



Technische Universität München

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Professur für Mikrostrukturierte Mechatronische Systeme

**Energy Harvesting auf Basis monoaxial gereckter PVDF-Folie  
und der Technologie von Folienkondensatoren**

Enrico Pablo Marino Bischur

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. Franz Kreupl

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. Norbert Schwesinger
2. Prof. Dr. Paolo Lugli

Die Dissertation wurde am 18.01.2016 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik am  
03.08.2016 angenommen.





## **Abstract**

Based on uniaxially oriented PVDF-film and film capacitor technology both an electrostatic and a piezoelectric energy harvester were developed and investigated. The theory of energy conversion was derived by means of analytical equations and calculated by numerical methods. The practical investigation confirmed the functionality of both energy harvesters and revealed parasitic effects. Both energy harvesters had their advantages, compared to each other and to other systems.



## **Zusammenfassung**

Auf Basis monoaxial gereckter PVDF-Folie und der Folienkondensator-technologie wurden ein elektrostatischer und ein piezoelektrischer Energy Harvester entwickelt und untersucht. Die Grundlagen der Energiewandlung wurden mittels analytischer Gleichungen hergeleitet und mittels numerischer Verfahren berechnet. Die praktische Untersuchung bestätigte die Funktionalität beider Energiewandler und deckte parasitäre Effekte auf. Die jeweiligen Vorzüge wurden im Vergleich zueinander und zu anderen Systemen erkennbar.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Energy Harvesting . . . . .	1
1.2	Ziele dieser Arbeit . . . . .	4
1.3	Gliederung . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1	Elektrostatische Energy Harvester . . . . .	7
2.2	Polymere Piezoelektrische Energy Harvester . . . . .	9
2.3	Energy Harvester für Druckkräfte . . . . .	10
<b>3</b>	<b>Energy Harvesting mit PVDF-Folie</b>	<b>15</b>
3.1	Anwendungsbereiche . . . . .	15
3.2	Charakterisierung von PVDF . . . . .	16
3.2.1	Allgemeine Eigenschaften . . . . .	17
3.2.2	Polarisierung und Ladungsspeicherung . . . . .	21
3.2.3	Piezoelektrische Eigenschaften . . . . .	24
3.3	Aufbau der Energy Harvesting Systeme . . . . .	25
3.3.1	Aufbau des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems . . . . .	26
3.3.2	Aufbau des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Theoretischer Hintergrund</b>	<b>31</b>
4.1	Definition des Anwendungsbereichs . . . . .	31
4.2	Elektrostatisches Energy Harvesting System . . . . .	33
4.2.1	Grundlagen der elektrostatischen Energiewandlung . . . . .	33
4.2.2	Modellierung des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems . . . . .	35
4.2.3	Simulation . . . . .	41



4.3	Piezoelektrisches Energy Harvesting System . . . . .	44
4.3.1	Grundlagen der piezoelektrischen Energiewandlung . . . . .	45
4.3.2	Modellierung des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems . . . . .	50
4.3.3	Simulation . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Experimenteller Aufbau und Messverfahren</b>	<b>63</b>
5.1	Praktische Umsetzung der Energy Harvesting Systeme . . . . .	63
5.1.1	Praktische Umsetzung des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems . . . . .	63
5.1.2	Praktische Umsetzung des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems . . . . .	65
5.2	Messverfahren . . . . .	67
5.2.1	Messverfahren für den Elektrostatischen Energy Harvester .	69
5.2.2	Messverfahren für den Piezoelektrischen Energy Harvester .	70
<b>6</b>	<b>Messergebnisse und Diskussion</b>	<b>71</b>
6.1	Elektrostatisches Energy Harvesting System . . . . .	71
6.1.1	Messergebnisse des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems . . . . .	71
6.1.2	Diskussion des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems	75
6.2	Piezoelektrisches Energy Harvesting System . . . . .	80
6.2.1	Messergebnisse des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems . . . . .	80
6.2.2	Diskussion des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems	86
6.3	Vergleich . . . . .	90
6.3.1	Vergleich des Elektrostatischen und Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems . . . . .	90
6.3.2	Vergleich mit anderen Energy Harvesting Systems . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Fazit</b>	<b>95</b>
<b>8</b>	<b>Ausblick</b>	<b>97</b>
	<b>Literatur</b>	<b>99</b>

<b>Veröffentlichungen</b>	<b>107</b>
<b>Symbol- und Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>109</b>



# 1 Einleitung

Ein Forschungsbereich, der in den letzten Jahren große Beachtung findet, beschäftigt sich mit der Nutzung von Energiequellen, die normalerweise ungenutzt in der Umwelt vorhanden sind. Als Fachbegriff für diesen Bereich hat sich „Energy Harvesting“ oder „Energy Scavenging“ etabliert, was mit „Energieernten“ übersetzt werden kann [3]. Damit soll ausgedrückt werden, dass in der Umwelt vorhandene Energie nur mehr abgegriffen und umgewandelt werden muss.

## 1.1 Energy Harvesting

Ein Ziel des Energy Harvesting ist es energieautarke Systeme zu realisieren. Diese energieautarken Systeme können beispielsweise kleine Sensorknoten sein, die dauerhaft ihre Umgebung überwachen und dabei mittels entsprechender Wandler ihren Energiebedarf aus der Umgebungsenergie decken.

Die Energiequellen, die hierbei genutzt werden, können bereits in der Natur vorkommen oder durch menschliche Aktivitäten entstehen. Als Energiequellen können Wärme (Temperaturgradienten, Temperaturänderungen), Strahlung (Sonnenlicht, Wärmestrahlung, künstliche Strahlungsquellen) oder mechanische Energie (Vibrationen, Dehnungen/Stauchungen, strömende Medien) genutzt werden.

Um aus diesen Energiequellen elektrische Energie zu generieren, bedarf es geeigneter Wandler. Prinzipiell können dafür alle physikalischen Effekte genutzt werden, die eine Wandlung in elektrische Energie ermöglichen. Wandler, die eine direkte Umwandlung von Wärmeenergie in elektrische Energie ermöglichen, sind der pyro- und der thermoelektrische Effekt. Die Energiewandlung mittel des pyroelektrischen Effekts benötigt eine Temperaturänderung, wohingegen der thermoelektrische Effekt bei Kontakt von zwei unterschiedlichen Leitermaterialien auftritt, deren Enden

einen Temperaturgradienten aufweisen. Eine direkte Wandlung von Strahlung kann über den photovoltaischen Effekt mittels Solarzellen erfolgen. Durch die Erwärmung von Materialien mittels Strahlungsenergie kann auch eine Wandlung mittels pyro- oder thermoelektrischen Effekts erfolgen [55].

Physikalische Effekte, die eine Wandlung mechanischer in elektrische Energie ermöglichen, sind der elektromagnetische, der elektrostatische und der piezoelektrische Effekt. Abbildung 1.1 zeigt für diese Effekte mögliche Anordnungen, die zur Energiewandlung genutzt werden können. Die elektromagnetische Energiewand-

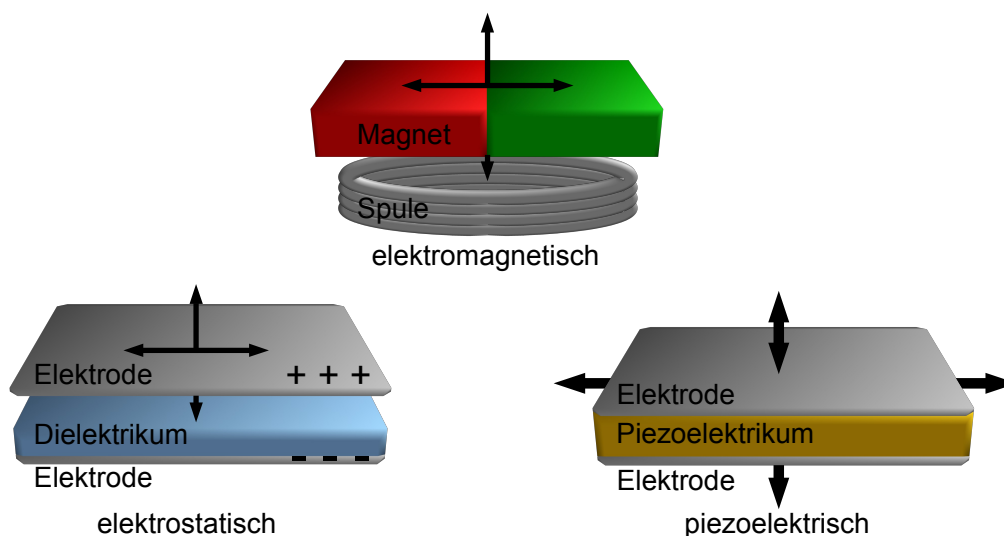


Abbildung 1.1: Wandlerprinzipien zur Umwandlung mechanischer in elektrische Energie

lung kann mit Hilfe einer Leiterschleife, die einem veränderlichen magnetischen Fluss ausgesetzt ist, erreicht werden. Der veränderliche magnetische Fluss bewirkt eine Induktionsspannung an den Enden einer offenen Leiterschleife. Werden ein Permanentmagnet und eine Leiterschleife relativ zueinander bewegt, wird somit mechanische in elektrische Energie gewandelt [55].

Eine Wandlung mechanischer in elektrische Energie mit einem elektrostatischen Wandler erfolgt durch die Kapazitätsänderung einer geladenen Kondensatoranordnung. Wird durch eine mechanische Kraft die effektive Kondensatorfläche oder der Abstand beider Kondensatorflächen geändert, ändert sich die Kapazität einer Kondensatoranordnung. Befinden sich die Kondensatorflächen bei der Kapazitätsänderung auf unterschiedlichem elektrischen Potential, bewirkt dies eine Änderung der

in diesem System gespeicherten elektrischen Energie. Die Kondensatoranordnung kann grundsätzlich durch zwei unterschiedliche Methoden geladen werden; durch eine externe Spannungsquelle oder durch die Platzierung eines Elektrets zwischen den beiden Kondensatorflächen. Wird eine Spannungsquelle verwendet, so wird das System im Zustand maximaler Kapazität geladen. Wird anschließend die Kapazität verkleinert, so erhöht sich die in diesem System gespeicherte elektrische Energie, die als Spannung an den Elektroden abgegriffen werden kann. Wird ein Elektret als dielektrisches Material zwischen beide Kondensatorflächen platziert, so wird in diesem Kondensator Ladung durch das permanente elektrische Feld des Elektrets induziert.

Ein Elektret kann als elektrostatische Entsprechung eines Permanentmagneten gesehen werden. Es weist ein externes elektrisches Feld auf, das durch die gespeicherten Ladungen erzeugt wird, so lange diese nicht von anderen beweglichen Ladungen kompensiert werden [22]. Es ist ein dielektrisches Material, das elektrische Ladung über einen sehr langen Zeitraum – quasi-permanent – speichern kann. Der Begriff quasi-permanent drückt aus, dass die Ladung länger als die Anwendungsdauer anhält. Diese Ladungen können „reale“ Ladungen, wie Oberflächen oder Volumenladungen, eine remanente Polarisation oder eine Mischung aus beiden sein [57]. Die „realen“ Ladungen sind oft in Schichten in einem dielektrischen Material angeordnet und können sowohl positiv als auch negativ sein. Eine remanente Polarisation hingegen entsteht durch gleich ausgerichtete Dipole in dielektrischen Materialien [57].

Wird ein Elektret nach Heaviside [22] als ein dielektrisches Material mit mindestens einer Art von permanenter elektrischer Ladung definiert, dann zählen piezoelektrische Materialien ebenfalls zu den Elektreten [57].

In einem piezoelektrischen Material können durch mechanische Belastung (Stauchung oder Dehnung) elektrische Ladungen verschoben werden. Dabei kann an zwei Elektroden auf der Materialoberfläche eine elektrische Spannung gemessen werden. Dieser direkte piezoelektrische Effekt wird, abhängig von der Ausrichtung der inneren Dipole zur Richtung der mechanischen Belastung, in Längs-, Quer- und Schereffekt unterschieden. Wird an die Elektroden ein elektrischer Verbraucher angeschlossen, kann in diesem bei einer Änderung der mechanischen Belastung elektrische Energie umgesetzt werden. Der piezoelektrische Effekt kann in spezifischen dielektrischen kristallinen, polykristallinen und polymeren Materialien beobachtet

werden [55].

### **1.2 Ziele dieser Arbeit**

In dieser Arbeit wurde eine neuartige Methode entwickelt, die sowohl die elektrostatische als auch die piezoelektrische Energiewandlung mit einer viellagigen Folienanordnung ermöglicht. Das polymere Folienmaterial, das für diese Methode verwendet wurde, ist monoaxial gereckte Polyvinylidenfluorid-Folie (PVDF-Folie). Durch den Einsatz von Folienmaterialien ist es möglich, robuste Energy Harvester basierend auf der Technologie von Folienwickelkondensatoren zu realisieren. Diese Technologie ermöglicht es, viellagige Systeme auf sehr einfache Art und Weise herzustellen. Diese Systeme wurden für eine Energiewandlung von dynamischen Druckkräften konzipiert, die beispielsweise in Bodenflächen auftreten.

Das Elektrostatische Energy Harvesting System benötigt durch den gewählten Aufbau mit einer PVDF-Folie keine externe Spannungsquelle, da die Folie selbst ein Elektret-Material ist. Die Energiewandlung erfolgt hierbei durch die Änderung des Abstands zwischen den einzelnen Folienlagen, wenn eine dynamische Druckkraft auf den Folienwickel einwirkt.

Der Piezoelektrische Energy Harvester nutzt den piezoelektrischen Quereffekt der PVDF-Folie in Richtung der monoaxialen Verstreckung. In den Folienwickelkondensator ist ein Scharnierelement eingebracht, das unter den dynamischen Druckkräften seinen Umfang ändert. Hierdurch wird auch der Umfang des Folienwickelkondensators vergrößert bzw. verkleinert, wodurch eine dynamische Dehnung der PVDF-Folie hervorgerufen wird. Durch die Dehnung der PVDF-Folie erfolgt eine Polarisation und damit eine Änderung des Oberflächenladungszustandes, d.h. es wird ein Potenzialunterschied auf entsprechenden Elektroden generiert.

### **1.3 Gliederung**

Ausgehend vom Stand der Technik werden die Eigenschaften der PVDF-Folie, der Aufbau der Energy Harvesting Systeme und deren Anwendungsbereich erläutert. Im theoretischen Hintergrund wird der Anwendungsbereich näher charakterisiert. Weiterhin werden jeweils die Grundlagen und die mathematische Modellierung für das Elektrostatische und das Piezoelektrische Energy Harvesting System

vorgenommen. Mithilfe der mathematischen Modellierung wird deren Verhalten anschließend theoretisch berechnet. Ausgehend von diesen Ergebnissen wird der experimentelle Aufbau und das Messverfahren erläutert, um eine experimentelle Überprüfung durchzuführen. Die unter Laborbedingungen durchgeführte Messreihen werden vorgestellt und anschließend ausgewertet. In der Diskussion der experimentellen Ergebnisse erfolgt sodann ein Vergleich mit den theoretischen Ergebnissen und es wird gezeigt, dass durch eine empirische Anpassung der mathematischen Modellierungen das Verhalten der Testsysteme korrekt beschrieben werden kann. Nach einer Gegenüberstellung des Elektrostatischen und des Piezoelektrischen Systems wird nach einer Zusammenfassung ein Ausblick auf zukünftige Weiterentwicklungen gegeben.





## 2 Stand der Technik

Der Bereich des Energy Harvesting lässt sich auf unterschiedliche Art und Weise untergliedern. So kann nach der Art der Energiequelle (mechanische, thermische oder Strahlungsenergie), der physikalischen Wandlung (thermoelektrisch, pyroelektrisch, elektromagnetisch, elektrostatisch oder piezoelektrisch) und des Einsatzzwecks (z.B. Infrastrukturüberwachung, Gebäudemanagement, Maschinenüberwachung, Prozessmanagement oder Erfassung von medizinischen und sonstigen Parametern bei Menschen) unterschieden werden [21][39].

Für die weitere Betrachtung sind vorwiegend Systeme relevant, die zum einen mechanische Energie wandeln und zum anderen den elektrostatischen oder piezoelektrischen Effekt mit Hilfe polymerer Materialien nutzen. Außerdem werden Konzepte betrachtet, die die Energie von dynamischen Druckkräften umwandeln, die durch die menschliche Fortbewegung in Schuhen oder Fußböden auftreten.

### 2.1 Elektrostatische Energy Harvester

Verschiedene polymere Folien wie beispielsweise Polyethylenterephthalat (PET), Polytetrafluorethylen (PTFE) oder Polyvinylidenfluorid (PVDF) können mittels spezieller Verfahren (siehe Kapitel 3.2.2) quasi permanent elektrisch geladen werden und daher als Elektretmaterial verwendet werden. Wird in einem elektrostatischen Energy Harvester ein solches Elektret verwendet, so kann dieses ohne externe elektrische Spannungsquelle mechanische in elektrische Energie wandeln. Bereits eine Veröffentlichung von Jefimenko [28] von 1978 beschreibt einen Generator, der elektrostatische Energiewandlung mit einem Elektretmaterial als Spannungsquelle nutzt.

Ein System, das eine Abstandsänderung zwischen Elektret und Elektrode nutzt, wurde von Vu-Cong und Kollegen [67] beschrieben. Dieses System wurde für die

Energiegewinnung aus der Kniebewegung beim Gehen oder Laufen konzipiert. Durch die Kniebewegung soll eine Dehnung des Systems und damit eine Kapazitätsänderung bewirkt werden. Auf einer Silikonfolie wurde hierfür als Elektret eine Folie aus Perfluor(Ethylen-Propylen) (FEP) stellenweise fixiert. Das System hatte eine Größe von  $10\text{ cm} \times 2,5\text{ cm}$ . Wenn das System mit einer Frequenz von  $1\text{ Hz}$  um  $50\%$  gedehnt wurde, konnte durch Schließen des Luftspalts zwischen Elektret- und Silikonfolie eine elektrische Leistung von  $33\text{ }\mu\text{W}$  erzeugt werden (Lastwiderstand  $99\text{ M}\Omega$ ). Ausschlaggebend für diese Leistung war das relativ große elektrische Potential der FEP-Folie ( $1000\text{ V}$ ). Eine Angabe über die notwendige mechanische Kraft, um das System zu dehnen, wurde nicht publiziert [67].

Tashiro und Kollegen [64] entwickelten ein System, das ähnlich wie Honigwaben aufgebaut war und ebenfalls eine Kapazitätsänderung durch eine Variation des Abstands nutzte. Das System musste in dieser Anwendung mit einer externen Spannungsquelle geladen werden. Zwei PET-Folien ( $5\text{ m} \times 3\text{ cm} \times 5\text{ }\mu\text{m}$ ), die einseitig metallisiert waren, wurden im Abstand von je  $5\text{ mm}$  mit doppelseitigem Klebeband verbunden. Nach jeweils 20 Klebestreifen wurden diese gefaltet und wiederum im Abstand von je  $5\text{ mm}$  fixiert. Die Anordnung wurde anschließend zwischen 2 Platten fixiert, die federnd miteinander verbunden waren. Auf der oberen Platte befand sich ein Gewicht von  $0,75\text{ kg}$ . Dieses wurde mit einer Frequenz von  $6\text{ Hz}$  zum Schwingen angeregt. Dabei konnte eine mittlere elektrische Leistung von  $36\text{ }\mu\text{W}$  erzeugt werden, wenn die Kondensatoranordnung bei maximaler Kapazität mit einer Spannung von  $45\text{ V}$  geladen wurde [64] [2].

Weitere Elektret-basierte Ansätze für elektrostatische Energy Harvester wurden von Chiu und Kollegen [9] entwickelt. Sie nutzten Elektrete aus Siliziumoxid/nitrid ( $\text{SiO}_2/\text{SiN}$ ), die auf Siliziumwafer abgeschieden wurden. Ein Siliziumwafer mit Elektretschicht wurde in  $1\text{ cm}^2$  große Stücke geschnitten, die mittels Korona-Entladung auf eine Oberflächenladungsdichte von bis zu  $13,5\frac{\text{mC}}{\text{m}^2}$  geladen werden konnten. Die  $1\text{ cm}^2$  Stücke wurden auf speziell strukturierte flexible Leiterplatten geklebt. Aus diesen Leiterplatten konnte dann durch eine Zick-Zack-Faltung ein mehrlagiges Inertialsystem ( $2\text{ cm} \times 2\text{ cm} \times 1,5\text{ cm}$ ) aufgebaut werden. Damit konnte eine Leistung von  $33\text{ }\mu\text{W}$  an einem  $20\text{ M}\Omega$  Lastwiderstand gewonnen werden. Die Anregungsfrequenz betrug  $120\text{ Hz}$  und die Beschleunigung  $4\text{ G}$  [8]. Ein weiteres System von Chiu [10] wurde als flexibler Harvester aus Polydimethylsiloxan (PDMS) zur direkten Nutzung von Deformationskräften konzipiert. Auf ein metallisiertes PDMS-Substrat

(ca. 1,5 cm x 1,5 cm) wurde ein 5  $\mu\text{m}$  dickes Parylene-C-Elektret abgeschieden. Auf diesem Substrat wurden 1 mm dicke Abstandshalter aus PDMS angebracht und die Gegenelektrode, die ebenfalls aus metallisiertem PDMS bestand, befestigt. Mit einer flächigen Druckkraft von 30 N auf das System wurde bei einer Frequenz von 20 Hz eine Leistung von 0,18  $\mu\text{W}$  an einem 1000 M $\Omega$  Widerstand generiert. Eine Übersicht der verschiedenen Systeme findet sich in Tabelle 2.1. In dieser Übersicht ist die generierte elektrische Leistung, die auf das Gesamtvolumen normierte Leistung, die Anregungsfrequenz, der Lastwiderstand und die Methode zur Aufladung der Kondensatoranordnung angegeben.

