elastizitätsmodul
EU	Europäische Union
FTCAP	Firma Fischer und Tausche Capacitors
GPIO	General Purpose Input Output
IoT	Internet of Things
IP68	Klassifizierung für Schutz gegen Berührung und dauerndes Untertauchen in Wasser
LDPE	Polyethylen mit geringer Dichte
LED	Light Emitting Diode
Li-Ion Akku	Lithium Ionen Akkumulator
MEMS	Micro-Electrical-Mechanical-Systems
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracking
OP-AMP	Operationsverstärker
PIR	Passiv Infrarot

POM	Polyoxymethylen
PVDF	Polyvinylidendifluorid
PVDF-MB	Polyvinylidendifluorid Mikrogürtel
PZT	Blei Zirkonat Titanat
RFID	Radio-Frequency Identification
RIE	Reaktives Ionen Ätzen
SECE	Synchronous Electric Charge Extraction
SMD	Surface Mounted Devices
SSHI	Synchronized Switch Harvesting on Inductor
USB	Universal Serial Bus

Liste der Veröffentlichungen

- [1] S. Keddis and N. Schwesinger, "Polymer based harvester as power source for wireless sensors in pipes," in 26th International Conference on Adaptive Structures and Technologies, ICAST 2015, 2015.
- [2] S. Keddis and N. Schwesinger, "Power source for wireless sensors in pipes," in Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2016, 2016, vol. 9799, p. 979916.
- [3] S. Keddis and N. Schwesinger, "Powering In-pipe Wireless Sensors Using Flexible Piezoelectric Microgenerators," Energy Harvest. Syst., vol. 3, no. 13, pp. 223–228, 2016.
- [4] M. Bobinger, S. Hinterleuthner, M. Becherer, S. Keddis, N. Schwesinger, and P. Lugli, "Energy harvesting from ambient light using PVDF with highly conductive and transparent silver nanowire/PEDOT: PSS hybride electrodes," in 2017 IEEE 17th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), 2017, pp. 426–429.
- [5] S. Keddis, R. Mitry and N. Schwesinger, „Piezoelectric flow harvesting for in-pipe metering systems," in Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems XII (Vol. 10595, p. 105950P). International Society for Optics and Photonics, 2018.
- [6] M. Bobinger et al., "Light and pressure sensors based on PVDF with sprayed and transparent electrodes for self-powered wireless sensor nodes," IEEE Sensors Journal, vol. 19, no. 3, pp. 1114–1126, 2018.
- [7] N. Schwesinger and S. Keddis, "Piezoelectric pressure harvester for autonomous sensors," in Smart Structures and NDE for Energy Systems and Industry 4.0 (Vol. 10973, p. 1097304). International Society for Optics and Photonics, 2019.
- [8] S. Keddis, R. Mitry, and N. Schwesinger, "Self-powered Wireless Occupancy Detector based on Flexible Piezoelectric Film," Proc. 3rd Int. Conf. Energy Harvest. Storage, Transf., pp. 1–8, 2019.