System	Leistung [ $\mu\text{W}$ ]	Leistung / Volumen [ $\frac{\mu\text{W}}{\text{cm}^3}$ ]	Frequenz [Hz]	Widerstand [M $\Omega$ ]	Aufladung des Kondensators durch
Vu-Cong et al. [67]	33	6	1	99	Elektret (FEP-Folie)
Tashiro et al. [64]	36	1,3	6	k.a.	Spannungsquelle
Chiu et al. [8]	33	5,5	120	20	Elektret (SiO <sub>2</sub> /SiN)
Chiu et al. [10]	0,18	0,27	20	1000	Elektret (Parylene-C)

Tabelle 2.1: Übersicht verschiedener elektrostatischer Energy Harvester, mit variabler Kapazität durch Abstandsänderung der Kondensatorflächen

## 2.2 Polymere Piezoelektrische Energy Harvester

Im Bereich des Energy Harvesting existieren neben den elektrostatischen Konzepten eine Vielzahl an Systemen, die auf piezoelektrischen Materialien beruhen [12] [1][48][60]. Der Großteil dieser Systeme basiert auf piezoelektrischen polykristallinen Keramiken und zumeist auf Blei-Zirkonat-Titanat (PZT). Der Hauptgrund hierfür ist der sehr hohe elektromechanische Kopplungsfaktor von PZT [58]. Allerdings existiert bei Keramiken generell das Problem des mechanischen Ausfalls, der

die maximale Leistungsgeneration und die Lebensdauer des Materials einschränkt. Da es sich bei PZT um ein keramisches Material handelt, besitzt es die damit verbundenen Eigenschaften, was sich beispielsweise in seiner Zerbrechlichkeit äußert [42][58]. Energy Harvesting mittels polymerer piezoelektrischer Materialien ist daher von Interesse aufgrund deren hoher Robustheit, Flexibilität und leichten Formbarkeit [27]. Ein piezoelektrischer Energy Harvester, bei dem PVDF-Folie zum Einsatz kam, war der „Energy Harvesting Eel“ von Taylor und Kollegen [65]. Dieser nutzte oszillierende Druckunterschiede, die hinter einem Störkörper in fließenden Gewässern entstehen können. Durch diese Druckunterschiede wurde ein Streifen PVDF-Folie in Schwingung versetzt. Die mechanische Verformung der Folie generierte mittels piezoelektrischem Effekt elektrische Energie. Ähnliche Konzepte existieren für Wind [34] oder auch, für die Energiegewinnung aus Regentropfen [19]. Ein weiterer Entwurf, der auf die piezoelektrischen Eigenschaften von PVDF setzt, wurde von Granstrom und Kollegen [18] untersucht. Das System nutzte dabei die Kraft, die beim Gehen auf die Tragegurte eines Rucksacks entstehen. Dazu wurde die PVDF-Folie in diese Tragegurte eingebaut. Durch die auftretenden Zugkräfte konnte elektrische Energie generiert werden. Mit einer sinusförmigen Zugkraft (5 Hz) von maximal 60 N an einer 2,2 cm x 18 cm x 28  $\mu$ m Folie konnte eine maximale Leistung von 3,8 mW erzeugt werden. Dieses und das von Vu-Cong [67] vorgestellte elektrostatische Konzept fallen in den Bereich des Human-Powered-Energy-Harvestings [52]. Zu diesem sind auch die im nächsten Kapitel vorgestellten Systeme zu zählen. Darunter versteht man Ansätze des Energy Harvestings, die den menschlichen Körper als Energiequelle nutzen. Hierbei liegt der Fokus auf Systemen, die auf sporadisch auftretenden Druckkräften zur Energiegewinnung basieren und als passive Systeme konzipiert sind.

### **2.3 Energy Harvester für Druckkräfte**

Druckkräfte treten durch unterschiedliche natürliche Bewegungsmuster von Menschen in verschiedenen Bereichen und Größenordnungen auf. Ein hohes Potenzial entsteht hierbei durch die menschliche Fortbewegung [61]. Die dabei auftretenden Energien können durch mobile, am Körper fixierte und durch stationäre Systeme genutzt werden.

Ein mobiler Energy Harvester, der Energie mit Hilfe einer im Schuh integrierten

PVDF-Folie umwandelt, wurde am Massachusetts Institute of Technology (MIT) von Starner und Paradiso [61] entwickelt. Das System wurde als Einlegesohle konzipiert und hatte eine Länge von 10 cm, eine Breite von ca. 8 cm und eine Dicke von 2 mm. Auf einen 1 mm starken Plastikträger wurden beidseitig je acht 28  $\mu\text{m}$  dicke PVDF-Folien geklebt und elektrisch kontaktiert. Wenn dieser Plastikträger anschließend verbogen wurde, konnte durch den piezoelektrischen Quereffekt elektrische Energie generiert werden. Dieses System produzierte bei einer Gehgeschwindigkeit von einem Schritt pro Sekunde eine Leistung von 1,3 mW an einem Lastwiderstand von 250 k $\Omega$ , also eine Energie von 1,3 mWs pro Schritt.

Basierend auf den Ergebnissen vom MIT entwarf Wang [69] ein optimiertes Konzept. Dieses bestand aus einem 3 mm dicken Plastikträger aus Nylon (Fläche 9 cm x 6 cm), auf dem beidseitig je 6 PVDF-Folien geklebt wurden, die 42  $\mu\text{m}$  dick waren. Damit konnte eine maximale elektrische Leistung von 5 mW erzeugt werden, also pro Schritt 5 mWs. Auch eine Veröffentlichung von Zhao [72] beschreibt ein aus PVDF-Folie bestehendes System, das in einen Schuh integriert wurde. Die aktive PVDF-Struktur hatte dabei eine Fläche von 5 cm x 8 cm und bestand aus 8 PVDF-Folien mit einer Dicke von je 30  $\mu\text{m}$ . Dieses mehrlagige Element wurde zwischen zwei starre Platten gespannt, die eine wellenförmige Oberfläche aufwiesen. Wurden diese Platten zusammengepresst, konnte eine Dehnung der Folie erreicht werden. Damit konnte eine elektrische Energie von 1 mWs pro Schritt bei einer Schrittfrequenz von 1 Hz generiert werden.

Zu stationären Energy Harvestern zählen beispielsweise Bodenharvester Systeme. Ein Bodenharvester, der den piezoelektrischen Effekt von einem Wickelkondensator aus PVDF nutzt, wurde von Nakajima und Kollegen [42] beschrieben. Dabei wurden Kondensatoren aus 40  $\mu\text{m}$  dicker, 1 cm breiter PVDF-Folie mit 50, 100 und 200 Wicklungen hergestellt. Der Wickeldurchmesser betrug in etwa 1 cm. Der Bodenaufbau, in dem dieser Wickelkondensator integriert wurde, hatte eine Fläche von 50 cm x 50 cm. Mittels eines Hebelsystems wurde eine Druckkraft auf den Wickelkondensator ausgeübt. So wurden die Kondensatoren mit einer Druckkraft von 1000 N belastet, die auf eine Fläche von 1 cm<sup>2</sup> wirkte. Der Wickelkondensator generierte bei 50 Wicklungen eine Energie von 12  $\mu\text{Ws}$ , bei 100 Wicklungen 30  $\mu\text{Ws}$  und bei 200 Wicklungen 45  $\mu\text{Ws}$ .

Ein weiteres Bodenharvester System wurde von der Firma „Energy Floors“ [59] entwickelt. Diese Konzept wandelt die Energie der Druckkraft auf den Fußboden

mittels eines elektromagnetischen Systems in elektrische Energie. Durch eine vertikale Druckkraft wurde die obere Bodenplatte nach unten gedrückt. Die vertikale Bewegung wurde mit Hilfe einer mechanischen Vorrichtung, die sich auf der unteren Bodenplatte befand, in eine Drehbewegung umgewandelt. Die Energie der Drehbewegung konnte sodann in einem elektromagnetischen Generator in elektrische Energie gewandelt werden [6]. In dem von der Firma als „Sustainable Energy Floor“ vermarkteten Produkts bewegt sich die obere Bodenplatte 10 bis 20 *mm*. Eine Bodenplatte verfügt über eine Fläche von 50 *cm* x 50 *cm* und eine Dicke von 10 *cm*. Nach Angaben der Firma kann damit pro Schritt eine Energie zwischen 2 bis 10 *Ws* erzeugt werden. Dies ist abhängig von der Höhe der Druckkraft, die auf die obere Bodenplatte wirkt und der dadurch bedingten vertikalen Bewegung. Wird ein Hub von 10 *mm* angenommen, sollte dadurch eine Energie von 2 *Ws* erzeugt werden. Die Firma „Pavegen“ [47] entwickelte und vertreibt ein ähnliches System, das auch eine elektromagnetische Energiewandlung nutzt. Die Größe eines Moduls war 60 *cm* x 45 *cm* x 6,8 *cm*. Die obere Bodenplatte des Systems konnte sich durch eine einwirkende Druckkraft um 5 *mm* bewegen. Die vertikale Bewegung wurde durch ein Zahnradsystem in eine Drehbewegung gewandelt, die einen elektromagnetischen Generator antrieb [30]. Nach Angaben der Firma produzierte ein Modul pro Schritt eine Leistung von 4 bis 8 *W*. Da sich die Angabe auf einen Schritt bezieht, kann angenommen werden, dass es sich bei dieser Angabe um die resultierende Energie handelt, also 4 bis 8 *Ws* pro Schritt [47].

Tabelle 2.2 zeigt eine Übersicht der Harvester Systeme für Druckkräfte und Angaben zu der erzeugten elektrischen Energie pro Schritt, der auf das PVDF-Volumen normierten Energie (nur piezoelektrisch), dem Hub und dem Wandlerprinzip.

<b>System</b>	<b>Energie pro Schritt</b> [mWs]	<b>Energie / <math>V_{PVDF}</math> pro Schritt</b> [ $\frac{mWs}{cm^3}$ ]	<b>Hub</b> [mm]	<b>Wandlerprinzip</b>
Starner (Schuh) [61]	1,3	0,4	k.a.	Piezoelektrisch (PVDF)
Wang (Schuh) [69]	5	1,8	k.a.	Piezoelektrisch (PVDF)
Zhao (Schuh) [72]	1	1	k.a.	Piezoelektrisch (PVDF)
Nakajima [42]	0,045	0,025	k.a.	Piezoelektrisch (PVDF)
Sustainable Energy Floor [6]	$2 - 10 \cdot 10^3$	k.a.	10 – 20	Elektromagnetisch
Pavegen [47]	$4 - 8 \cdot 10^3$	k.a.	5	Elektromagnetisch

Tabelle 2.2: Übersicht der verschiedenen Energy Harvester





## 3 Energy Harvesting mit PVDF-Folie

Die Grundlage, um mehrlagige Energy Harvesting Systeme auf Basis monoaxial verstreckter PVDF-Folie herzustellen, ist die Technologie von Folienwickelkondensatoren. Es lassen sich mittels geeigneter Modifikationen sowohl Elektrostatische, die PVDF als Elektret nutzen als auch Piezoelektrische Systeme herstellen, die den piezoelektrischen Quereffekt von PVDF zur Energiewandlung verwenden. Diese beiden Möglichkeiten der Energiewandlung wurden für sporadisch auftretende impulsförmige Druckkräfte untersucht. Im Folgenden werden, nach der Definition des Anwendungsbereichs, die Eigenschaften der PVDF-Folie und der Aufbau der Elektrostatischen und Piezoelektrischen Energy Harvesting Systeme erläutert.

### 3.1 Anwendungsbereiche

In dieser Arbeit werden zwei Verfahren genauer betrachtet, die die mechanische Energie aus impulsförmigen flächigen Druckkräften in elektrische Energie wandeln. Hierbei kommen nur sich dynamisch ändernde Druckkräfte in Frage. Diese bewirken eine Änderung der mechanischen Energie und sind somit eine Voraussetzung für die Energiewandlung. Solche impulsförmigen Druckkräfte treten zum Beispiel in Fußböden auf, wenn Personen über diese laufen [63]. Abbildung 3.1 zeigt prinzipiell wie durch eine gehende Person eine dynamische Druckkraft im Boden erzeugt wird. Ganz allgemein wird durch jede landgebundene Fortbewegung eine impulsförmige Druckkraft in den Bodenflächen unterhalb des sich bewegenden Körpers verursacht. Ebenso können diese Druckkräfte auch durch Autos in Straßen hervorgerufen werden.

Ein System zur Wandlung von Druckkräften im Bodenbereich sollte möglichst an einem Ort mit großem Verkehrsaufkommen integriert werden, da die dynamischen

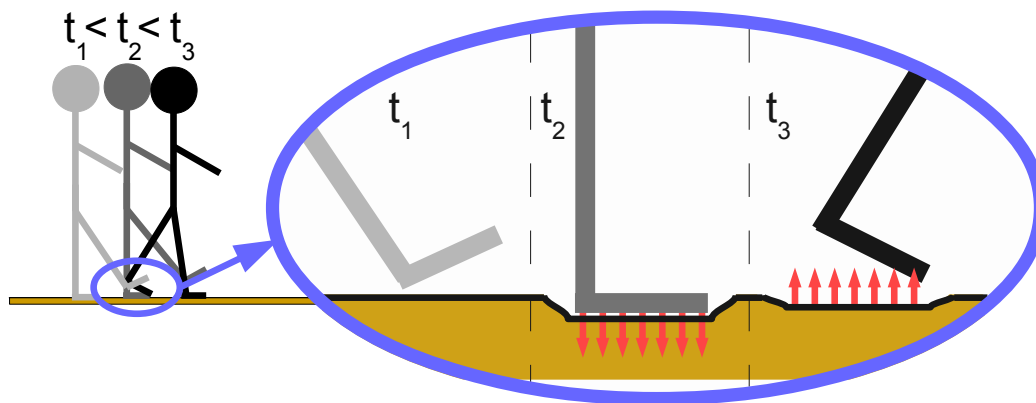


Abbildung 3.1: Dynamische Druckkraft auf eine Bodenfläche durch eine gehende Person

Druckkräfte nur sporadisch auftreten, beispielsweise sobald eine Person auf diese Bodenfläche tritt.

## 3.2 Charakterisierung von PVDF

Polymere Materialien (Kunststoffe) ersetzen heute in vielen Bereichen altbekannte Werkstoffe oder führen zu völlig neuen Produkten. Ein Bereich, der beispielsweise maßgeblich von Polymeren geprägt ist, ist die Verpackungsindustrie. Hier sind insbesondere Folien aus Polymeren von entscheidender Bedeutung, da diese je nach deren chemischer Zusammensetzung sehr unterschiedliche mechanische, thermische und elektrische Eigenschaften besitzen [5]. Die vielfältigen Eigenschaften von Polymerfolien führen dazu, dass sie mittlerweile in vielen Bereichen nicht mehr wegzudenken sind. So werden in der Elektrotechnik seit vielen Jahren unterschiedlichste Polymerfolien zum Bau von Kondensatoren verwendet.

Zu diesen gehören Fluorpolymerfolien, bei denen ein Teil der Wasserstoffatome durch Fluoratome ersetzt wurde. Sie verfügen über eine gute Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit, die durch die hohe Bindungsenergie zwischen Kohlenstoff und Fluor gegeben ist [5]. Im Vergleich zu anderen Polymerfolien weisen sie außerdem gute elektrische Eigenschaften (hohe Dielektrizitätszahl, hohe Spannungsfestigkeit), eine hohe Zugspannungsfestigkeit und UV-Beständigkeit auf [71]. Für das Energy Harvesting sind Materialien, die elektrische Ladung speichern können (Elektret) und piezoelektrische oder pyroelektrische Eigenschaften besitzen, von besonderem Interesse. Ein polymeres Material, das alle diese Eigenschaften

aufweist, ist PVDF.

### 3.2.1 Allgemeine Eigenschaften

PVDF-Folie ist eine teilkristalline Fluorpolymerfolie, die sich durch gute Polarisierbarkeit und piezo- und pyroelektrische Eigenschaften auszeichnet. Im Vergleich zu anderen piezoelektrischen Materialien besteht außerdem die Möglichkeit, sie großflächig ( $m^2$ ) und mit geringen Schichtdicken ( $\mu m$ ) herzustellen [38].

#### Strukturelle Eigenschaften von PVDF

PVDF ist ein fluorhaltiges Polymermaterial mit einer Kettenstruktur von  $[-CH_2CF_2-]_n$  bei einer Kettenlänge um 1500 Moleküle. Zwischen den Kohlenstoffatomen können drei energetisch günstige Winkel auftreten:  $T = 180^\circ$  (Trans),  $G^+ = 60^\circ$  (Gauche) und  $G^- = 300^\circ$  (Gauché) [68] [51]. In der  $[-CH_2CF_2-]$ -Bindung treten starke Dipolmomente von bis zu  $7,6 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$  auf [68]. Dieses Dipolmoment entsteht aufgrund der starken Elektronegativität zwischen Fluor (3,95), Kohlenstoff (2,5) und Wasserstoff (2,15) [20]. Aufgrund der höheren Elektronegativität von Fluor findet in einer Monomereinheit eine Elektronenverschiebung statt (siehe Abbildung 3.2). Die Stärke dieser Verschiebung hängt von der Kettenkonformation, der Kettenlänge und den Bindungswinkeln ab [68].

Je nach Abfolge der möglichen Bindungswinkel Trans, Gauche oder Gauché ergeben sich für PVDF drei verschiedene Kettenkonformationen. Für jede dieser Konformationen bestehen prinzipiell zwei mögliche Anordnungen der benachbarten Ketten zueinander, nämlich eine parallele und eine antiparallele Anordnung [70] [66] [51]. Bei paralleler Ausrichtung wirken die Dipolmomente der einzelnen Ketten in die gleiche Richtung, das resultierende Dipolmoment wird verstärkt. Hier spricht man von der polaren Phase. Bei antiparalleler Anordnung der Ketten heben sich die einzelnen Kettendipolmomente nahezu vollständig gegenseitig auf. Diesen Zustand nennt man die unpolare Phase.

Für jede der drei Kettenkonformationen kann theoretisch eine polare und eine unpolare Phase entstehen, insgesamt sind also sechs verschiedene Phasen denkbar [70] [66] [51]. Bei Form I sind alle Kohlenstoffatome mit Trans-Bindungen ( $TTTT$ ) aneinander gebunden, es entsteht eine Zick-Zack-Kette. Alle einzelnen  $[-CH_2CF_2-]$ -Dipole zeigen aufgrund der  $TTTT$ -Bindungen zwischen den Kohlenstoffmolekülen

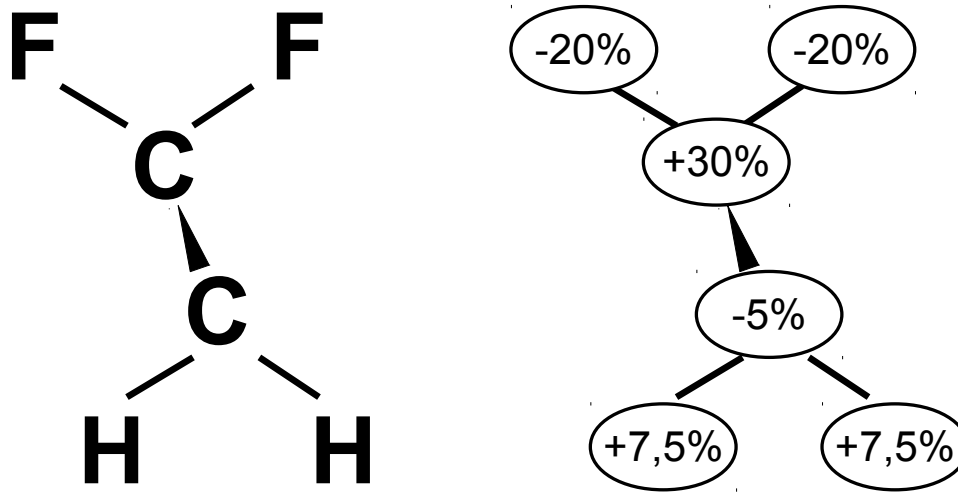


Abbildung 3.2: Relative transversale Ladungsverschiebung in einer PVDF-Monomereinheit [68]

in die gleiche Richtung. Das resultierende Dipolmoment bei dieser Konformation ist mit  $7,0 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$  somit am größten. Bei Form I ist nur eine polare Phase, die sogenannte  $\beta$ -Phase bekannt, eine unpolare Phase existiert nicht [70] [66] [51]. Die Kohlenstoffkette hat in Form II die Bindungen  $TG^+TG^-$ . Hier ist keine einheitliche Richtung der Dipolmomente der einzelnen Monomereinheiten auszumachen. Das Dipolmoment mit ca.  $4,0 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$  ist daher kleiner im Vergleich zu Form I. Man unterscheidet eine polare  $\delta$ -Phase und eine unpolare  $\alpha$ -Phase. Oftmals wird die  $\delta$ -Phase auch als  $\alpha_p$ -Phase bezeichnet. Bei Form III sind die Kohlenstoffatome in der Kette nach dem Schema  $TTTG^+TTTG^-$  angeordnet. Auch hier kann zwischen einer polaren  $\gamma$ -Phase und einer unpolaren  $\varepsilon$ -Phase unterschieden werden. Das resultierende Dipolmoment ist in dieser Konformation ca.  $2,0 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$ . Die folgende Tabelle 3.1 gibt einen Überblick über die möglichen Konformationen.

### 3.2. CHARAKTERISIERUNG VON PVDF

Kettenkonformation	I	II	III
Aufbau			
Stereochemische Notation ( $T = 180^\circ, G^+ = 80^\circ, G^- = 300^\circ$ )	<i>TTTT</i>	<i>TG<sup>+</sup>TG<sup>-</sup></i>	<i>TTTG<sup>+</sup>TTTG<sup>-</sup></i>
Dipolmoment	$7 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$	$4 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$	$2 \cdot 10^{-30} \text{ Cm}$
Anordnung benachbarter Dipole	polar unpolar	polar unpolar	polar unpolar
Erzeugung (mechanisch (me), chemisch (ch), elektrisch (el), thermisch (th))	me, - ch, el	el th	el ch, th
Spontane Polarisationsdichte $[\frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2}]$	22 -	12 0	7,3 0
Name	$\beta$ -	$\delta(\alpha_p)$ $\alpha$	$\gamma$ $\varepsilon$

Tabelle 3.1: Übersicht der Kristallphasen von PVDF [70]

Es besteht die Möglichkeit PVDF von einer Konformation in eine andere zu überführen. Beispielsweise kann durch mechanische Dehnung die  $\alpha$ -Phase in die  $\beta$ -Phase überführt werden. Für pyro- und piezoelektrische Eigenschaften ist vor allem die  $\beta$ -Phase wichtig, teilweise auch die  $\delta$ -Phase [66] [51]. Die Herstellung von PVDF in der  $\beta$ -Phase lässt sich in verschiedene Schritte unterteilen. Nach der Extrusion verfestigt sich PVDF in der unpolaren  $\alpha$ -Phase. Hierbei lagern sich die  $[-CH_2CF_2-]$ -Ketten aneinander und bilden eine Sphärolitstruktur (vgl. Abbildung 3.3). Ein solcher Sphärolit besteht aus kristallartigen Lamellen und amorphen Be-

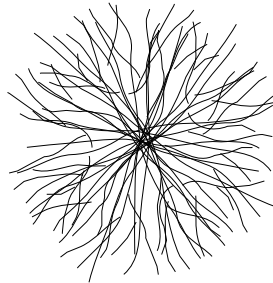


Abbildung 3.3: Sphärolitstruktur von PVDF [66]

reichen zwischen den Lamellen. Die Lamellendicke beträgt zwischen  $5\text{ nm}$  bis  $10\text{ nm}$  [70] bzw.  $10\text{ nm}$  bis  $20\text{ nm}$  [66] und ist damit deutlich kleiner als die durchschnittliche Polymerkettenlänge. Daher kann eine  $[-CH_2CF_2-]$ -Kette Bestandteil mehrerer Lamellen sein oder auch gefaltet mehrmals in ein und derselben Lamelle liegen. Die amorphen Bereiche zwischen den Lamellen verfügen über eine Dicke zwischen  $5\text{ nm}$  und  $10\text{ nm}$ . Hierbei handelt es sich im Gegensatz zu den kristallartigen Lamellen um einen „flüssigen“ Zustand mit sehr hoher Viskosität [70] [66] [51]. Will man PVDF aus der unpolaren  $\alpha$ -Phase in die polare  $\beta$ -Phase umwandeln, muss die Folie zunächst gereckt werden; der Sphärolit wird hierbei in die sogenannte Fibrillenstruktur überführt (vgl. Abbildung 3.4) [70] [51]. Die Folie kann monoaxial oder biaxial, das heißt in eine oder zwei Richtungen, gereckt werden. Durch das Recken werden die Dipolmomente in Reckrichtung ausgerichtet. In diesem Stadium ist allerdings noch keine nennenswerte Pyro- und Piezoelektrizität messbar, da die Dipolachsen um die Reckrichtung statistisch verteilt sind. Erst durch Polung in einem elektrischen Feld werden die statistisch verteilten Dipolmomente parallel ausgerichtet (s. Kapitel 3.2.2) [66] [51].

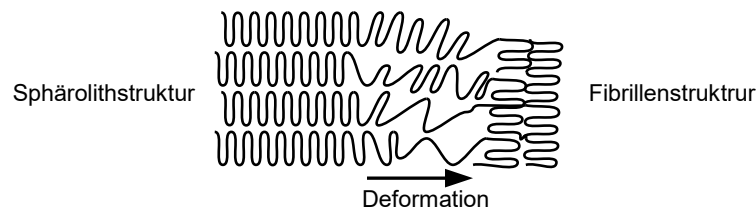


Abbildung 3.4: Übergang von Sphärolithstruktur zu Fibrillenstruktur [70]

### Glas- und Curietemperatur

Bei der Glas- beziehungsweise der Glasübergangstemperatur geht die amorphe Phase bei steigender Temperatur vom festen in den viskosen Zustand über. Der Reckprozess sollte immer oberhalb der Glas- beziehungsweise der Glasübergangstemperatur stattfinden, da hier die anzuwendenden Reckkräfte geringer sind. PVDF besitzt eine Glasübergangstemperatur von  $T = -39^\circ \text{C}$  [53].

Unterhalb der Curietemperatur  $T_c$  haben ferroelektrische Werkstoffe, hervorgerufen durch innere elektrische Felder, spontan polarisierte Bereiche, sogenannte "Domänen". In diesen Domänen sind die elektrischen Dipole einheitlich in die gleiche Richtung angeordnet. Steigt die Temperatur auf Werte über  $T_c$ , steigt auch die Beweglichkeit der einzelnen Gitterbausteine infolge von Wärmeschwingungen. Hierdurch geht die einheitliche Ausrichtung der Domänen verloren und somit auch das ferroelektrische Verhalten. Für PVDF liegt die Curietemperatur bei etwa  $205^\circ \text{C}$  und damit  $20^\circ \text{C}$  über der Schmelztemperatur von PVDF [36]. Allerdings geht bereits bei erhöhter Temperatur ( $> 90^\circ \text{C}$ ) eine eventuell vorhandene Polarisierung verloren, da sich die Dipole durch die erhöhte Beweglichkeit wieder umorientieren können [40] [51].

### 3.2.2 Polarisierung und Ladungsspeicherung

Durch die Reckung des Materials liegen in den kristallartigen Bereichen der PVDF-Folie die Kettenbindungen in der  $\beta$ -Konformation vor. In einer unpolarisierten Folie sind die Dipole der  $\beta$ -Konformation in zufällig verteilten Domänen gleich ausgerichtet. Da die Ausrichtung der Domänen zueinander rein statistisch verteilt ist, ist das Netto-Moment oder die Polarisierung der gereckten unpolarisierten PVDF-



Folie gleich Null. Wird die PVDF-Folie in einem starken elektrischen Feld polarisiert, das die Koerzitivfeldstärke übersteigt, so richten sich die Domänen bevorzugt in Feldrichtung aus. Die Koerzitivfeldstärke ist jene Feldstärke, die notwendig ist, um bei einem bereits polarisierten Material wieder eine remanente Polarisierung von Null zu erhalten [26]. Die Polarisierung kann durch unterschiedliche Polungsverfahren erreicht werden. Nennenswert sind hierbei die Elektronenstrahl-, Ionenstrahl-, Thermo- und Koronapolung, die im Folgenden näher beschrieben werden [57].

- Elektronenstrahl- und Ionenstrahlpolung: Monoenergetische, geladene Teilchenstrahlen mit einer kleineren Bandbreite als die Dicke der Dielektrika sind vielseitige und sehr gut kontrollierbare Werkzeuge, um Dielektrika zu polarisieren. Meist werden Elektronenstrahlen verwendet, da diese weit weniger Energie benötigen und somit auch weniger Schaden im Dielektrikum verursachen. Ist die Probendicke deutlich größer als die Eindringtiefe, findet nur im Randbereich eine Injektion von Elektronen statt. Die andere Seite des Materials durch eine Elektrode auf Erdpotential gelegt. Das elektrische Feld zwischen den injizierten Elektronen und der Probenelektrode auf Erdpotential polarisiert die Probe. Unter normalem Atmosphärendruck können nur Dielektrika polarisiert werden, die dicker als 0,1 cm sind, da die Elektronenenergie mehr als 0,5 MeV betragen muss. Dünnere Dielektrika müssen unter Vakuum polarisiert werden. Aus diesem Grund ist diese Methode bei Folien mit einer Dicke unter 0,1 mm nicht praktikabel [57].
- Thermopolung: Bei der Thermopolung wird an ein Dielektrikum ein elektrisches Feld (bis  $600 \frac{MV}{m}$ ) bei erhöhter Temperatur angelegt und das Feld erst nach dem Abkühlen auf Raumtemperatur abgeschaltet [70] [51]. Bei Polymeren wird oft eine Temperatur oberhalb der Glasübergangstemperatur, aber weit unterhalb der Schmelztemperatur gewählt. Beste Ergebnisse werden erzielt, wenn das zu polarisierende Material beidseitig metallisiert ist. Abbildung 3.5 zeigt beispielhaft die Hysterese-Kurven von PVDF-Folie bei einer Polarisierung mit einem niederfrequenten Wechselfeld von  $140 \frac{MV}{m}$  bei Temperaturen bis  $100^\circ C$  [26]. Mit zunehmender Temperatur steigt die remanente Polarisierung an und die notwendige Koerzitivfeldstärke nimmt ab.

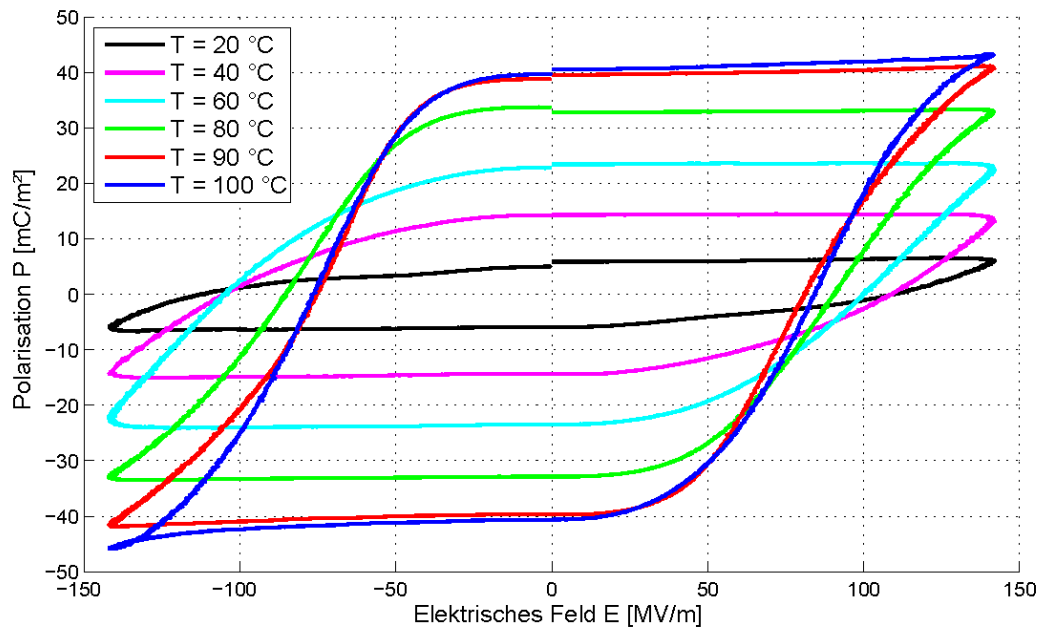


Abbildung 3.5: Hysterese-Kurven der Polarisation von PVDF-Folie mit einer Feldstärke von  $140 \frac{MV}{m}$  bei unterschiedlichen Temperaturen [26]

- **Koronapolung:** Die Polarisierung mittels einer Koronaentladung ist besonders gut geeignet, um großflächige polymere Folien zu laden. Diese Methode nutzt eine Entladung bei Atmosphärendruck, die durch ein inhomogenes elektrisches Feld erzeugt wird. Das elektrische Feld wird durch eine Spannung von einigen Kilovolt zwischen einer punktförmigen oder scharfkantigen Elektrode oberhalb der einen Seite des Dielektrikums und einer planaren Elektrode auf der Unterseite erzeugt (siehe Abbildung 3.6). Oberhalb einer von der Anordnung abhängigen Schwellspannung kann ein Stromfluss zwischen beiden Elektroden gemessen werden. Wird zwischen der scharfkantigen Elektrode und der Oberfläche des Dielektrikums eine Gitterelektrode auf einer Biasspannung von mindestens einigen hundert Volt angeordnet, kann das Potential an der Probenoberfläche gesteuert und eine homogene Feldverteilung erreicht werden [57].

Eine hohe remanente Polarisierung der PVDF-Folie ist von entscheidender Bedeutung, wenn deren Elektret- oder piezoelektrischen Eigenschaften genutzt werden sollen. Sie ist gleichzusetzen mit einem hohem Grad an gleich ausgerichteten Dipol-

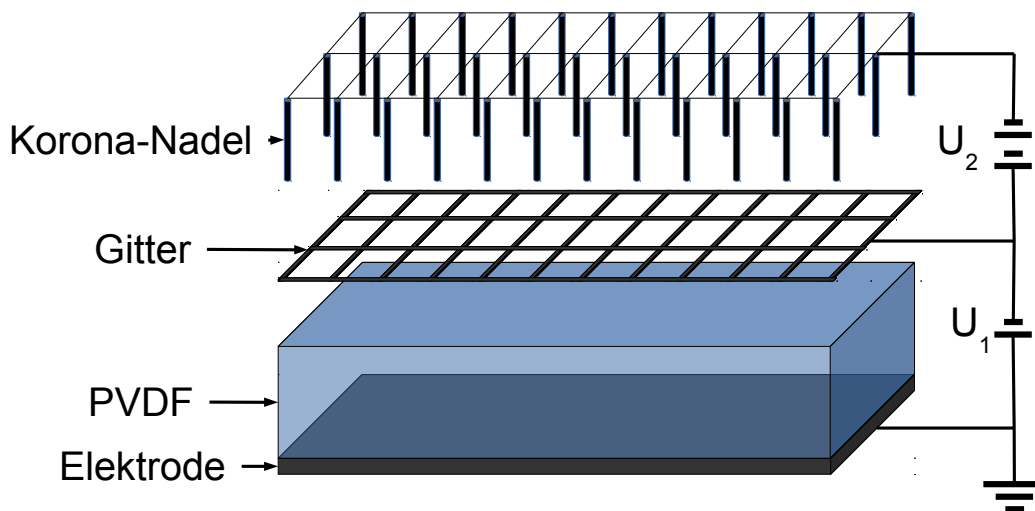


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung einer Anordnung zur Koronapolung von PVDF-Folie[66]

len in der Folie. Je mehr Dipole gleich ausgerichtet sind, desto größer ist das elektrische Feld, das diese erzeugen. Auch die piezoelektrischen Eigenschaften sind direkt proportional zur Ausrichtung der Dipole in der Folie (s. Kapitel 3.2.3).

### 3.2.3 Piezoelektrische Eigenschaften

Die piezoelektrischen Eigenschaften von gereckter und polarisierter PVDF-Folie wurden 1969 von Kawai [29] entdeckt. Anschließend wurden auch die pyroelektrischen Eigenschaften nachgewiesen [17]. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde der piezoelektrische Effekt in Kristallen und später in Keramiken genutzt [31]. Bei Keramiken wird heutzutage hauptsächlich PZT verwendet [55]. Generell lässt sich für piezoelektrische Materialien festhalten, dass unter Einwirkung mechanischer Kräfte an deren Oberfläche eine elektrische Ladung gemessen werden kann [31]. Dieser Effekt tritt bei Materialien auf, deren innere Struktur über kein Symmetriezentrum verfügt. Bei PVDF ist dies in der  $\beta$ -Konformation der Fall. Wird eine Polymerkette dieser Konformation beispielsweise durch eine mechanische Spannung gestaucht, verschiebt sich der Ladungsmittelpunkt der Kette. Sind viele Polymerketten durch einen Polarisationsprozess gleich ausgerichtet, so summieren sich die einzelnen Ladungsverschiebungen und über die gesamte Foliendicke kann eine elektrische Spannung gemessen werden [26]. Eine möglichst gleichmäßige Ausrichtung der einzel-

nen Polymerketten – also eine hohe remanente Polarisation – ist daher für einen großen piezoelektrische Effekt bei PVDF notwendig [26].

In Tabelle 3.2 sind einige physikalische Parameter für PVDF-Folie und die Keramiken PZT und Bariumtitanat ( $BaTiO_3$ ) zusammengefasst [38]. Es wird deutlich,

Parameter	Symbol	Einheit	PVDF	PZT	BaTiO <sub>3</sub>
Dichte	$\rho$	$10^3 \frac{kg}{m^3}$	1,78	7,5	5,7
Rel. Dielektrizitätszahl	$\epsilon$	–	12	1200	1700
Ladungskoeff. Quereffekt	$d_{31}$	$10^{-12} \frac{C}{N}$	23	110	78
Spannungskoeff. Quereffekt	$g_{31}$	$10^{-3} \frac{Vm}{N}$	216	10	5

Tabelle 3.2: Materialparameter piezoelektrischer Materialien [38]

dass die relative Dielektrizitätszahl und der piezoelektrische Ladungskoeffizient der polymeren PVDF-Folie deutlich geringer sind als die der Keramiken. Betrachtet man allerdings den Spannungskoeffizienten, der sich durch den Zusammenhang  $g_{31} = \frac{d_{31}}{\epsilon_r \epsilon_0}$  bestimmen lässt, bedeutet das bei gleicher mechanischer Belastung der Materialien, dass bei PVDF eine geringere Menge an Ladung erzeugt wird, aber mit  $g_{31}$  eine größere elektrische Spannung [38].

### 3.3 Aufbau der Energy Harvesting Systeme

Das Design der Energy Harvesting Systeme folgt der Technik von Folienwickelkondensatoren. Die Kondensatoren bestehen dabei prinzipiell aus zwei dielektrischen und zwei Elektrodenschichten, die abwechselnd übereinandergelegt auf einen Dorn gewickelt werden (vgl. Abbildung 3.7) [46]. Abgeleitet von diesem grundsätzlichen Aufbau existieren auf den jeweiligen Einsatzzweck angepasste Formen und Designs [25]. Die Vorteile der Wickeltechnik sind zum einen die große Flexibilität bezüglich der geometrischen Abmessungen und zum anderen die Vielfalt der einsetzbaren Materialien.

Diese Technologie bietet die Möglichkeit, die Dimensionen der Energy Harvester in fast beliebiger Weise zu modifizieren. Länge und Breite werden durch die Breite der Folien beziehungsweise durch den Wickeldurchmesser bestimmt. Die Dicke ergibt sich durch die Länge der verwendeten Folien und die Anzahl der Wicklungen

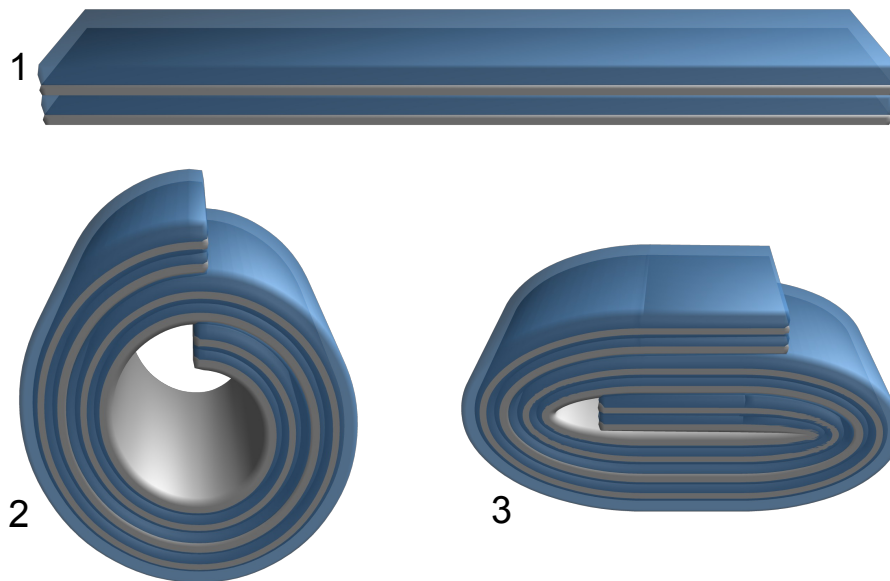


Abbildung 3.7: Schematischer Ablauf der Wickeltechnik für Folienwickelkondensatoren: 1. Abwechselndes Übereinanderlegen von je zwei Elektrodenfolien (grau) und dielektrischen Folien (blau); 2. Aufwickeln des Folienstapels auf einen Wickeldorn; 3. Flachdrücken des Folienwickels

gen. Es sind Wickelkondensatoren mit Grundflächen von  $< 1 \text{ cm}^2$  bis  $> 10^2 \text{ cm}^2$  möglich. Die Dicke kann von wenigen Millimetern bis hin zu mehreren Zentimetern variiert werden. Als dielektrische Materialien werden Polypropylen (PP)-, PET-, PVDF-, PTFE-Folien und Papier eingesetzt. Elektrodenfolien bestehen aus Aluminium, Zinn, Nickel oder Kupfer [33]. Oft werden Elektrodenflächen auf Folienmaterial mit Hilfe von physikalischer Gasphasenabscheidung (PVD) oder durch Siebdruck aufgebracht. Diese Technologien ermöglichen sehr dünne Elektroden-schichten, erfordern aber einen relativ hohen Ausrüstungsaufwand.

In dieser Arbeit wird als Elektrodenmaterial Aluminiumfolie mit einer Dicke von 5 - 10  $\mu\text{m}$  und PVDF-Folie mit 28  $\mu\text{m}$  verwendet.

### 3.3.1 Aufbau des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems

Bei einem Elektrostatischen Energy Harvester mit Polymerfolien muss eine Kapazitätsänderung des Kondensatoraufbaus bei mechanischer Belastung gewährleistet sein. Diese Art der Energiewandlung ist hierbei nur möglich, wenn die Elektroden zu der polymeren Elektretfolie beweglich sind. Dies kann erreicht werden, indem ei-

ne separate Elektrodenfolie oder eine einseitig metallisierte Elektretfolie verwendet wird. Der in Abbildung 3.7 gezeigte Aufbau kann dahingehend modifiziert werden, dass eine Abstandsänderung zwischen der PVDF- und der Aluminiumfolie gegeben ist. Hierzu muss der Folienwickel im Ausgangszustand einen Abstand zwischen den einzelnen Lagen aufweisen. Um dies zu erreichen, kann beispielsweise im Herstellungsprozess die Vorspannung der Folien verringert werden, so dass sich diese locker umeinander legen. In Abbildung 3.8 ist diese Konfiguration schematisch dargestellt. Wird dieser Aufbau durch eine mechanische Druckkraft zusammenge-

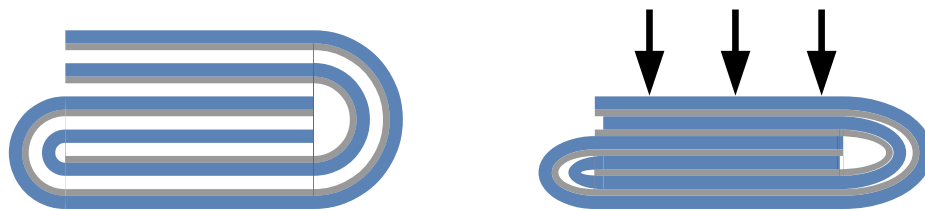


Abbildung 3.8: Schematische Darstellung eines locker gewickelten Wickelkondensator; links: ohne äußere Kraft; rechts: durch äußere Kraft zusammengedrückter Wickelkondensator

drückt, ändert sich der Abstand zwischen den Lagen und die Kapazität wird größer. Durch das quasi-permanente externe elektrische Feld der PVDF-Folie ist direkt an den beiden Elektroden eine elektrische Spannung im Leerlauf messbar.

Die Folientechnik bietet den Vorteil, dass fast beliebig skalierbare viellagige System hergestellt werden können. Durch die Anzahl der Lagen wird gleichzeitig die Kapazität beeinflusst, die ein entscheidendes Kriterium für elektrostatische Wandler ist.

#### **3.3.2 Aufbau des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems**

Um ein möglichst effizientes Piezoelektrisches Energy Harvesting System zu realisieren, das flächige Druckenergie in elektrische Energie wandelt, sollten folgende Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Integration eines großen PVDF-Volumens
2. Nutzung des piezoelektrischen Quereffekts

### 3. Große mechanische Dehnung der PVDF-Folie

Die Integration eines großen PVDF-Volumens lässt sich mit dem in Kapitel 3.3 beschriebenen Aufbau des Wickelkondensators gut umsetzen. Die Punkte 2 und 3 bedürfen einer genaueren Betrachtung.

Wird ein Wickelkondensator, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, verwendet, wird die flächige Druckkraft direkt auf den flachgedrückten Wickelkondensator ausgeübt und es wirkt der piezoelektrische Längseffekt. Ein Versuch mit beidseitig metallisierter PVDF-Folie bestätigte dies. Die Energiewandlung, die mit diesem Verfahren erreicht werden konnte, war äußerst gering. Mit einer impulsförmigen mechanischen Druckkraft von  $200\text{ N}$  auf eine Fläche von  $4\text{ cm}^2$  konnte nur eine elektrische Energie von  $2,2\text{ nWs} \pm 18\%$  generiert werden [43]. Durch eine geeignete Modifikation des Systems können die flächigen Druckkräfte eine Dehnung der PVDF-Folie hervorrufen (s. Abbildung 3.9).

Wirkt die Kraft nicht auf die gesamte Oberfläche des Wickelkondensators, son-

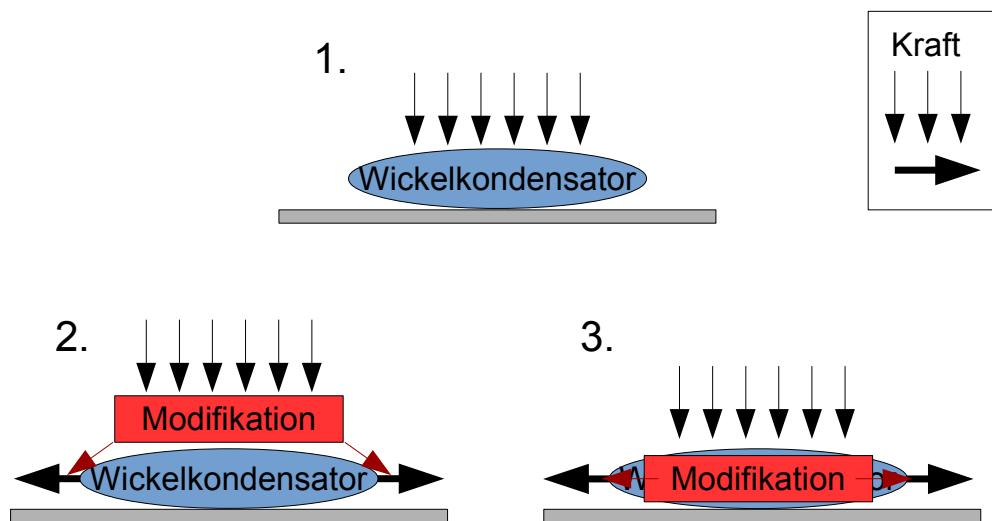


Abbildung 3.9: Wirkung der Druckkraft auf den Wickelkondensator des Piezoelektrischen Systems; ohne Modifikation (1.) und mögliche Modifikationen zur Wandlung der Druck- in Zugkraft (2. und 3.)

dern auf die im Verhältnis wesentlich kleinere Querschnittsfläche, wird eine große mechanische Spannung (= große Dehnung) der PVDF-Folie erzeugt. Diese Modifikation kann entweder außerhalb (2.) oder innerhalb (3.) des Wickelkondensators vorgenommen werden (vgl. Abbildung 3.9).

Eine Untersuchung von Musgrave [41] zeigte, dass durch geeignete Bogenelemente eine Druckkraft so auf eine PVDF-Folie übertragen werden kann, dass es zu einer Dehnung der Folie kommt. Somit kann der piezoelektrische Quereffekt der PVDF-Folie genutzt werden. Die Bogenelemente wurden aus Federstahl hergestellt und zwischen zwei dieser Elemente wurde eine PVDF-Folie geklemmt. Nachteilig an dieser Methode war, dass ein Teil der Druckkraft für die Verbiegung der Bogenelemente aufgewendet werden und die PVDF-Folie aufwendig zwischen den Bogenelementen fixiert werden musste.

Wird in den Wickelkondensator ein Scharnierelement eingebracht, kann die nötige Modifikation des Systems ohne diese Nachteile erreicht werden. Eine auf die Oberfläche des Wickelkondensators wirkende Kraft wird über das Gelenk des Scharniers umgelenkt. Das Scharnier öffnet sich, solange der Öffnungswinkel kleiner als  $180^\circ$  ist. Abbildung 3.10 zeigt die beschriebene Anordnung des Scharniers. Befindet sich das Scharnier innerhalb des Wickelkondensators, dessen Innenumfang kleiner als der maximale Außenumfang des Scharniers ist, wird der Wickelkondensator durch das Aufklappen des Scharniers gedehnt. Es erfolgt eine Dehnung der PVDF-Folie in Streckrichtung und es wirkt der piezoelektrische Quereffekt. In Kapitel 4.3.2 wird diese Anordnung genauer ausgeführt und eine mathematische Formulierung des Systems hergeleitet.

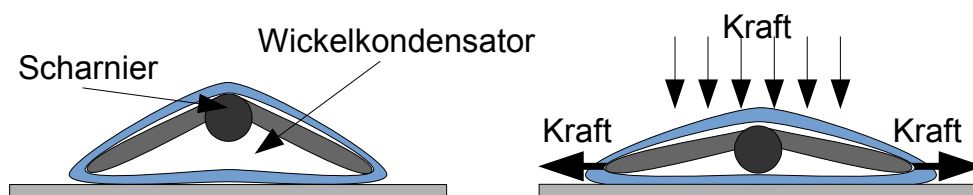


Abbildung 3.10: Aufbau des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems mit einem Scharnierelement im Inneren eines Folienwickelkondensators





## 4 Theoretischer Hintergrund

Nachfolgend werden der Anwendungsbereich, die elektrostatische und die piezoelektrische Energiewandlung theoretisch beschrieben.

### 4.1 Definition des Anwendungsbereichs

Auf eine Bodenfläche wirkt eine Druckkraft, wenn eine Masse über diese bewegt wird. Ein entscheidendes Merkmal dieser mechanischen Druckkräfte ist daher, dass sie nicht regelmäßig und nicht gleichförmig auftreten. Dies ist ein entscheidender Unterschied zu klassischen mechanischen Energy Harvestern, die auf relativ gleichbleibenden mechanischen Vibrationen basieren. Es kann zwar nicht vorhergesagt werden wie oft ein mechanischer Impuls auftritt, aber die Beschaffenheit des Impulses kann je nach Anwendung näher definiert werden. Im Folgenden wird von einer Anwendung in einem Fußboden ausgegangen, über den sich Menschen mit normaler Schrittgeschwindigkeit bewegen. Somit können die Amplitude und die Zeitdauer der impulsförmigen Druckkraft detaillierter bestimmt werden. Abbildung 4.1 zeigt schematisch die impulsförmigen Druckkräfte, von denen die Zeitdauer  $\Delta t$  und die Höhe der maximalen Kraft  $\hat{F}$  näher eingegrenzt werden können. Die Zeit zwischen zwei Impulsen ( $t_{x1}$  und  $t_{x2}$ ) kann hingegen nicht genauer bestimmt werden, es kann lediglich eine minimale Zeitdauer abgeschätzt werden. Die Impulsdauer  $\Delta t$  wird durch die Dauer der Standphase, in der ein Fuß beim Gehen auf dem Boden verbleibt, vorgegeben. Die Dauer der Standphase ist dabei abhängig von der Gehgeschwindigkeit. Sie nimmt mit steigender Geschwindigkeit ab und erreicht ein Minimum, wenn das Gehen in Laufen übergeht [23]. Die Standdauer eines Fußes beträgt nach einer Untersuchung von Stott [63] etwa  $0,7 \text{ s}$ . Da diese mit zunehmender Geschwindigkeit abnimmt, wird eine mittlere Dauer der Standphase  $\Delta t$  und

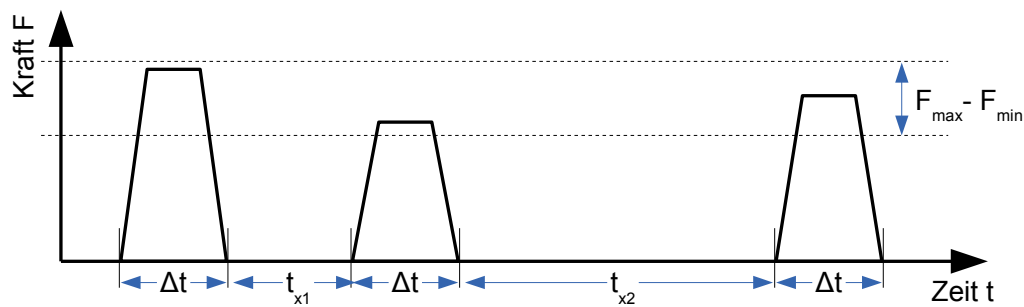


Abbildung 4.1: Beispiele für impulsförmige Druckkräfte mit einer Impulsdauer  $\Delta t$ , unterschiedlicher Amplitude  $\hat{F}$  und unbestimmten Impulsabstand  $t_x$

eine minimale Dauer zwischen zwei Impulsen ( $t_{x,min}$ ) von jeweils 0,5 s angenommen. Dies entspricht einer Schrittfrequenz von zwei Schritten pro Sekunde. Auf einer Bodenfläche entsteht dadurch eine mechanische Belastung mit einer Frequenz von 1 Hz.

Die maximale Amplitude der Kraft  $\hat{F}$  wird maßgeblich vom Gewicht der Person, die über den Boden geht, beeinflusst. Das Durchschnittsgewicht erwachsener Personen beider Geschlechter beträgt 75 kg [62]. Die Amplitude der Druckkraft  $\hat{F}$  ergibt sich durch das Körpergewicht und dessen Beschleunigung beim Gehen. Im einfachsten Fall ist die Beschleunigung gleich der Erdbeschleunigung, also  $9,81 \frac{m}{s^2}$  und die durchschnittliche maximale Amplitude 735 N.

Nach Starner und Paradiso [61] könnte eine Person mit einem Gewicht von 75 kg bei einer Gehgeschwindigkeit von zwei Schritten pro Sekunde, eine maximale mechanische Leistung von 75 W generieren. Dies würde allerdings bedeuten, dass eine Vorrichtung um 5 cm mit dem kompletten Körpergewicht durch die Erdgravitation bewegt werden müsste. Dadurch wäre es sehr anstrengend zu gehen, vergleichbar mit dem Gehen auf Sand. Sie schlagen daher vor, dass ein System zur Energiegewinnung beim Gehen eine maximale Deflektion von 1 cm aufweisen sollte, wodurch noch etwa 15 W an mechanischer Leistung zur Verfügung stehen würden. Die maximale Energie, die danach bei einer Deflektion von 1 cm pro Schritt zur Verfügung steht, entspricht 7,5 Ws. Durch eine Deflektion von 1 mm steht nur noch eine mechanische Energie von 0,75 Ws zur Verfügung.

Diese mechanische Energie kann durch einen entsprechenden Wandler (mit Verlusten) in elektrische Energie umgewandelt werden.

## 4.2 Elektrostatisches Energy Harvesting System

Die theoretische Beschreibung des Elektrostatischen Energy Harvesting System erfolgt ausgehend von den Grundlagen der elektrostatischen Energiewandlung. Mit Hilfe der mathematischen Beschreibung des Systems wurde die Energiewandlung simuliert.

### 4.2.1 Grundlagen der elektrostatischen Energiewandlung

Die Energiewandlung bei Elektrostatischen Systemen erfolgt grundsätzlich durch die Änderung der Kapazität von geladenen Kondensatoranordnungen [4]. Wird ein System vereinfacht als Plattenkondensator modelliert, kann dessen Kapazität  $C$  nach Gleichung 4.1 durch eine Abstandsänderung der Kondensatorplatten  $d$ , eine Änderung der Kondensatorfläche  $A$  oder der Permittivität  $\epsilon$  variiert werden.

$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (4.1)$$

Abbildung 4.2 zeigt mögliche Anordnungen, um die Kapazität durch Änderung des Plattenabstands oder der Plattenfläche zu beeinflussen. Elektrostatische Energy Harvester, die eine mechanische Eingangsenergie in elektrische Ausgangsenergie wandeln, lassen sich nach zwei Möglichkeiten der Kapazitätsänderung unterscheiden (siehe Abbildung 4.2). Der Vorteil einer Veränderung der Plattenfläche  $A$  ist, dass

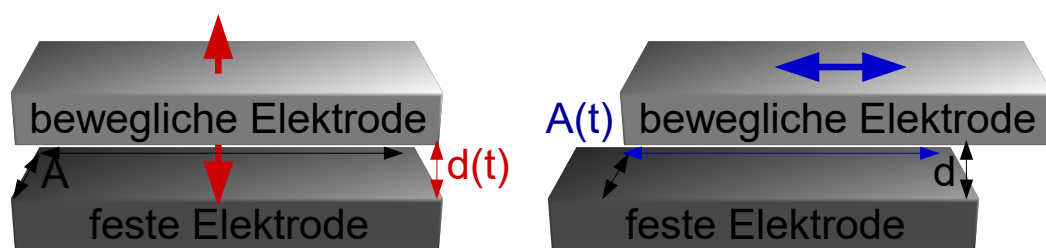


Abbildung 4.2: Kapazitätsänderung durch Änderung des Plattenabstandes  $d(t)$  (rot, links Bildseite) oder Änderung der Plattenfläche  $A(t)$  (blau, rechte Bildseite)

die Kapazitätsänderung ( $\Delta C = \frac{\epsilon \Delta A}{d}$ ) linear ist. Im Gegensatz dazu ist durch eine Änderung des Plattenabstandes  $d$  die Kapazitätsänderung nicht linear, sondern hyperbolisch ( $\Delta C = \frac{\epsilon A}{\Delta d}$ ). Allerdings kann, bei gleicher mechanischer Größenänderung, die Kapazitätsdifferenz durch die Abstandsänderung deutlich größer als durch die

Flächenänderung sein.

Da eine Änderung der Kapazität alleine keine Wandlung von mechanischer in elektrische Energie ermöglicht, muss die Kondensatoranordnung noch mittels einer Spannungsquelle oder eines Elektretmaterials geladen werden.

Für eine maximale Energiewandlung wird eine möglichst große Änderung der Kapazität ( $\Delta C = C_{max} - C_{min}$ ) und eine Spannungsquelle mit hoher Ausgangsspannung  $U$  zur Aufladung der Kondensatoranordnung benötigt [2]. Wird eine Spannungsquelle verwendet, können zwei Methoden zur Energiewandlung unterschieden werden: zum einen die spannungs- und zum anderen die ladungsdominierte Energiewandlung [4].

Für die ladungsdominierte Wandlung, bei der die Ladung bei Kapazitätsänderung konstant gehalten wird, sind folgende Schritte notwendig:

1. Laden der Kondensatoranordnung bei maximaler Kapazität  $C_{max}$   
(Spannung:  $0 \rightarrow U_{low}$ ; Ladung:  $0 \rightarrow Q_{high}$ )
2. Trennen der Spannungsquelle von der Kondensatoranordnung
3. Mechanische Änderung der Kapazität von maximaler zu minimaler Kapazität  
( $C_{max} \rightarrow C_{min} \Rightarrow U_{low} \rightarrow U_{high}; Q_{high} = const.$ )
4. Verbinden und Entladen der Kondensatoranordnung in den Energiespeicher  
( $U_{high} \rightarrow 0; Q_{high} \rightarrow 0$ )
5. Mechanische Änderung der Kapazität von minimaler zu maximaler Kapazität  
( $C_{min} \rightarrow C_{max}$ )

Durch die Änderung der Kapazität in Schritt 3 steigt die Spannung des Kondensators, da die Ladung konstant bleibt und  $Q_{high} = C_{max}U_{low} = C_{min}U_{high} = const.$  erfüllt sein muss.

Bei der spannungsdominierten Wandlung wird während der mechanischen Kapazitätsänderung die Spannung der Kondensatoranordnung konstant gehalten. Folgende Schritte sind hierbei zu beachten:

1. Laden der Kondensatoranordnung  
(Spannung:  $0 \rightarrow U_{low}$ ; Ladung:  $0 \rightarrow Q_{high}$ )
2. Mechanische Kapazitätsänderung von maximaler zu minimaler Kapazität  
( $C_{max} \rightarrow C_{min} \Rightarrow U_{low} = const.; Q_{high} \rightarrow Q_{low}$ )

3. Trennen des Energiespeichers von der Kondensatoranordnung
4. Mechanische Änderung der Kapazität von minimaler zu maximaler Kapazität  
( $C_{min} \rightarrow C_{max} \Rightarrow U_{low} \rightarrow U_{min}; Q_{low} = const.$ )

Die elektrische Energie, die bei der spannungsdominierten Methode generiert wird, lässt sich durch folgende Gleichung ausdrücken [4]:

$$\Delta E = \frac{1}{2} (C_{max} - C_{min}) U_{low}^2 = \frac{1}{2} \Delta C U_{low}^2 \quad (4.2)$$

Die elektrische Energie, die bei der ladungsdominierten Wandlung generiert wird, ergibt sich durch:

$$\Delta E = \frac{1}{2} (C_{max} - C_{min}) U_{low}^2 \frac{C_{max}}{C_{min}} = \frac{1}{2} \Delta C U_{low}^2 \frac{C_{max}}{C_{min}} \quad (4.3)$$

Die ladungsdominierte Wandlung ermöglicht also eine um den Faktor  $\frac{C_{max}}{C_{min}}$  größere elektrische Energiewandlung, wenn die gleiche Spannungsquelle genutzt wird.

Ein Nachteil beider Methoden ist, dass eine elektrische Schaltung benötigt wird, die exakt zum richtigen Zeitpunkt die Kondensatoranordnung lädt und entlädt [4]. Die Energiewandlung setzt also eine Spannungsquelle, eine Schaltung zur Überwachung der Kapazitätsänderung, einen Energiespeicher und mindestens einen Schalter voraus.

Wird hingegen ein Elektretmaterial als „Spannungsquelle“ verwendet, ist keine aufwändige Schaltung zur Energiewandlung erforderlich, es wird lediglich eine Gleichrichterschaltung zur Energiespeicherung benötigt [4][57]. Das Wandlungsprinzip bei Systemen mit Elektretmaterial ist weder ladungs- noch spannungsdominiert. Die elektrische Energie, die bei der elektrostatischen Wandlung mittels eines Elektretmaterials generiert werden kann, lässt sich nicht analytisch berechnen. In Kapitel 4.2.2 erfolgt die mathematische Formulierung, um eine numerische Lösung berechnen zu können.

### 4.2.2 Modellierung des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems

Im Folgenden wird der Elektrostatische Energy Harvester mathematisch modelliert. Zuerst erfolgt hierfür die Herleitung der Formel zur Beschreibung eines einlagigen Systems, bevor diese anschließend auf ein mehrlagiges System erweitert wird.

### Einlagiges System

Abbildung 4.3 zeigt schematisch einen einlagigen Elektrostatischen Energy Harvester aus einem Elektretmaterial und einer beweglichen Elektrode, die über einen elektrischen Lastwiderstand  $R$  mit der festen Elektrode verbunden ist. Das elektr-

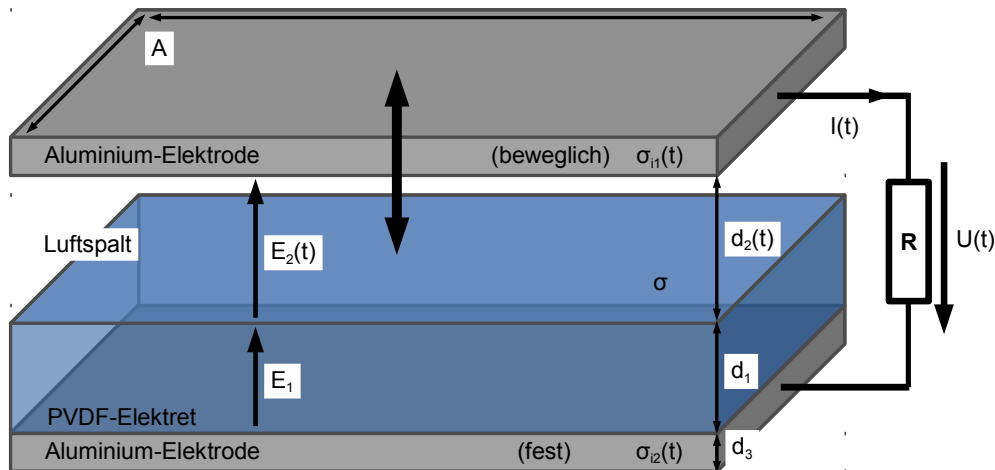


Abbildung 4.3: Schematischer Aufbau des Elektrostatischen Systems der Fläche  $A$ , bestehend aus einem PVDF-Elektret der Dicke  $d_1$ , zwei Aluminiumelektroden der Dicke  $d_2$ , wobei eine Elektrode beweglich ist und dadurch ein veränderlicher Luftspalt  $d_2(t)$  entsteht. Das PVDF-Elektret hat ein inneres elektrisches Feld  $E_1$  und ein äußeres Feld  $E_2(t)$ . Die Elektroden sind über einen Widerstand  $R$  miteinander verbunden.

sche Ersatzschaltbild dieses Systems zeigt Abbildung 4.4. Der parallele parasitäre Widerstand  $R_{par,p}$  wird durch den spezifischen Oberflächen- und Volumenwiderstand ( $10^{13}\Omega$  und  $8 - 10 \cdot 10^{14}\Omega cm$ ) von PVDF erzeugt [32]. In einer ersten Näherung werden der parallele und serielle parasitäre Widerstand vernachlässigt (d.h.  $R_{par,p} \rightarrow \infty$  und  $R_{par,s} \rightarrow 0$ ). Die parasitäre parallele Kapazität  $C_{par}$  ergibt sich durch die Bereiche, in denen sich die flexible Elektrode nicht bewegt. Diese kann in der mathematischen Beschreibung nachträglich durch eine Anpassung der Kondensatorfläche von  $C_2(t)$  erfolgen. Daher wird  $C_{par}$  vorerst nicht weiter in die Betrachtung mit einbezogen ( $C_{par} = 0$ ). Aufgrund der Erhaltung von Ladungen gilt:

$$\sigma = \sigma_{i1} + \sigma_{i2} \quad (4.4)$$

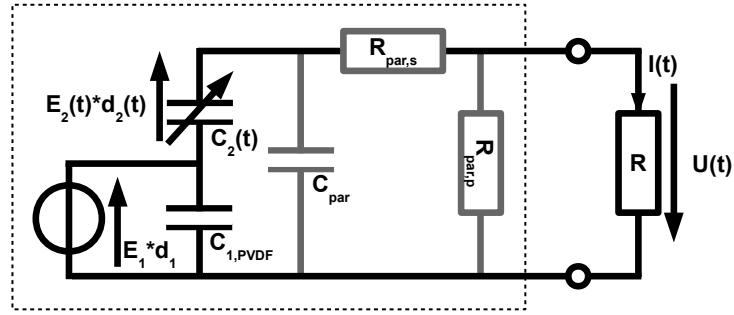


Abbildung 4.4: Elektrisches Ersatzschaltbild des Elektrostatischen Systems aus Abbildung 4.3. Die Spannung  $E_1 * d_1$  an der Kapazität durch das PVDF-Elektret  $C_1$  ist konstant im Gegensatz zur Spannung  $E_2(t) * d_2(t)$  an der veränderlichen Kapazität  $C_2(t)$  über dem Luftspalt  $d_2(t)$ . Die parasitären Widerstände  $R_{par,p}$  und  $R_{par,s}$  und Kapazität  $C_{par}$  beeinflussen die am Widerstand  $R$  messbare Spannung  $U(t)$  und den Strom  $I(t)$

Hier ist  $\sigma$  die Oberflächenladungsdichte,  $\sigma_{i1}$  und  $\sigma_{i2}$  die induzierte Ladungsdichte auf der fixierten und der beweglichen Elektrode [56].

Für die Grenzfläche an der Ladungsschicht folgt mit dem Gauss'schen Gesetz

$$\sigma = \epsilon_r \epsilon_0 E_1 - \epsilon_0 E_2(t) \quad (4.5)$$

Hierbei bezeichnen  $E_1$  und  $E_2(t)$  das elektrische Feld in der Elektretschicht und im Luftspalt,  $\epsilon_0$  und  $\epsilon_r$  die Dielektrizitätskonstante von Vakuum und die relative Dielektrizitätszahl von PVDF [35]. Diese Gleichung kann wie folgt umgestellt werden:

$$E_1 = \frac{\sigma + \epsilon_0 E_2(t)}{\epsilon_r \epsilon_0} \quad (4.6)$$

Zusätzlich muss für die Ausgangsspannung  $U(t)$  am Lastwiderstand  $R$  gelten:

$$\int E ds = 0; U + \sum_{i=1}^2 d_i E_i = 0 \quad (4.7)$$

$$U(t) + d_1 E_1 + d_2(t) E_2(t) = 0 \quad (4.8)$$

Wird Gleichung 4.6 in Gleichung 4.8 eingesetzt und nach  $E_2(t)$  aufgelöst, ergibt sich:

$$U(t) + d_1 \frac{\sigma + \epsilon_0 E_2(t)}{\epsilon_r \epsilon_0} + d_2(t) E_2(t) = 0 \quad (4.9)$$

$$E_2(t) = - \frac{\epsilon_r \epsilon_0 U(t) + d_1 \sigma}{\epsilon_0 d_1 + \epsilon_r \epsilon_0 d_2(t)} \quad (4.10)$$



Wird die bewegliche Elektrode durch eine äußere mechanische Kraft bewegt, ändert sich der Luftspalt  $d_2(t)$ . Die Änderung des Luftspaltes muss für die Berechnung durch eine geeignete Funktion modelliert werden. Für die Simulation wird eine abschnittsweise lineare Funktion (s. Kapitel 4.2.3) verwendet. Wird an die veränderliche Kapazität, wie in Abbildung 4.3 zu sehen, ein resistiver Lastwiderstand angeschlossen, gilt für die Spannung  $U(t)$  an diesem ( $A$  ist die Kondensatorfläche):

$$U(t) = RI(t) = RA \frac{d\sigma_{i2}(t)}{dt} \quad (4.11)$$

Mit

$$\sigma_{i2}(t) = \epsilon_0 E_2(t) \quad (4.12)$$

ergibt sich:

$$U(t) = RA\epsilon_0 \frac{dE_2(t)}{dt} \quad (4.13)$$

In Gleichung 4.13 kann nun die Ableitung  $d/dt(E_2(t))$  aus Gleichung 4.10 eingesetzt werden. Dies ergibt eine Differentialgleichung 1. Ordnung [35]:

$$\frac{d}{dt}U(t) = U(t) \left( \frac{\epsilon_r \frac{d}{dt}d_2(t)}{\epsilon_r d_2(t) + d_1} - \frac{\epsilon_r d_2(t) + d_1}{\epsilon_r \epsilon_0 RA} \right) + \frac{\sigma d_1 \frac{d}{dt}d_2(t)}{\epsilon_r \epsilon_0 d_2(t) + \epsilon_0 d_1} \quad (4.14)$$

Mit dieser Gleichung kann der Spannungsverlauf am Lastwiderstand  $R$  berechnet werden, wenn sich der Elektrodenabstand  $d_2(t)$  ändert.

### Mehrlagiges System

Um den in Kapitel 3.3.1 beschriebenen mehrlagigen elektrostatischen Energy Harvester zu modellieren, muss die Gleichung 4.14 für ein einlagiges System modifiziert werden. In dem vorliegenden mehrlagigen System sind die Einzellagen elektrisch parallel miteinander verbunden. Das mehrlagige System ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Die Gesamtfläche eines mehrlagigen Systems ist durch die Summe der Einzelflächen aller Lagen gegeben. In Gleichung 4.14 muss daher die Fläche  $A$  mit der Lagenanzahl  $n$  multipliziert werden. Damit ergibt sich für die elektrische Beschreibung des Systems folgende Differentialgleichung [35]:

$$\frac{d}{dt}U(t) = U(t) \left( \frac{\epsilon_r \frac{d}{dt}d_2(t)}{\epsilon_r d_2(t) + d_1} - \frac{\epsilon_r d_2(t) + d_1}{\epsilon_r \epsilon_0 n A} \right) + \frac{\sigma d_1 \frac{d}{dt}d_2(t)}{\epsilon_r \epsilon_0 d_2(t) + \epsilon_0 d_1} \quad (4.15)$$

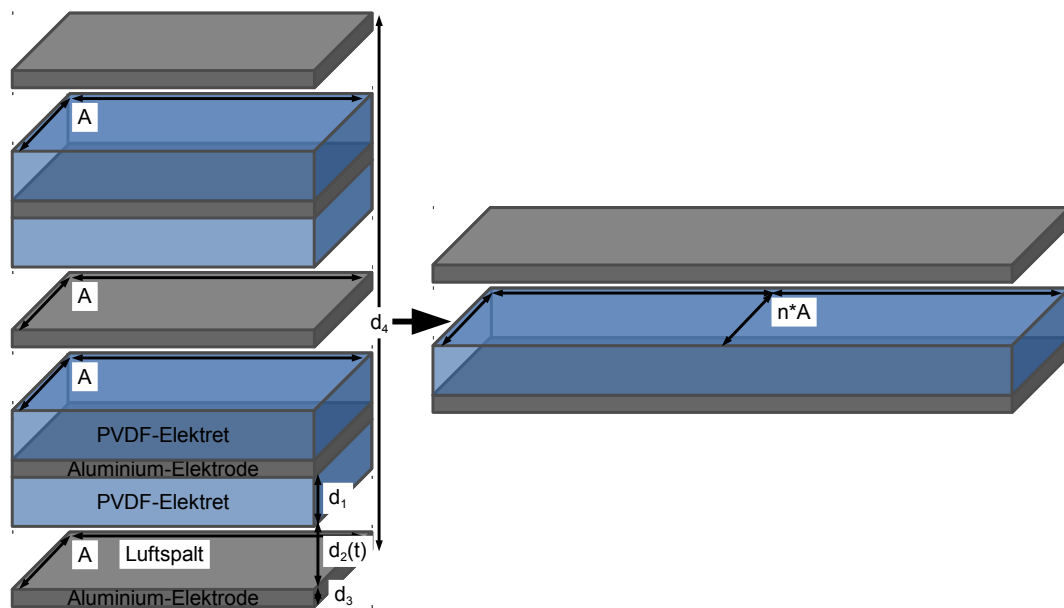


Abbildung 4.5: Schematischer Aufbau eines  $n$ -lagigen Elektrostatischen Systems mit der Grundfläche  $A$ , PVDF-Elektret der Dicke  $d_1$ , einem veränderlichen Luftspalt  $d_2(t)$ , Aluminium-Elektroden der Dicke  $d_3$  und der Gesamtdicke  $d_4$  (links). Zur Bestimmung der Gesamtfläche des Systems kann dieses transformiert werden (rechts). Die resultierende Gesamtfläche des Systems ist  $n * A$

Durch  $C_2(t) = \frac{n\epsilon_0 A}{d_2(t)}$  und  $C_1 = \frac{n\epsilon_r \epsilon_0 A}{d_1}$  folgt:

$$\frac{d}{dt}U(t) = U(t) \left( \frac{\epsilon_r \frac{d}{dt}d_2(t)}{\epsilon_r d_2(t) + d_1} - \frac{1}{R} \left( \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2(t)} \right) \right) + \frac{\sigma d_1 \frac{d}{dt}d_2(t)}{\epsilon_r \epsilon_0 d_2(t) + \epsilon_0 d_1} \quad (4.16)$$

Diese Gleichung ist nicht analytisch, aber mittels numerischer Verfahren lösbar. Ist der Spannungsverlauf am Lastwiderstand  $R$  bekannt, so können daraus die elektrische Leistung und Energie berechnet werden, die an diesem umgesetzt werden. Für die elektrische Momentanleistung gilt:

$$P(t) = U(t)I(t) = \frac{U^2(t)}{R} \quad (4.17)$$

Und für die bis zum Zeitpunkt  $t_{max}$  umgesetzte Energie:

$$E = \int_0^{t_{max}} P(t)dt = \int_0^{t_{max}} \frac{U^2(t)}{R} dt \quad (4.18)$$

Um das Verhalten des Elektrostatischen Energy Harvesters zu simulieren und eine optimale Konfiguration zu definieren, ist es entscheidend, einen Zusammenhang zwischen dem maximalen Elektrodenabstand  $d_{2,max}$  und der Anzahl der Lagen  $n$  zu formulieren. Die bisherige Formulierung in Gleichung 4.15 beschreibt ein System wie auf der rechten Seite in Abbildung 4.5 dargestellt. Damit ist in der Beschreibung noch nicht berücksichtigt, dass es sich um ein System handelt, in dem die einzelnen Lagen mechanisch übereinander angeordnet sind. Durch diese mechanische Serienschaltung der Einzellagen ergibt sich ein Zusammenhang zwischen der Dicke des Gesamtsystems  $d_4$ , der Lagenanzahl  $n$  und dem maximalen Abstand zwischen der beweglichen Elektrode und dem Elektret  $d_{2,max}$ . Beide Parameter haben einen entscheidenden Einfluss auf die Gesamtdicke des Systems. Für das System auf der linken Seite in Abbildung 4.5 ist die Gesamtdicke  $d_4(t)$  des Systems durch folgende Gleichung beschreibbar:

$$d_4(t) = n(d_1 + d_3 + d_2(t)) \quad (4.19)$$

Hierbei ist  $d_1$  die Dicke der Elektretfolie,  $d_3$  die Dicke der Elektrodenfolie und  $d_2(t)$  der Abstand zwischen Elektretfolie und Elektrodenfolie. Die maximale Dicke ergibt sich, wenn  $d_2(t) = d_{2,max}$ :

$$d_{4,max} = n(d_1 + d_3 + d_{2,max}(n)) \quad (4.20)$$

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Dielektrizitätszahl von PVDF	$\epsilon_r$	13	–
Oberflächenladungsdichte	$\sigma$	0,0000156	$\frac{C}{m^2}$
Elektrodenfläche	$A$	0,002025	$m^2$
Dicke der PVDF-Folie	$d_1$	28	$\mu m$
Dicke der Aluminiumfolie	$d_3$	10	$\mu m$
Maximale Dicke	$d_{4,max}$	1	$mm$
Belastungsfrequenz	$f$	1	$Hz$

Tabelle 4.1: Randbedingungen für die Simulation des Elektrostatischen Energy Harvesters [32][15]

Daraus ergibt sich für den maximalen Elektrodenabstand  $d_{2,max}(n)$  in Abhängigkeit von  $d_{4,max}$  und  $n$ :

$$d_{2,max}(n) = \frac{d_{4,max} - n(d_1 + d_3)}{n} \quad (4.21)$$

Das bedeutet, dass der maximale Elektrodenabstand  $d_{2,max}(n)$  umso kleiner wird, je mehr Lagen  $n$  der Energy Harvester bei vorgegebener maximaler Gesamtdicke  $d_{4,max}$  hat. Des Weiteren wird daraus ersichtlich, dass der Gesamthub – Änderung zwischen minimaler  $d_{4,min}(0) = n(d_1 + d_3)$  und maximaler Gesamtdicke  $d_{4,max}(t_{max}) = n(d_1 + d_3 + d_{2,max}(n))$  – indirekt proportional zur Lagenanzahl  $n$  ist.

### 4.2.3 Simulation

Die in Abschnitt 4.2.2 bestimmte Gleichung 4.15 ist unter Verwendung der Abhängigkeit zwischen der Lagenanzahl  $n$  und maximaler Elektrodenabstand  $d_{20}(n)$  aus Gleichung 4.21 durch numerische Integration in MATLAB für verschiedene Randbedingungen lösbar. In Tabelle 4.1 sind die Randbedingungen für die Simulationen angegeben, die sich aus den im praktischen Teil verwendeten Materialien (vgl. Kapitel 5.1) ergeben. Die Änderung des Luftspalts  $d_2(t)$  wird durch eine abschnittsweise definierte lineare Funktion beschrieben, die die Bewegung der im praktischen Teil verwendeten pneumatischen Presse abbildet (vgl. Kapitel 5.2.1):

1.  $d_2(t) = d_{20}(n)$  für  $0 \leq t < t_1, t_1 = 0.1s$
2.  $d_2(t) = d_{20}(n)(1 - \frac{t-t_1}{t_2-t_1})$  für  $t_1 \leq t < t_2, t_2 = t_1 + \Delta t \frac{nd_{20}(n)}{d_{20}(1)}$  mit  $\Delta t = 0.15s$
3.  $d_2(t) = 0$  für  $t_2 \leq t < t_3, t_3 = 0.55s$
4.  $d_2(t) = d_{20}(n) \frac{t-t_3}{t_4-t_3}$  für  $t_3 \leq t < t_4, t_4 = t_3 + \Delta t \frac{nd_{20}(n)}{d_{20}(1)}$  mit  $\Delta t = 0.15s$
5.  $d_2(t) = d_{20}(n)$  für  $t_4 \leq t \leq t_{max}, t_{max} = 1s$

Der Luftspalt ist anfangs maximal ( $d_{20}(n)$ ) und sinkt ab dem Zeitpunkt  $t_1$  linear auf Null zum Zeitpunkt  $t_2$ . Ab dem Zeitpunkt  $t_3$  vergrößert sich der Luftspalt wieder linear bis er zum Zeitpunkt  $t_4$  wieder den Ausgangszustand erreicht hat. Die Geschwindigkeit der pneumatischen Presse ist konstant. Daher sind die Zeiten  $t_2$  und  $t_3$  abhängig von der maximalen Größe des Luftspalts  $d_{20}(n)$  (s. Abbildung 4.6). Die Differentialgleichung wurde für eine maximalen Dicke  $d_{4,max}$  von 1 mm gelöst.

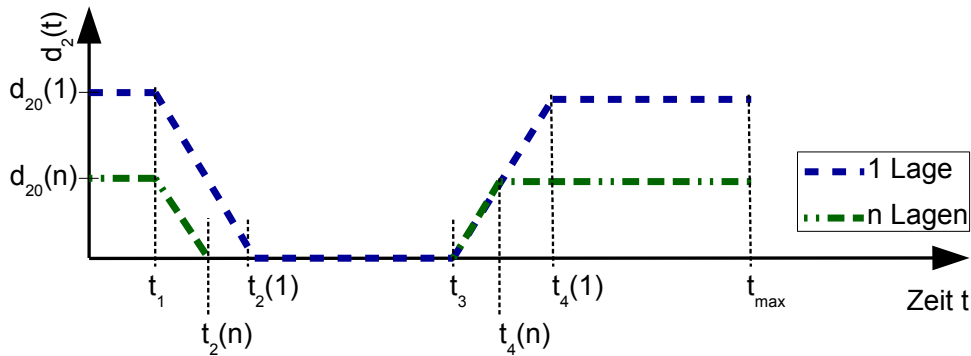


Abbildung 4.6: Funktionsverlauf des Luftspalts  $d_2(t)$  eines Belastungszyklus für 1 und n Lagen

Wenn die maximale Dicke  $d_4$  auf 1 mm begrenzt ist, ergibt sich unter Verwendung der in Tabelle 4.1 angegebenen Werten nach Gleichung 4.21 die maximale Lagenanzahl  $n = 26$ . Die Ergebnisse aus dieser Berechnung können auf beliebige andere Werte für  $d_4$  übertragen werden. Die numerische Lösung der Differentialgleichung 4.15 wurde mithilfe der Runge-Kutta-Methode mit der in MATLAB integrierten Funktion „ode45“ berechnet [37]. Die Simulationszeit wurde auf  $t = 1 s$  festgelegt. In Abbildung 4.7 ist die Lösung der Differentialgleichung unter Verwendung eines Lastwiderstands  $R$  von 1 MΩ zu sehen. Das Diagramm zeigt den Spannungsverlauf am Lastwiderstand über die Zeit für unterschiedliche Lagenzahlen, wenn sich der Abstand  $d_2(t)$  ändert (vgl. Abbildung 4.6). Es ist erkennbar, dass die Spannung

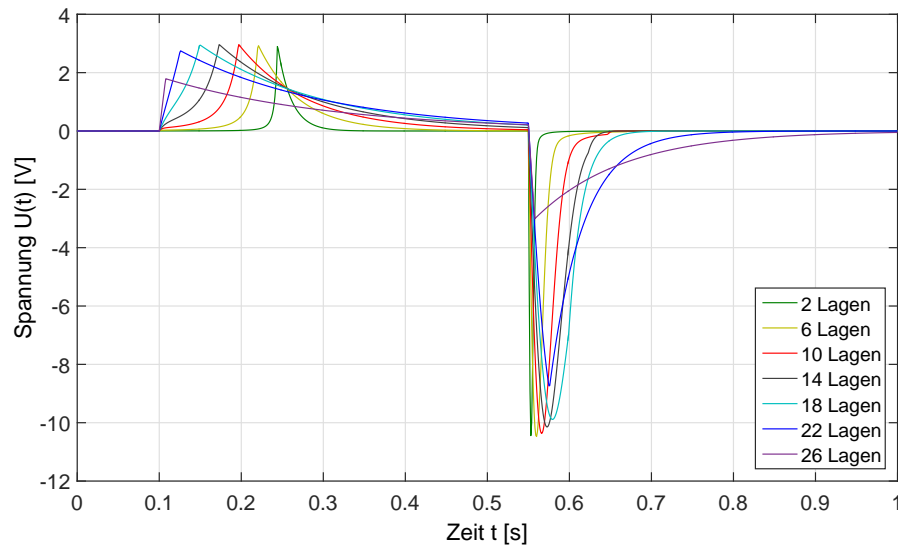


Abbildung 4.7: Simulierter Spannungsverlauf  $U(t)$  des Elektrostatischen Systems für unterschiedliche Lagenzahlen  $n$  an einem Lastwiderstand von  $1\text{ M}\Omega$

anfangs sehr schnell steigt, wenn der Abstand zwischen der beweglichen Elektrode und dem Elektret verringert wird. Der positive Spannungspike ist umso höher, je niedriger die Lagenanzahl ist. Im Gegensatz dazu steigt die Dauer der Spannungsantwort mit steigender Lagenanzahl. Außerdem erfolgt der Spannungsanstieg umso früher, je mehr Lagen das System hat. Nach dem jeweiligem Spannungspike sinkt für die unterschiedlichen Konfigurationen die Spannung mit einem negativem exponentiellem Verhalten wieder auf Null ab. Dieser Teil der Kurve entspricht einer typischen kapazitiven Entladungskurve und wird maßgeblich durch die Lagenanzahl ( $C_{max} \propto n$ ) beeinflusst. Der negative Spannungspike entsteht durch das erneute Vergrößern des Abstands  $d_2$ . Wiederrum ist die Amplitude umso höher, je niedriger die Lagenanzahl ist. Der Zeitpunkt des negativen Spannungspikes ist für alle Konfigurationen nahezu gleich.

Aus den Spannungskurven kann mit Hilfe der Gleichung 4.18 die am Lastwiderstand  $R$  umgesetzte elektrische Energie berechnet werden. Um die maximale Energiewandlung zu gewährleisten, ist eine Anpassung des Lastwiderstandes an den Innenwiderstand der Anordnung notwendig. Zur Ermittlung des passenden Lastwiderstands und dessen Einfluss auf die optimale Konfiguration wurde für jede mögliche Lagenanzahl die Simulation für Lastwiderstände von  $0,5$  bis  $100\text{ M}\Omega$  durchgeführt.

Abbildung 4.8 zeigt für unterschiedliche Lastwiderstände die resultierende elektrische Energie bei zunehmender Lagenanzahl. Werden sehr große Lastwiderstände ( $> 20 \text{ M}\Omega$ ) verwendet, ist nur eine geringe Energiewandlung möglich. Ebenso wird deutlich, dass der Punkt maximaler Energiewandlung durch den Lastwiderstand beeinflusst wird. Je größer der Lastwiderstand, desto niedriger ist die optimale Lagenanzahl. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurde ein praktisches Experiment

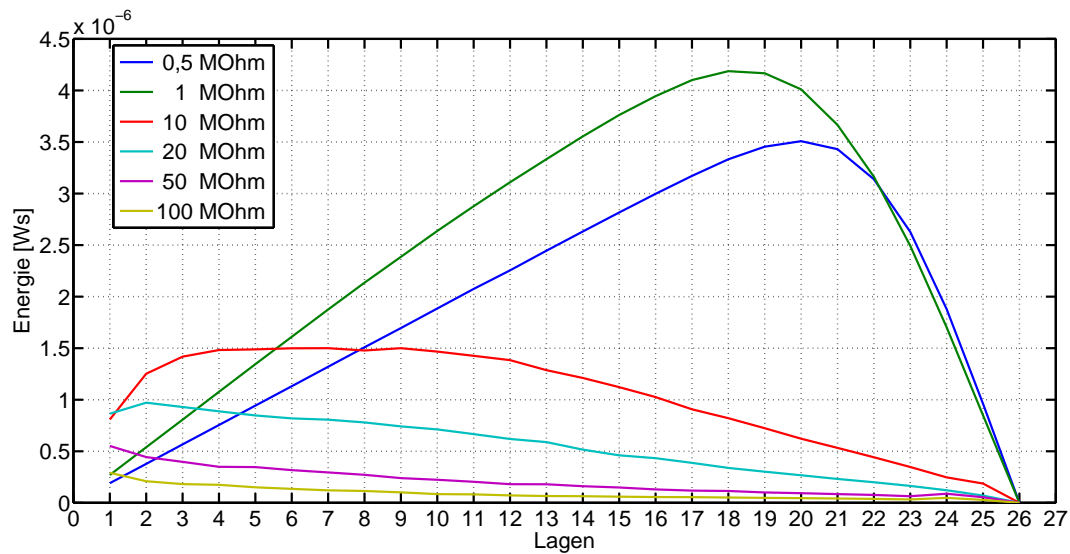


Abbildung 4.8: Simulierte Energie des Elektrostatischen Systems für unterschiedliche Lastwiderstände über der Lagenzahlen

entworfen, um die Simulationsergebnisse zu überprüfen (s. Kapitel 5.1.1 und 6.1).

### 4.3 Piezoelektrisches Energy Harvesting System

Die theoretische Beschreibung des Piezoelektrischen Energy Harvesting System erfolgt, wie das Elektrostatische, unterteilt in Grundlagen der piezoelektrischen Energiewandlung, der mathematischen Beschreibung und Simulation der Energiewandlung.

### 4.3.1 Grundlagen der piezoelektrischen Energiewandlung

Folgende Vektorformeln beschreiben den Zusammenhang zwischen mechanischen und elektrischen Größen des piezoelektrischen Effekts [55][24]:

$$\vec{D}(t) = \underline{d} \cdot \vec{T}(t) + \underline{\epsilon} \cdot \vec{E}(t) \quad (4.22)$$

$$\vec{S}(t) = \underline{s} \cdot \vec{T}(t) + \underline{d} \cdot \vec{E}(t) \quad (4.23)$$

Hierbei steht der Vektor  $\vec{D}(t)$  für die elektrische Verschiebungsdichte,  $\vec{T}(t)$  für die am Material anliegenden mechanischen Spannungen,  $\vec{E}(t)$  für die am Material anliegende elektrische Feldstärke und  $\vec{S}(t)$  für die mechanische Dehnung. Die Matrix  $\underline{\epsilon}$  gibt die Dielektrizitätszahlen und Matrix  $\underline{d}$  die piezoelektrischen Koeffizienten an. Matrix  $\underline{s}$  ist die elastische Nachgiebigkeitsmatrix des Materials. Die Parameter der elastischen Nachgiebigkeit lassen sich durch die Inversion des entsprechenden E-Moduls bestimmen. Die Matrix der piezoelektrischen Koeffizienten  $\underline{d}$  hat für PVDF folgende Form [54] [31]:

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4.24)$$

Die einzelnen Koeffizienten von  $d_{ij}$  geben für einzelne Raumrichtungen der mechanischen Spannung die spezifische elektrische Antwort einer definierten Raumrichtung an. Die Achsenrichtungen der piezoelektrischen Koeffizienten sind, wie in Abbildung 4.9 dargestellt, festgelegt. Das bedeutet beispielsweise, dass der Parameter  $d_{31}$  für eine in Richtung 1 wirkende mechanische Spannung das elektrische Signal in Richtung 3 angibt. Man bezeichnet dies als piezoelektrischen Quereffekt. Der sogenannte piezoelektrische Längseffekt (mechanische Spannung und elektrisches Feld sind parallel) ist durch den Koeffizienten  $d_{33}$  bestimmt. Die Parameter  $d_{15}$  und  $d_{24}$  bezeichnen weiterhin den piezoelektrischen Schereffekt [55]. In den nächsten beiden Unterkapiteln wird die Energiewandlung der PVDF-Folie über den piezoelektrischen Längseffekt ( $d_{33}$ ) bzw. den Quereffekt ( $d_{31}$ ) für zeitlich konstante Größen näher betrachtet. In Tabelle 4.2 sind hierzu die wesentlichen Kenngrößen von PVDF zusammengefasst [32].



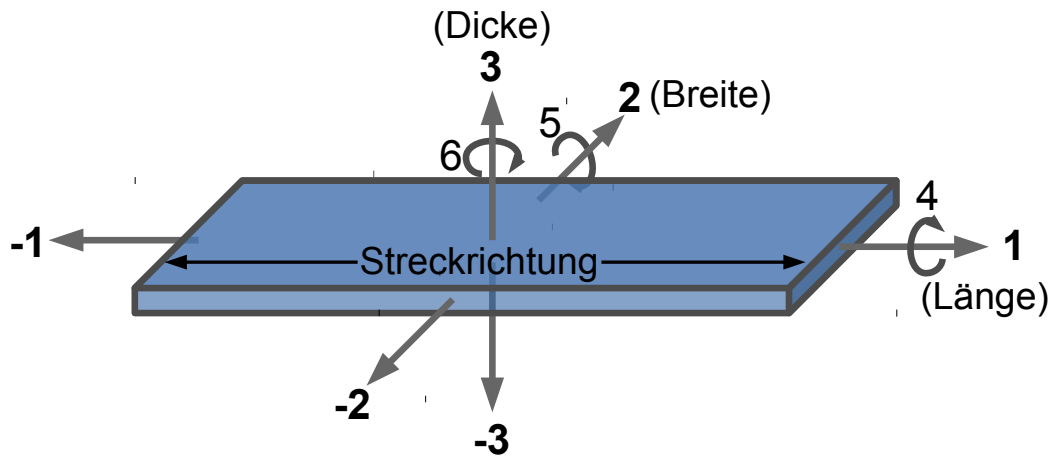


Abbildung 4.9: Definition der Achsen des piezoelektrischen Effekts bei monoaxial gereckter PVDF [38]

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Piezoelektrischer Koeffizient	$d_{33}$	35	$\frac{pC}{N}$
Piezoelektrischer Koeffizient	$d_{31}$	25	$\frac{pC}{N}$
Piezoelektrischer Koeffizient	$d_{32}$	2	$\frac{pC}{N}$
Dielektrizitätszahl	$\epsilon_r$	13	—
Dielektrische Leitfähigkeit	$\epsilon_{33} = \epsilon_r \epsilon_0$	1,15	$10^{-10} \frac{As}{Vm}$
E-Modul	$Y$	3	$GPa$
Foliendicke	$d$	28	$\mu m$

Tabelle 4.2: Mechanische, elektrische und piezoelektrische Parameter von PVDF-Folie [32]

### Piezelektrischer Längseffekt

Der piezelektrische Längseffekt liegt vor, wenn auf ein piezelektrisches Material eine mechanische Spannung in Richtung des elektrischen Feldes wirkt ( $T$  parallel zu  $E$ ). Dies wird auch durch die Indizes der piezelektrischen Koeffizienten deutlich, die beim Längseffekt gleich sind ( $d_{33}$ ). Bei PVDF-Folie sind die Elektroden üblicherweise vollflächig auf der Ober- und Unterseite der Folie angebracht. Bei einer senkrechten Krafteinwirkung auf die Folienoberfläche spricht man vom piezelektrischen Längseffekt. Wird nur der piezelektrische Längseffekt betrachtet, vereinfachen sich die Formeln 4.22 und 4.23, da die meisten Komponenten den Wert Null annehmen [55] [24].

$$D_3 = d_{33}T_3 + \epsilon_{33}E_3 \quad (4.25)$$

und

$$S_3 = s_{33}T_3 + d_{33}E_3 \quad (4.26)$$

Wenn das Material im Leerlauf betrieben wird, lässt sich Gleichung 4.25 weiter vereinfachen zu:

$$D_3 = 0; \Rightarrow d_{33}T_3 + \epsilon_{33}E_3 = 0; \Rightarrow E_3 = -\frac{d_{33}T_3}{\epsilon_{33}} \quad (4.27)$$

Wirkt auf das piezelektrische Material der Fläche  $A$  eine homogene Druckkraft  $F_3$ , so berechnet sich die resultierende mechanische Dehnung  $T_3$  durch die Formel  $T_3 = \frac{F_3}{A}$ . Ist die Folienfläche sehr viel größer als die Foliendicke ( $A \gg d$ ), kann das System näherungsweise als Plattenkondensator betrachtet werden und bei gegebener Foliendicke  $d$  die zu erwartende elektrische Leerlaufspannung  $U_{LL}$  berechnet werden: [38]

$$U_{LL} = -d \frac{d_{33}T_3}{\epsilon_{33}} = -d \frac{d_{33}F}{\epsilon_{33}A} = -\frac{d_{33}F}{C_0} \text{ mit } C_0 = \epsilon_{33} \frac{A}{d} \quad (4.28)$$

Mit Gleichung 4.28 lässt sich mit den Werten aus Tabelle 4.2 die Leerlaufspannung  $U_{LL}$  in Abhängigkeit der Fläche  $A$  und der Druckkraft  $F$  berechnen. In Tabelle 4.3 sind für PVDF-Folien der Flächen  $A$  von 5, 25 und 100  $cm^2$  und Kräfte  $F$  von 50, 250 und 1000  $N$  jeweils die mechanische Dehnung  $S$ , die resultierende Kapazität  $C_0$ , die Leerlaufspannung  $U_{LL}$  und das Produkt  $\frac{1}{2}C_0U_{LL}^2 \cdot 10^{-6}$  angegeben. Das Produkt entspricht der, durch den piezelektrischen Effekt erzeugten elektrischen Energie. Es wird deutlich, dass eine Nutzung des piezelektrischen Längseffekts folgende Nachteile hat:

A [cm <sup>2</sup> ]	F[N]	S <sub>3</sub> [°/∞]	C <sub>0</sub> [nF]	U <sub>LL</sub> [V]	$\frac{1}{2}C_0U_{LL}^2 10^{-6}$
5	50	$3 \cdot 10^{-4}$	2,1	0,9	0,007
25	50	$0,7 \cdot 10^{-4}$	10,3	0,2	0,001
100	50	$0,2 \cdot 10^{-4}$	41,1	0,04	0,00004
5	250	$20 \cdot 10^{-4}$	2,1	4,3	0,02
25	250	$3 \cdot 10^{-4}$	10,3	0,9	0,004
100	250	$0,9 \cdot 10^{-4}$	41,1	0,2	0,001
5	1000	$70 \cdot 10^{-4}$	2,1	17	0,3
25	1000	$10 \cdot 10^{-4}$	10,3	3,4	0,06
100	1000	$3 \cdot 10^{-4}$	41,1	0,9	0,015

Tabelle 4.3: Mechanische Dehnung  $S$ , Kapazität  $C_0$ , Leerlaufspannung  $U_{LL}$  und Produkt  $\frac{1}{2}C_0U_{LL}^2 10^{-6}$  für den piezoelektrischen Längseffekt bei PVDF-Folie der Flächen  $A$  von 5, 25 und 100 cm<sup>2</sup> und Kräfte  $F$  von 50, 250 und 1000 N

- In den meisten Fällen wird nur eine geringe Leerlaufspannung erzeugt
- Je größer die Fläche, desto geringer ist die Leerlaufspannung
- Die erzeugte Energie ist sehr gering

Da die Leerlaufspannung  $U_{LL}$  indirekt proportional zur Kapazität  $C_0$  ist, sinkt sie mit zunehmender Fläche  $A$  (d.h. mechanische Spannung sinkt). Nach einer Veröffentlichung der Firma Measurement Specialities [7] kommt es bei einer flächigen Krafteinwirkung auf die PVDF-Folie praktisch zu keiner Energiewandlung durch den piezoelektrischen Längseffekt (es erfolgt lediglich eine Energiewandlung durch den piezoelektrischen Quereffekt, s. nachfolgendes Kapitel). Die Gründe hierfür liegen in dem extremen Verhältnis von Folienoberfläche zu Folienquerschnittsfläche, das meist in einer Größenordnung von 1000:1 liegt [38].

### Piezoelektrischer Quereffekt

Der Quereffekt wirkt bei den meisten piezoelektrischen Materialien gleich stark in alle Richtungen senkrecht zur E-Feld-Richtung (d.h.  $d_{31} = d_{32}$ ) [50]. Monoaxial gereckte PVDF-Folie unterscheidet sich hier von anderen piezoelektrischen Materialien, da der Quereffekt in Richtung der Verstreckung deutlich größer ist (d.h.  $d_{31} \gg d_{32}$ , siehe Tabelle 4.2). Nachfolgend wird dieser Effekt näher betrachtet. Es

gelten folgende Gleichungen:

$$D_3 = d_{31}T_1 + \epsilon_{33}E_3 \quad (4.29)$$

und

$$S_1 = s_{31}T_1 + d_{31}E_3 \quad (4.30)$$

In der gleichen Weise wie beim Längseffekt lässt sich für die Leerlaufspannung  $U_{LL}$  mit  $T_1 = \frac{F}{A_Q}$  und  $A_Q = bd$  (Folienquerschnittsfläche = Folienbreite \* Foliendicke) folgende Formel angeben:

$$U_{LL} = -d \frac{d_{31}T_1}{\epsilon_{33}} = -d \frac{d_{31}F}{\epsilon_{33}A_Q} = -\frac{d_{31}F}{\epsilon_{33}b} \quad (4.31)$$

Es ergeben sich, für die in Tabelle 4.3 verwendeten Flächen, Kräfte und quadratische PVDF-Folien ( $A = b^2$ ), folgende Werte aus Tabelle 4.4. Es ist zu erkennen,

A [cm <sup>2</sup> ]	F [N]	S <sub>1</sub> [°/∞]	C <sub>0</sub> [nF]	U <sub>LL</sub> [V]	$\frac{1}{2}C_0U_{LL}^2 10^{-3}$
5	50	0,27	2,1	486	0,25
25	50	0,12	10,3	217	0,25
100	50	0,06	41,1	109	0,25
5	250	1,35	2,1	2431	6,1
25	250	0,6	10,3	1087	6,1
100	250	0,3	41,1	543	6,1
5	1000	5,41	2,1	9722	97
25	1000	2,41	10,3	4248	97
100	1000	1,21	41,1	2174	97

Tabelle 4.4: Mechanische Dehnung  $S$ , Kapazität  $C_0$ , Leerlaufspannung  $U_{LL}$  und Produkt  $\frac{1}{2}C_0U_{LL}^2 10^{-6}$  für den piezoelektrischen Quereffekt bei PVDF-Folie der Flächen  $A$  von 5, 25 und 100 cm<sup>2</sup> und Kräfte  $F$  von 50, 250 und 1000 N

dass die Leerlaufspannung des Quereffekts bei gleicher Folienfläche  $A$  und gleichen Kräften  $F$  deutlich höher als die des Längseffekts ausfällt. Das Produkt aus Leerlaufspannung und Kapazität ist drei Größenordnungen größer als beim Längseffekt. Zwar ist die Leerlaufspannung bei größeren Flächen niedriger, aber das Produkt aus Kapazität und Leerlaufspannung ist konstant. Entscheidend für die deutlich höhere Energiewandlung ist das sehr viel größere Verhältnis der Kraft zur Fläche, auf die

die Kraft einwirkt. Beim Längseffekt wirkt die Kraft auf die gesamte Folienoberfläche, wohingegen sie beim Quereffekt auf die, oft um den Faktor 1000 kleinere, Querschnittfläche von Folienbreite und -höhe wirkt. Somit wird eine 1000-fach größere Dehnung bzw. Stauchung des Materials bei gleicher Kraft erzeugt. Werden statt quadratischer Folien, sehr lange und dünne Folienstreifen eingesetzt, so kann dieser Umstand noch besser ausgenutzt werden.

Im folgenden wird das Piezoelektrische Energy Harvesting System unter Berücksichtigung des piezoelektrischen Quereffekts modelliert.

### **4.3.2 Modellierung des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems**

Die mathematische Beschreibung des piezoelektrischen Effekts des Wickelkondensators kann durch die in Kapitel 4.3.1 angegebenen Formeln 4.29 und 4.30 erfolgen. Danach wird umso mehr mechanische in elektrische Energie umgewandelt, je länger die PVDF-Folie bei konstanter Folienbreite, -höhe und mechanischer Spannung ist.

Im vorliegenden System ist die PVDF-Folie zu einem Wickelkondensator verarbeitet und die Dehnung wird mittels eines Scharniers im Inneren hervorgerufen. Die Energiewandlung wird daher unter anderem von folgenden Umständen beeinflusst: Wie wird die Kraft durch die Umfangsänderung des Scharniers auf den Wickelkondensator übertragen? Wie stark werden die einzelnen Lagen des Wickelkondensators gedehnt? Welche Wirkung hat die Aluminiumfolie auf die mechanische Dehnung des Wickelkondensators? In der mathematischen Beschreibung wird versucht, diese Fragestellungen durch dimensionslose Parameter zu erfassen, die es erlauben, die Simulation an das reale Verhalten des Systems anzupassen. Für die Modellierung des Systems wird die mathematische Beschreibung der beiden Teilsysteme – Wickelkondensator und Scharnier – benötigt. Anschließend werden diese miteinander verknüpft.

#### **Modellierung des Wickelkondensators**

Für das Piezoelektrische System kann das in Abbildung 4.10 gezeigte Funktionsprinzip aufgestellt werden. Für die mathematische Beschreibung des Wickelkon-

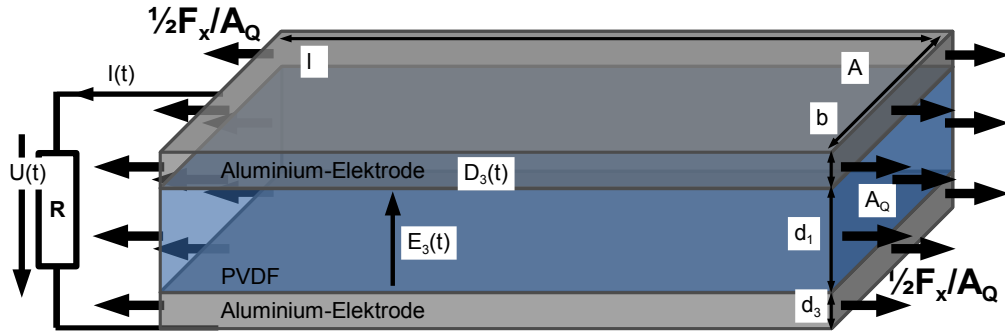


Abbildung 4.10: Schematischer Aufbau des Piezoelektrischen Systems der Fläche  $A$ , bestehend aus einer PVDF-Folie der Dicke  $d_1$ , zwei Aluminiumelektroden der Dicke  $d_2$ . An den beiden kurzen Querschnittsflächen  $A_Q$  wirkt eine Kraft  $\frac{1}{2}F_x$ , die die Folien dynamisch dehnt. Das PVDF-Elektret hat ein inneres elektrisches Feld  $E_3$  und elektrische Flussdichte  $D_3$ . Die Elektroden sind über einen Widerstand  $R$  miteinander verbunden.

ensors muss einerseits die elektrische und andererseits die mechanische Beschreibung berücksichtigt werden, da diese über den piezoelektrischen Effekt miteinander gekoppelt sind. Für die Modellierung wird die maximale Dehnung der PVDF-Folie als sehr gering angenommen ( $S_{max} \leq 1\%$ ). Die Dicke  $d_1$  der Folie kann daher als konstant gelten. Die Kapazität  $C_0 = \epsilon_{33} \frac{nA}{d_1}$  des Wickelkondensators ist ebenfalls konstant.

### Elektrische Modellierung des Wickelkondensators

Das Ersatzschaltbild der PVDF-Folie kann als Parallelschaltung einer Stromquelle, Kapazität  $C_0$  und Widerstand  $R_{par,p}$  angegeben werden [49]. Der Widerstand  $R_{par,s}$  in Reihe zu diesen Komponenten beschreibt die ohmschen Verluste der Zuleitungen und Kontakte. Wird an das Piezoelektrische System ein resistiver Lastwiderstand  $R$  angeschlossen (vgl. Abbildung 4.10), ergibt sich das Ersatzschaltbild aus Abbildung 4.11. Der Strom  $I(t)$  im Widerstand  $R$  kann durch folgende Gleichung angegeben werden:

$$I(t) = I_0(t) - I_p(t) \quad (4.32)$$

Für  $I_0(t)$  gilt nach Gleichung 4.29 und mit  $Q_P(t) = D_3(t)A$ :

$$I_0(t) = \frac{d}{dt} Q_P(t) = A \frac{d}{dt} D_3(t) = A \frac{d}{dt} (d_{31} T_{1,P}(t) + \epsilon_{33} E_3(t)) \quad (4.33)$$

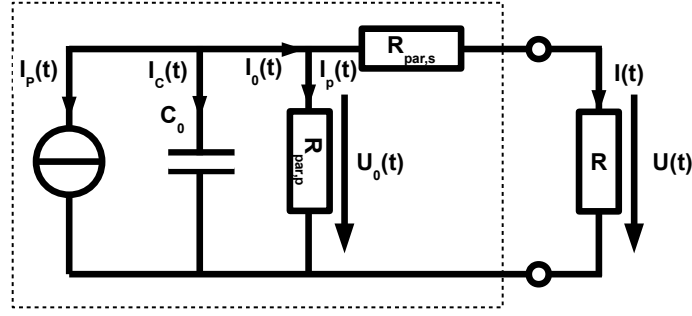


Abbildung 4.11: Elektrisches Ersatzschaltbild des Piezoelektrischen Energy Harvesters [49]

Für  $I(t)$  folgt damit:

$$I(t) = A \frac{d}{dt} (d_{31} T_{1,P}(t) + \epsilon_{33} E_3(t)) - I_p(t) = A \left( d_{31} \frac{d}{dt} T_{1,P}(t) + \epsilon_{33} \frac{d}{dt} E_3(t) \right) - I_p(t) \quad (4.34)$$

Für das elektrische Feld  $E_3$  am Kondensator  $C_0$  gilt:

$$E_3(t) = \frac{U_0(t)}{d_1} = \frac{(R + R_{par,s}) I(t)}{d_1} \text{ mit } U_0(t) = (R + R_{par,s}) I(t) \quad (4.35)$$

Und mit  $I_p(t) = \frac{U_0(t)}{R_{par,p}} = \frac{R + R_{par,s}}{R_{par,p}} I(t)$  wird Gleichung 4.34 zu:

$$I(t) = A \left( d_{31} \frac{d}{dt} T_{1,P}(t) + \frac{\epsilon_{33} (R + R_{par,s})}{d_1} \frac{d}{dt} I(t) \right) - \frac{R + R_{par,s}}{R_{par,p}} I(t) \quad (4.36)$$

Für einen mehrlagigen Wickelkondensator mit  $n$  PVDF-Lagen ist  $I(t)$ :

$$I(t) = nA \left( d_{31} \frac{d}{dt} T_{1,P}(t) + \frac{\epsilon_{33} (R + R_{par,s})}{d_1} \frac{d}{dt} I(t) \right) - \frac{R + R_{par,s}}{R_{par,p}} I(t) \quad (4.37)$$

Im Folgenden wird für den Piezoelektrischen Energy Harvester statt der Lagen- die Wicklungsanzahl verwendet. Eine Wicklung ist gleichbedeutend mit vier Lagen, bei einem Wickelkondensator der flach zusammengedrückt ist. Gleichung 4.37 wird mit dem Zusammenhang zwischen Wicklungsanzahl  $w$  und Lagenanzahl  $n$  mit  $n = 4w$  zu:

$$I(t) = 4wA \left( d_{31} \frac{d}{dt} T_{1,P}(t) + \frac{\epsilon_{33} (R + R_{par,s})}{d_1} \frac{d}{dt} I(t) \right) - \frac{R + R_{par,s}}{R_{par,p}} I(t) \quad (4.38)$$

Um diese Differentialgleichung 4.38 für  $I(t)$  zu lösen, muss die mechanische Spannung  $T_{1,P}(t)$  im Weiteren genauer betrachtet werden.

### Mechanische Modellierung des Wickelkondensators

Im Wickelkondensator herrscht ein Kräftegleichgewicht, da die Gesamtkraft  $F_1(t)$  in Richtung 1 die Summe der Kräfte an den  $n$  Lagen der PVDF- und Aluminiumfolie ( $F_{1,P}(t)$  und  $F_{1,A}(t)$ ) ist:

$$F_1(t) = xn (F_{1,P}(t) + F_{1,A}(t)) = 4xw (F_{1,P}(t) + F_{1,A}(t)) \quad (4.39)$$

Die Variable  $x$  wird als dimensionsloser Korrekturfaktor eingeführt ( $\frac{1}{4w} < x \leq 1$ ). Hiermit kann in der späteren Betrachtung der Einfluss der nicht perfekten Fertigung in der mathematischen Beschreibung berücksichtigt werden (s. Kapitel 5.1.2). Für die Kraft  $F_1(t)$  gilt mit  $T_{1,P}(t)$  als mechanische Spannung in der PVDF-Folie und  $T_{1,A}(t)$  als mechanische Spannung in der Aluminiumfolie:

$$\begin{aligned} F_{1,P}(t) &= A_{Q,P} T_{1,P}(t) \\ F_{1,A}(t) &= A_{Q,A} T_{1,A}(t) \end{aligned} \quad (4.40)$$

Die E-Moduli der PVDF- und Aluminiumfolie ( $Y_P = 3 \text{ GPa}$  und  $Y_A = 70 \text{ GPa}$ ) unterscheiden sich um eine Größenordnung. Der Einfluss der Aluminiumfolie auf die Gesamtbetrachtung ist daher nicht vernachlässigbar. Aus den Gleichungen 4.39 und 4.40 ergibt sich:

$$\begin{aligned} F_1(t) &= 4xw (A_{Q,P} T_{1,P}(t) + A_{Q,A} T_{1,A}(t)) \\ T_{1,A}(t) &= \frac{\frac{F_1(t)}{4xw} - A_{Q,P} T_{1,P}(t)}{A_{Q,A}} \end{aligned} \quad (4.41)$$

Die mechanische Dehnung einer Lage der PVDF-Folie  $S_{1,P}(t)$  ist durch die Gleichung 4.30 gegeben, d.h.:  $S_{1,P}(t) = s_{31} T_{1,P}(t) + d_{31} E_3(t)$ . Mit Gleichung 4.35 und  $s_{31} = \frac{1}{Y_P}$  folgt:

$$S_{1,P}(t) = \frac{T_{1,P}(t)}{Y_P} + \frac{(R + R_{par,s}) d_{31}}{d_1} I(t) \quad (4.42)$$

Im Wickelkondensator liegen die PVDF- und die Aluminiumfolie in einem Verbund vor, daher ist die Dehnung  $S_1(t)$  der Folien gegeben durch  $S_{1,P}(t) = S_{1,A}(t) = S_1(t)$  und für die mechanische Spannung  $T_{1,P}$  folgt:

$$\frac{T_{1,P}(t)}{Y_P} + \frac{(R + R_{par,s}) d_{31}}{d_1} I(t) = \frac{\frac{F_1(t)}{4xw} - A_{Q,P} T_{1,P}(t)}{Y_A A_{Q,A}} \quad (4.43)$$

$$T_{1,P}(t) = \frac{\frac{F_1(t)}{4xw Y_A A_{Q,A}} - \frac{(R + R_{par,s}) d_{31}}{d_1} I(t)}{\frac{1}{Y_P} + \frac{A_{Q,P}}{Y_A A_{Q,A}}} \quad (4.44)$$



Die Ableitung von Gleichung 4.44 kann in die Gleichung 4.38 eingesetzt werden:

$$I(t) = 4wA \left( d_{31} \frac{\frac{d}{dt} F_1(t) - \frac{(R+R_{par,s})d_{31}}{d_1} \frac{d}{dt} I(t)}{\frac{1}{\bar{Y}_P} + \frac{A_{Q,P}}{\bar{Y}_A A_{Q,A}}} + \frac{\varepsilon_{33}(R+R_{par,s})}{d_1} \frac{d}{dt} I(t) \right) - \frac{(R+R_{par,s})}{R_{par,p}} I(t) \quad (4.45)$$

Diese Gleichung nach  $\frac{d}{dt} I(t)$  aufgelöst, ergibt:

$$\frac{d}{dt} I(t) = \frac{1}{wC_0(R+R_{par,s})} \frac{\frac{Ad_{31}}{x \frac{Y_A}{Y_P} A_{Q,A} + x A_{Q,P}} \frac{d}{dt} F_1(t) - \left(1 + \frac{(R+R_{par,s})}{R_{par,p}}\right) I(t)}{\frac{d_{31}^2}{\frac{\varepsilon_{33}}{Y_P} + \frac{\varepsilon_{33} A_{Q,P}}{\bar{Y}_A A_{Q,A}}} - 1} \quad (4.46)$$

Der Parameter  $C_0 = \frac{4\varepsilon_{33}A}{d_1}$  entspricht der Kapazität einer Wicklung (die Kondensatorfläche einer Wicklung  $w$  entspricht der vierfachen Fläche einer Lage  $n$ ). Da im Nenner für den ersten Term  $\frac{d_{31}^2}{\frac{\varepsilon_{33}}{Y_P} + \frac{\varepsilon_{33} A_{Q,P}}{\bar{Y}_A A_{Q,A}}} \approx 10^{-3} \ll 1$  gilt, kann in erster Näherung angenommen werden:

$$\frac{d}{dt} I(t) = -\frac{1}{wC_0(R+R_{par,s})} \left( \frac{Ad_{31}}{x \left( \frac{Y_A}{Y_P} A_{Q,A} + A_{Q,P} \right)} \frac{d}{dt} F_1(t) - \left(1 + \frac{(R+R_{par,s})}{R_{par,p}}\right) I(t) \right) \quad (4.47)$$

Die mechanische Kraft  $F_1(t)$  wird über das Scharnier in den Wickelkondensator übertragen, wie im folgenden Unterpunkt näher erläutert wird.

### Modellierung des Scharniers

Abbildung 4.12 zeigt, dass die Geometrie des Scharniers vereinfacht als Dreieck angenommen werden kann. Maßgeblich für das System ist die Umfangsänderung und die Kraftverteilung am Scharnier in Abhängigkeit der Geometrie.

### Umfangsänderung

Die Schenkel des Scharniers  $a$  und  $b$  sind die Katheten und die kürzeste Verbindung zwischen den beiden freien Enden des Scharniers ist die Hypotenuse  $c$  des Dreiecks. Der Umfang  $u$  des Scharniers ist die Summe der zwei Schenkel  $a$  und  $b$  und der, von der Höhe  $h$  abhängigen Hypotenuse  $c$ .

$$u_S(h) = a + b + c(h) \quad (4.48)$$

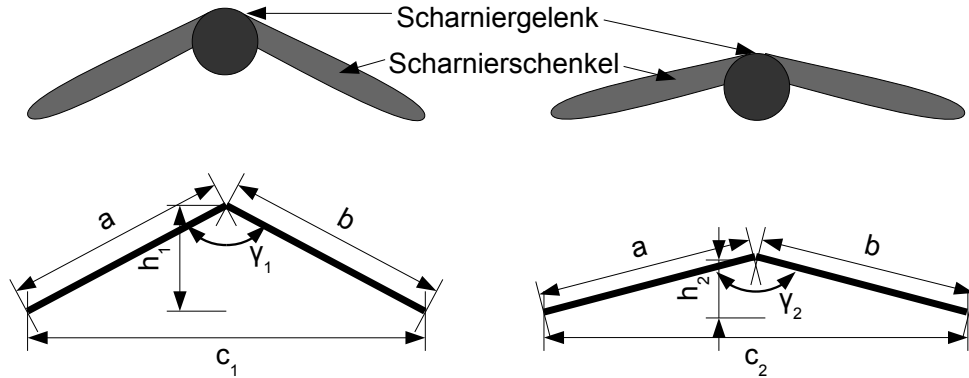


Abbildung 4.12: Geometrie der Scharniere für unterschiedliche Öffnungswinkel  $\gamma$  und Höhe  $h$ , wobei gilt:  $\gamma_1 < \gamma_2$ ,  $h_1 > h_2$  und  $c_1 < c_2$

Die Hypotenuse  $c$  kann mit den geometrischen Beziehungen aus Abbildung 4.12 in Abhängigkeit der Höhe  $h$  bestimmt werden:

$$c(h) = \sqrt{a^2 - h^2} + \sqrt{b^2 - h^2} \quad (4.49)$$

Der Umfang  $u_S$  des Scharniers wird zu:

$$u_S(h) = a + b + \sqrt{a^2 - h^2} + \sqrt{b^2 - h^2} \quad (4.50)$$

Wenn ein Scharnier mit symmetrischen Scharnierschenkeln ( $a = b$ ) verwendet wird, vereinfacht sich 4.50 zu:

$$u_S(h) = 2a + 2\sqrt{a^2 - h^2} \quad (4.51)$$

Von Bedeutung für das System und dessen Dimensionierung ist die maximale Umfangsänderung  $\Delta u_S$ :

$$\Delta u_S = u_S(h_2) - u_S(h_1) = 2\sqrt{a^2 - h_2^2} - 2\sqrt{a^2 - h_1^2} \quad (4.52)$$

Dies gilt, wenn  $u_S(h_1) < u_S(h_2)$ , also  $h_1 > h_2$  ist. Die Änderung des Umfangs ist im Gesamtsystem für die Dehnung des Folienwickels verantwortlich. Abbildung 4.13 zeigt im oberen Diagramm die Umfangsänderung  $\Delta u_S$  in Abhängigkeit einer veränderlichen maximalen Höhe  $h_1$ , bei einer festgelegten Höhendifferenz (Hub) von  $\Delta h = h_1 - h_2 = 1 \text{ mm}$  und symmetrischen Scharnierschenkeln  $a = b = 25 \text{ mm}$ . Wird die maximale Höhe  $h_1$  und die Höhenänderung  $\Delta h$  konstant gehalten und die symmetrische Schenkellänge  $a = b$  variiert, ergibt sich der im unteren Diagramm

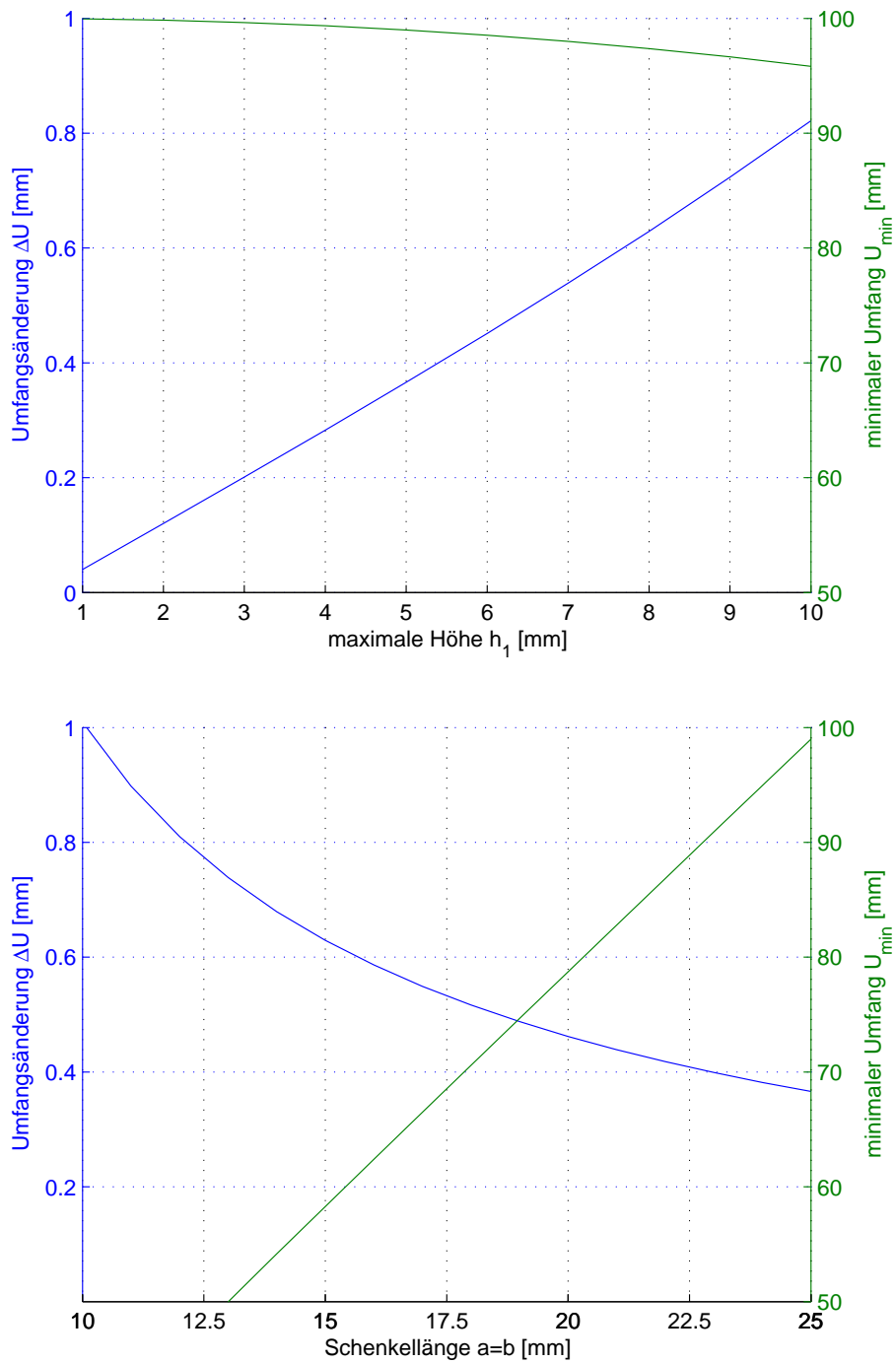


Abbildung 4.13: Umfangsänderung  $\Delta u_S$  (blau) und minimaler Umfang  $u_{S,min}$  (grün) eines Scharnierelements über der maximalen Höhe  $h_1$  (oben) und über der symmetrischen Länge der Scharnierschenkel  $a$  (unten)

von Abbildung 4.13 gezeigte Zusammenhang. Es wird deutlich, dass für eine große Umfangsänderung  $\Delta u_S$  bei minimaler Höhenänderung  $\Delta h$ , die maximale Höhe  $h_1$  möglichst groß und die Schenkel des Scharniers möglichst kurz sein sollten ( $\Delta u_S \nearrow$ , wenn  $h_1 \nearrow$  und  $(a+b) \searrow$ ). Weiterhin muss bei einer vorgegebenen Höhenänderung  $\Delta h$  und maximalen Höhe  $h_1$  die Schenkellänge des Scharniers so angepasst werden, dass die Umfangsänderung  $\Delta u_S$  die gewünschte Dehnung im Wickelkondensator erzielt.

### Kraftverteilung

Neben der Umfangsänderung müssen für die Beschreibung des Systems die Kräfte betrachtet werden, die sich am Scharnier unter Belastung ergeben. Idealisiert kann die in Abbildung 4.14 angegebene Kraftverteilung an einem symmetrischen Scharnier angenommen werden. Eine auf das Scharniergelenk wirkende Kraft  $F(t)$  bewirkt, dass sich an den Scharnierschenkeln die Kraftkomponenten  $F_x(t)$  und  $F_y(t)$  einstellen. Diese sind abhängig vom Öffnungswinkel und damit der Höhe  $h(t)$  des Scharniers. Wird des Weiteren angenommen, dass nur die Kraftkomponenten in x-

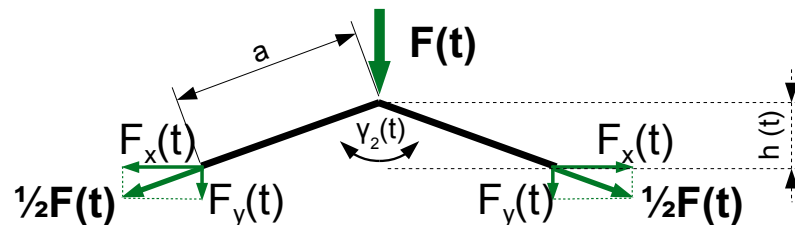


Abbildung 4.14: Kräfteverhältnisse an den Enden eines Scharnierelement, bei einwirkender Kraft  $F(t)$  am Scharniergelenk

Richtung zur Energiewandlung beitragen, muss das Verhältnis von maximaler Höhe  $h_1$  zur Schenkellänge  $a$  und  $b$  möglichst klein sein. Dies gewährleistet große Kraftkomponenten  $F_x(t)$  in x-Richtung (siehe Abbildung 4.15). Die Kraftkomponente  $F_x(t)$  wird über die Geometrie des Scharniers nach Gleichung 4.53 durch eine auf das Scharniergelenk wirkende Kraft  $F(t)$  bestimmt.

$$F_x^2(t) + F_y^2(t) = \frac{F^2(t)}{4}$$

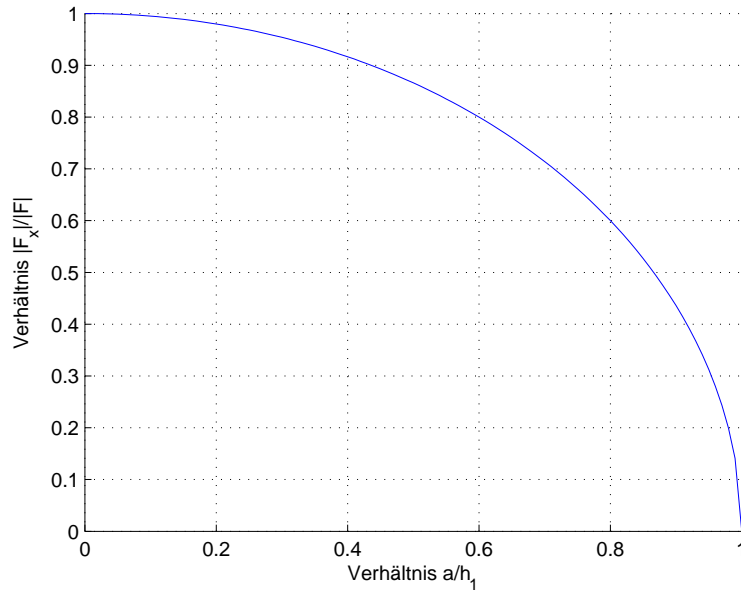


Abbildung 4.15: Verhältnis der Kraft  $F_x$  in x-Richtung zur Gesamtkraft  $F$  eines Scharnierelements in Abhängigkeit des Verhältnisses der Schenkellänge  $a$  zur maximalen Höhe  $h_1$

$$F_x(t) = \frac{F^2(t)}{4} - F_y^2 = \frac{F}{4} \left( 1 - \frac{h^2(t)}{a^2} \right) \text{ mit } \frac{2F_y(t)}{F(t)} = \frac{h(t)}{a} \quad (4.53)$$

Die Höhe  $h(t)$  ist durch den Scharnierumfang  $u_S(t) = 2a + 2\sqrt{a^2 - h^2(t)} \Rightarrow h^2(t) = u_S(t) \left( a - \frac{u_S(t)}{4} \right)$  bestimmt. Damit ergibt sich:

$$F_x(t) = \frac{F(t)}{2} \sqrt{1 - \frac{u_S(t) \left( a - \frac{u_S(t)}{4} \right)}{a^2}} \quad (4.54)$$

Auf den Wickelkondensator wirkt auf beiden Seiten die Kraft  $F_x$ . Daher gilt:

$$F_x(t) = yF(t) \sqrt{1 - \frac{u_S(t) \left( a - \frac{u_S(t)}{4} \right)}{a^2}} \quad (4.55)$$

Der Faktor  $y$  wird als ein dimensionsloser Korrekturfaktor eingeführt. Hiermit können in der weiteren Betrachtung mögliche mechanische Kraftverluste durch das Scharniergelenk berücksichtigt werden.

### Modellierung des Gesamtsystems

Um das Verhalten des Systems simulieren zu können, müssen die elektrische und mechanische Beschreibung des Wickelkondensators mit der mechanischen Beschrei-

bung des Scharniers kombiniert werden. Für die weitere Betrachtung wird festgelegt, dass zum Zeitpunkt  $t = 0$  der Umfang des Scharniers  $u_S(0)$  und des Wickelkondensators  $u_S(0)$  minimal sind und die Kraft  $F(0) = 0$  ist. Befindet sich das Scharnier innerhalb des Wickelkondensators, muss der Umfang  $u_S(t)$  des Scharniers zu jedem Zeitpunkt gleich dem inneren Umfang  $u_W(t)$  des Wickelkondensators sein.

$$u_S(t) = u_W(t) \quad (4.56)$$

Die Dehnung des Wickelkondensators  $S_1(t)$  wird durch die Umfangsänderung im Verhältnis zum minimalen Umfang  $\frac{\Delta u_S(t)}{u_S(0)}$  bestimmt:

$$S(t) = \frac{\Delta u_S(t)}{u_S(0)} = \frac{u_S(t) - u_S(0)}{u_S(0)} = \frac{u_S(t)}{u_S(0)} - 1 \quad (4.57)$$

Wird Gleichung 4.57 nach  $u_S(t)$  aufgelöst und in Gleichung 4.55 eingesetzt, folgt:

$$F_x(t) = yF(t) \sqrt{1 - \frac{u_S(0)(1 + S(t))(a - \frac{u_S(0)(1 + S(t))}{4})}{a^2}} \quad (4.58)$$

Für kleine Dehnungen  $S(t)$  ist  $(1 + S_1(t)) \approx 1$ . Daher kann Gleichung 4.58 vereinfacht werden zu:

$$F_x(t) = yF(t) \sqrt{1 - \frac{u_S(0)(a - \frac{u_S(0)}{4})}{a^2}} \quad (4.59)$$

Das bedeutet, dass  $F_x(t)$  praktisch nicht durch die Umfangsänderung  $\Delta u_S(t)$ , sondern hauptsächlich durch den anfänglichen Umfang  $u_S(0)$  des Wickelkondensators und die Scharniergeometrie beeinflusst wird. Wenn  $F_x(t) = F_1(t)$  (Kraft des Scharniers in x-Richtung gleich der Kraft in piezoelektrischer Querrichtung), wird Gleichung 4.47 zu:

$$\frac{d}{dt} I(t) = \frac{1}{wC_0(R + R_{par,s})} \left( \frac{Ad_{31}y \sqrt{1 - \frac{u_S(0)(a - \frac{u_S(0)}{4})}{a^2}}}{x \left( \frac{Y_A}{Y_P} A_{Q,A} + A_{Q,P} \right)} \frac{d}{dt} F(t) - \left( 1 + \frac{(R + R_{par,s})}{R_{par,p}} \right) I(t) \right) \quad (4.60)$$

Durch Lösung dieser Gleichung wird nachfolgend die elektrische Energie des piezoelektrischen Systems berechnet.

### 4.3.3 Simulation

Die Simulation erfolgte mit den im praktischen Teil verwendeten Parametern der Wickelkondensatoren und der Scharniere, die in Tabelle 5.2 und 5.3 angegeben sind (vgl. Kapitel 5.1.2). Die Kraft  $F(t)$  wird folgendermaßen abschnittsweise definiert:

1.  $F(t) = 0$  für  $0 \leq t < t_1, t_1 = 0.1s$
2.  $F(t) = F_{max} \frac{t-t_1}{t_2-t_1}$  für  $t_1 \leq t < t_2, t_2 = 0.25s$
3.  $F(t) = F_{max}$  für  $t_2 \leq t < t_3, t_3 = 0.55s$
4.  $F(t) = -F_{max}(1 - \frac{t-t_3}{t_4-t_3})$  für  $t_3 \leq t < t_4, t_4 = \Delta t \frac{F}{400N}$  mit  $\Delta t = 0.15s$
5.  $F(t) = 0$  für  $t_4 \leq t \leq t_{max}, t_{max} = 1s$

Die Kraft-Kurve ist eine Rampenfunktion mit der Amplitude  $F$  (vgl. Abbildung 4.16). In Abbildung 4.17 ist der Spannungsverlauf für die untersuchten Konfigura-

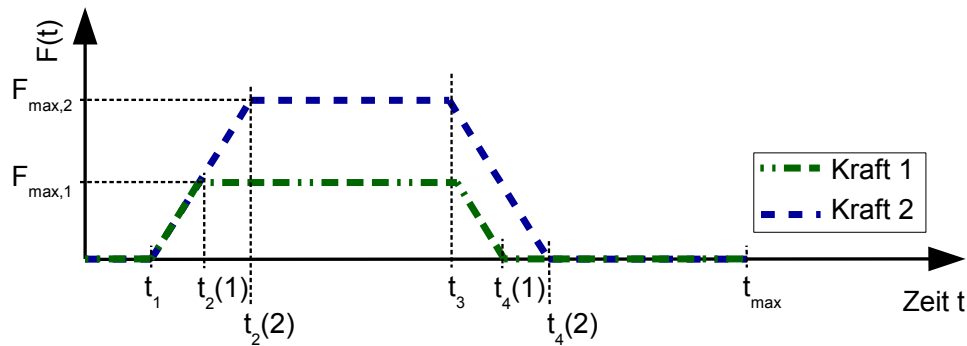


Abbildung 4.16: Funktionsverlauf der Kraft  $F(t)$  eines Belastungszyklus für zwei unterschiedliche max. Kraftamplituden  $F_{max}$

tionen von 1 bis 5 Wicklungen  $w$  bei einem Lastwiderstand  $R$  von  $1 M\Omega$  dargestellt. Die Fitparameter  $x$  und  $y$  wurden jeweils auf 1 gesetzt, d.h. es wurde ein idealisiertes System betrachtet. Es zeigt sich, dass mit zunehmenden Wicklungen die maximale Spannungsamplitude abnimmt. Die Zeitdauer der Entladung nimmt hingegen zu, bedingt durch die größer werdende Kapazität  $C_0$ . Aus dem Spannungsverlauf am Lastwiderstand  $R$  kann die elektrische Energie  $E$  berechnet werden. Abbildung 4.18 zeigt die resultierende Energie für die verschiedenen Wicklungen bei unterschiedlichen Kräften  $F$ . Der Lastwiderstand  $R$  wurde dabei jeweils an den Innenwiderstand der Wickelkondensatoren angepasst, um eine optimale Energie zu gewinnen. Es ist ersichtlich, dass die Energie  $E$  direkt proportional zur Größe der Druckkraft  $F$  und indirekt proportional zur Anzahl der Wicklungen ist. Das bedeutet, dass die maximale Energie  $E$  durch einen einlagigen Wickelkondensator bei einer möglichst hohen Druckkraft  $F$  erzielt wird. Durch die Erhöhung der Wicklungen wird auch die mechanische Dehnung des Folienkondensators geringer.

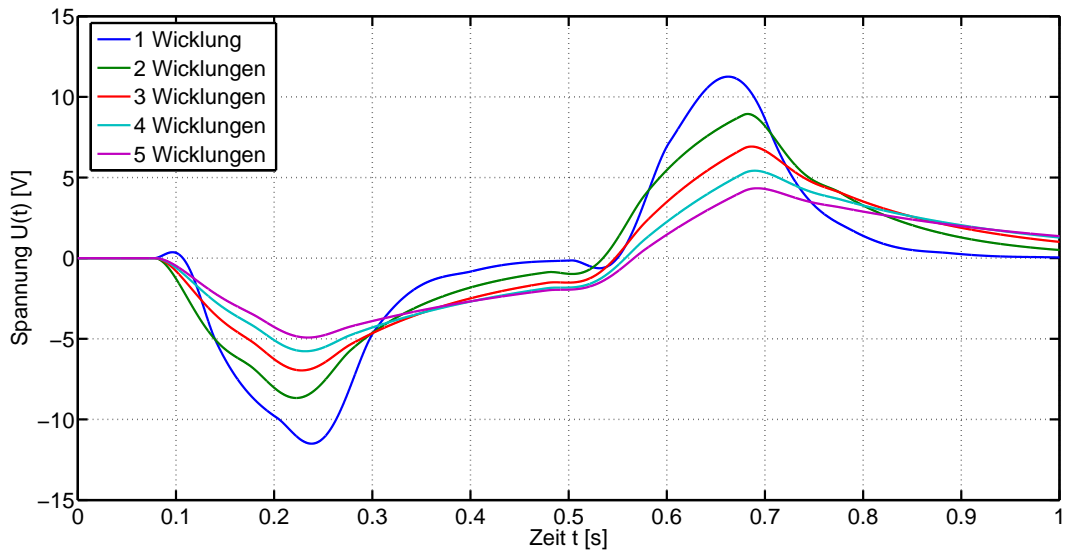


Abbildung 4.17: Simulierter Spannungsverlauf  $U(t)$  des Piezoelektrischen Systems für unterschiedliche Wicklungen  $w$  an einem Lastwiderstand  $R$  von  $1\text{ M}\Omega$

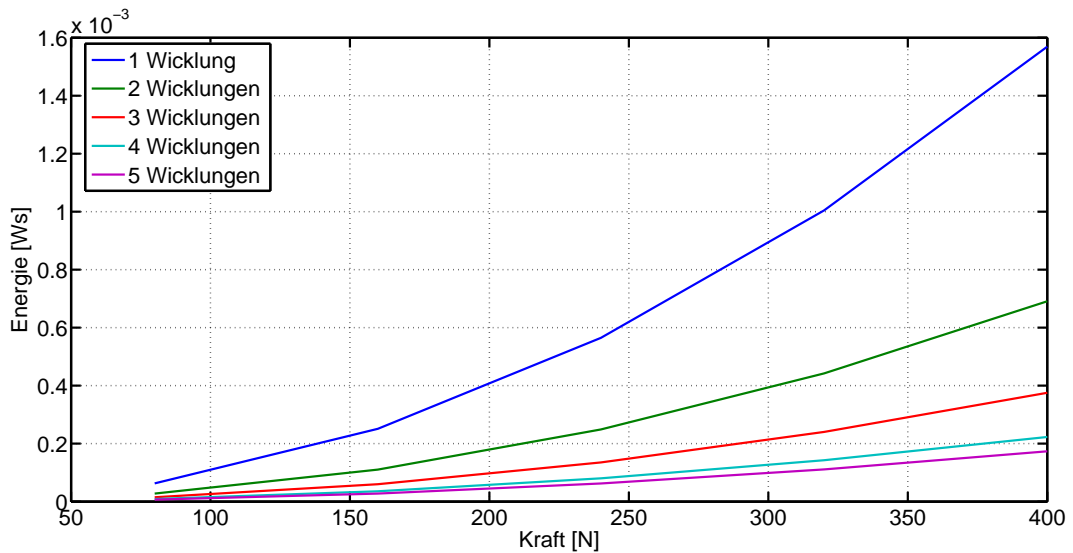


Abbildung 4.18: Simulierte elektrische Energie  $E$  des Piezoelektrischen Systems für unterschiedliche Wicklungen über der Kraft  $F$





# **5 Experimenteller Aufbau und Messverfahren**

Dieses Kapitel behandelt die praktische Umsetzung des Elektrostatischen und des Piezoelektrischen Energy Harvesting System und den Messaufbau zur Funktionsprüfung beider Systeme.

## **5.1 Praktische Umsetzung der Energy Harvesting Systeme**

Die Energy Harvesting Systeme wurden händisch, basierend auf monoaxial gereckter PVDF-Folie und als Elektrodenmaterial Aluminiumfolie, hergestellt. Das Design der Systeme wurde an die jeweiligen Anforderungen der Energiewandlung angepasst.

### **5.1.1 Praktische Umsetzung des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems**

Die praktische Umsetzung des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems zur experimentellen Überprüfung erfolgte nicht mithilfe der Wickeltechnik. Es wurde stattdessen ein spezieller Aufbau des Systems verwendet, der es ermöglichte, händisch reproduzierbare Testmodule mit einfachen Mitteln zu produzieren. Dies wurde insofern erforderlich, da unter Verwendung der Wickeltechnik ohne weitere Hilfsmittel kein definierter Abstand zwischen beweglicher Elektrode und PVDF-Folie gewährleistet werden konnte. In Abbildung 5.1 ist eine Methode skizziert wie ein mehrlagiges System aufgebaut werden kann, um eine bessere Kontrollierbarkeit und Reproduzierbarkeit des Elektret-Elektroden-Abstands sicherzustellen. Die-

se Methode wird als „Hexentreppe“ bezeichnet. Ebenso wie bei der Wickeltechnik

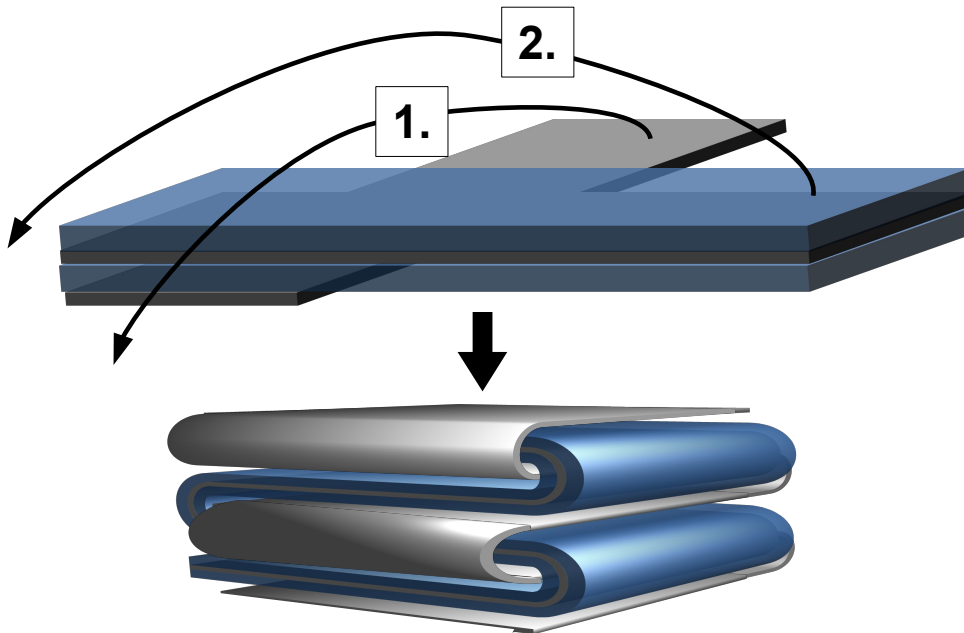


Abbildung 5.1: Praktische Umsetzung des Elektrostatischen Energy Harvesters, aufgebaut als Hexentreppe

werden jeweils zwei PVDF- und zwei Aluminiumfolien benötigt. Eine Aluminiumfolie wird als Elektrodenschicht zwischen die beiden PVDF-Folien gelegt. Hierbei muss die Polarisierung der PVDF-Folie beachtet werden. Das heißt, es müssen bei den PVDF-Folien entweder jeweils die positiv oder die negativ geladenen Seiten zueinander liegen. Die zweite Aluminiumfolie wird anschließend um  $90^\circ$  versetzt um den PVDF/Aluminium/PVDF-Folienstapel gefaltet (siehe Abbildung 5.1). Damit wird ein federartiger Aufbau in Form einer Hexentreppe erreicht. Der Vorteil ist, dass die Aluminiumfolie, die zwischen den beiden PVDF-Folien liegt, als feste Elektrode betrachtet werden kann. Bei mechanischer Belastung ändert sich der Abstand zwischen dieser Aluminiumfolie und den PVDF-Folien nicht. Anders verhält es sich bei der um  $90^\circ$  versetzten Aluminiumfolie. Hier wird durch Zusammendrücken und Auseinanderziehen der Abstand zwischen PVDF- und Aluminiumfolie verändert. Für die praktische Überprüfung wurden je fünf Testmodule mit 4, 6, 8, ... 26 Lagen hergestellt. Für die Messung wurde eine Vorrichtung (s. Kapitel 5.2.1) hergestellt, die es ermöglichte, eine gleichbleibende maximale Dicke  $d_4$  für die unterschiedlichen Testmodule sicherzustellen. Die Testmodule hatten die in Tabelle

5.1 zusammengefassten Eigenschaften:

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Breite der PVDF-Folie	$b_P$	50	mm
Dicke der PVDF-Folie	$d_1$	28	$\mu\text{m}$
Breite der Aluminiumfolie	$b_A$	45	mm
Dicke der Aluminiumfolie	$d_3$	10	$\mu\text{m}$
Maximale Dicke	$d_4$	1	mm

Tabelle 5.1: Geometrische Dimensionen der Elektrostatischen Energy Harvesting Testmodule

### 5.1.2 Praktische Umsetzung des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems

Die praktische Untersuchung des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems erfolgte mit speziell angepassten Wickelkondensatoren. Es wurden je zwei PVDF- und Aluminiumfolien abwechselnd übereinander gelegt. Anschließend wurde dieser Folienverbund in der gewünschten Größe auf einen Wickeldorn gewickelt. Es musste allerdings eine entscheidende Modifikation in der Herstellung eingeführt werden. Da die Wickelkondensatoren durch das Scharnier im Inneren gedehnt werden sollen, musste sichergestellt werden, dass sich die Wicklung des Kondensators dabei nicht löst. Um dies zu gewährleisten, mussten die zwei PVDF-Lagen der letzten äußeren Wicklung durch eine geeignete Methode fest mit der vorletzten Wicklung verbunden werden. Prinzipiell kann dies mit einer Klebeverbindung oder mit einer Verbindung durch thermisches Schweißen erreicht werden. In der Praxis konnte kein geeignetes Klebeverfahren für PVDF-Folie gefunden werden [16], daher wurden die letzten beiden Wickellagen durch thermisches Schweißen miteinander verbunden. Hierfür wurde ein beheizbarer Kolben hergestellt, mit dem die beiden Wickellagen händisch verschweißt werden konnten. Die erforderliche Schweißtemperatur beträgt  $225^\circ\text{C}$  bei einer Dauer von 30 Sekunden [16]. Es wurden je fünf Kondensatoren mit 1, 2, 3, 4 und 5 Wicklungen hergestellt. Durch eine Wicklung erhielt man gemäß des Aufbaus aus Kapitel 3.3 vier Lagen PVDF-Folie übereinander, wenn der Wickelkondensator flach gedrückt wurde. Dementsprechend wur-

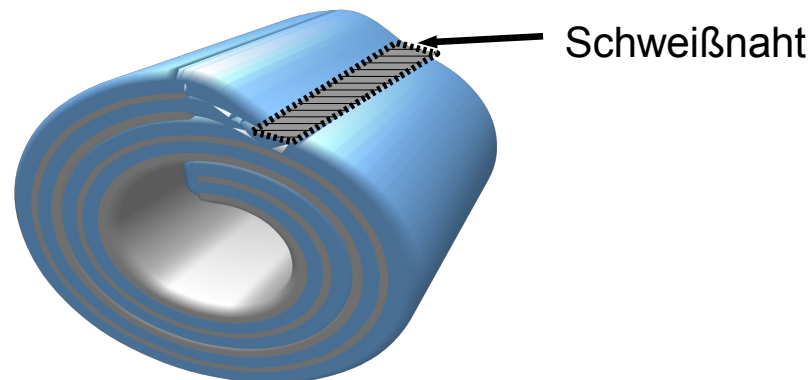


Abbildung 5.2: Schweißnaht bei einem Wickelkondensator, die für das Piezoelektrische System notwendig ist

den Wickelkondensatoren mit 4, 8, 12, 16 und 20 PVDF-Lagen hergestellt. Die Kondensatoren hatten die in Tabelle 5.2 zusammengefassten Dimensionen: Der In-

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Breite der PVDF-Folie	$b_P$	50	mm
Dicke der PVDF-Folie	$d_1$	28	$\mu m$
E-Modul der PVDF-Folie	$Y_P$	3	GPa
Breite der Aluminiumfolie	$b_A$	44	mm
Dicke der Aluminiumfolie	$d_3$	5	$\mu m$
E-Modul der Aluminiumfolie	$Y_A$	70	GPa
Durchmesser der Wickelkondensatoren	$D_W$	27,66	mm
Umfang der Wickelkondensatoren	$u_W$	86,90	mm

Tabelle 5.2: Geometrische Dimensionen der Piezoelektrischen Energy Harvesting Wickelkondensatoren [16][32]

nendurchmesser  $D_W$  des Wickelkondensators wurde so gewählt, dass dessen Umfang kleiner als der maximale Scharnierumfang  $u_S$  war. Es wurden handelsübliche Scharniere aus 1,2 mm dickem Stahlblech in der Größe 50 mm x 50 mm verwendet. Das Scharniergelenk hatte einen Durchmesser von 5,3 mm, dies entspricht auch der minimalen Höhe des Scharniers. Der maximale Umfang des Scharniers war damit 103,65 mm. Die Größentoleranz der Scharniere beträgt  $\pm 2mm$  [16]. Da die scharfen

Kanten der Scharniere bei mechanischer Belastung zu einem Einreißen der Aluminiumfolie führten, wurden die Enden der Scharniere gefalzt (s. Abbildung 5.3). Die

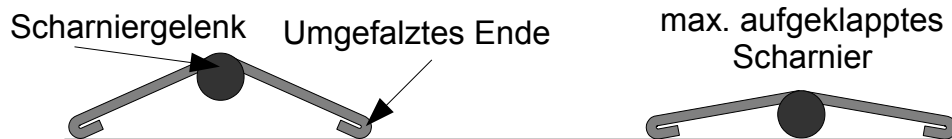


Abbildung 5.3: Scharnier mit umgefalzten Enden; links: unvollständig aufgeklapptes Scharnier; rechts: vollständig aufgeklapptes Scharnier

gefalteten Enden hatten einen größeren Radius als die ursprünglichen Scharniere. Die Kraftverteilung vom Scharnier auf den Wickelkondensator war hierbei gleichmäßiger und die Gefahr, dass die Aluminiumfolie reißt, deutlich geringer. Die Maße der umgefalteten Scharniere sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst [16]. Die resultierende Scharnierlänge  $a$  berechnet sich aus dem halben Umfang der gefalteten Scharnierenden und der Länge der Scharnierschenkel  $a_S$ .

Parameter	Symbol	Wert	Einheit
Breite der Scharniere	$b_S$	50	mm
Länge der Scharnierschenkel bis Falz	$a_S$	20,1	mm
Dicke der Scharnierschenkel	$d_S$	1,2	mm
Dicke der gefalteten Enden	$d_F$	2,8	mm
Durchmesser des Scharniergelenks	$D_S$	5,3	mm
Resultierende Länge der Scharnierschenkel	$a$	24,5	mm
Maximaler Umfang der Scharniere	$u_S$	89,5	mm

Tabelle 5.3: Geometrische Maße der Scharniere für das Piezoelektrische Energy Harvesting System [16]

## 5.2 Messverfahren

Zur Messung wurden definierte Lastwiderstände  $R$  an die Testmodule und Wickelkondensatoren angeschlossen. Um den Spannungsverlauf  $U(t)$  an diesen zu messen,

wurde eine Verstärkerschaltung (OP-AMP) mit einem sehr hohen Innenwiderstand ( $1 \approx T\Omega$ ) genutzt. Abbildung 5.4 zeigt den prinzipiellen Messaufbau. Die Auswertung erfolgte über eine *NI USB-6120* Messbox von National Instruments [44], die an einen PC angeschlossen und über ein *Labview*-Programm gesteuert wurde. Mit dem *Labview*-Programm wurde direkt aus dem Spannungssignal die resultierende elektrische Energie berechnet und in einer Textdatei gespeichert. Über *Labview* wurde des Weiteren eine pneumatischen Presse (s. Abbildung 5.4) angesteuert, die über einen beweglichem Stempel die gewünschte Druckkraft  $F$  auf die Testmodule erzeugte. Die Höhe der Druckkraft  $F$  wurde dabei über den Luftdruck eingestellt.

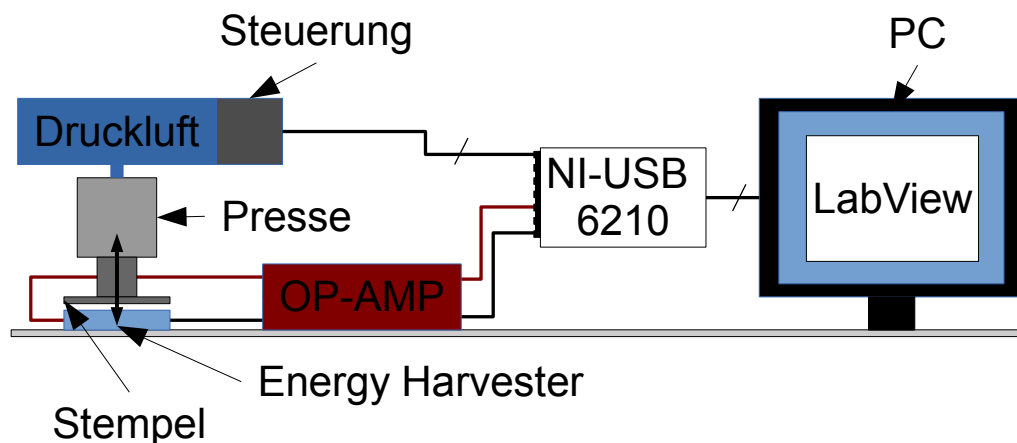


Abbildung 5.4: Schematische Anordnung des Messsystems zur Durchführung der Messung des Elektrostatischen und des Piezoelektrischen Systems

Durch die Zylindergröße entsprach 1 bar Druck einer Druckkraft von 80 N auf den beweglichen Stempel. Die zeitliche Ansteuerung des Stempels erfolgte ebenfalls über die *NI USB-6120* Messbox durch das *Labview*-Programm. Die Kapazität der Testmodule wurde mit dem Impedanz-, Kapazitäts- und Widerstandsmessgerät (LCR-Meter) *Escort ELC-3133A* gemessen. Für jedes Testmodul wurden die minimale und maximale Kapazität, die Spannung und die elektrische Energie für unterschiedliche Lastwiderstände zwischen  $0,5 M\Omega$  und  $100 M\Omega$  erfasst.

### 5.2.1 Messverfahren für den Elektrostatischen Energy Harvester

Ein wichtiger Parameter im Messverfahren für das Elektrostatische System ist die maximale Dicke  $d_{4,max}$  der Testmodule, die im Experiment für die unterschiedlichen Testmodule gleich bleiben muss. Um dies zu gewährleisten, wurde eine spezielle Vorrichtung verwendet, die in Abbildung 5.5 dargestellt ist. Die Vorrichtung ermöglicht es, zwei Platten in einen definierten Abstand zueinander zu bringen. Über vier Schraubenmutter kann der maximale Abstand ( $d_{4,max}$ ) beider Platten fixiert werden. Durch Federn wird die obere Platte auf diesem Abstand gehalten. Der Abstand kann jedoch durch eine Krafteinwirkung auf die obere Platte verringert werden. Damit ist es möglich, verschiedene Testmodule auf deren jeweilige minimale Dicke  $d_{4,min}$  zusammenzudrücken. Wird die Kraft von der oberen Platte genommen, geht diese wieder in ihre ursprüngliche Stellung zurück und das Testmodul nimmt die maximale Dicke  $d_{4,max}$  an. Das Zusammendrücken der Vorrichtung benötigte eine Druckkraft von 30 N. Daher entsprach ein Luftdruck von 1 bar einer Druckkraft von 50 N innerhalb der Vorrichtung.

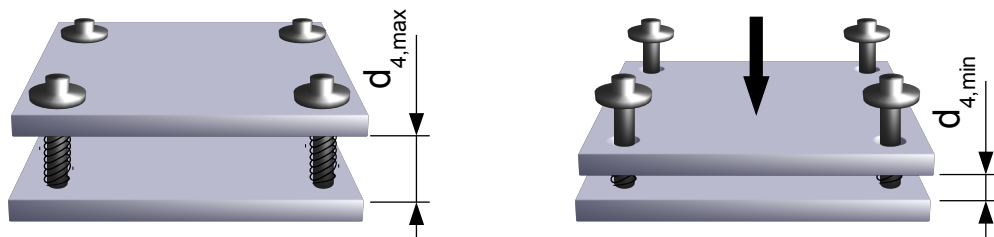


Abbildung 5.5: Mechanische Vorrichtung, um einen definierten max. Abstand  $d_{4,max}$  des Elektrostatischen Systems zu gewährleisten



### **5.2.2 Messverfahren für den Piezoelektrischen Energy Harvester**

Die Messungen für den Piezoelektrischen Energy Harvester wurden ebenfalls mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Komponenten durchgeführt. An den Stempel der pneumatischen Presse wurde zusätzlich eine Messuhr angebracht, um die Höhenänderung bei Ansteuerung zu erfassen. Die Druckkraft des Stempels wurde auf 80, 160, 240, 320 und maximal 400  $N$  durch den entsprechenden Luftdruck (1, 2, 3, 4 und 5  $bar$ ) eingestellt. Es wurden für alle Wickelkondensatoren die Kapazität, die RMS-Leerlaufspannung, die Höhenänderung und die elektrische Energie für die jeweiligen Druckkräfte gemessen.

# 6 Messergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung aus Kapitel 5 beschrieben. Anschließend erfolgt ein Vergleich beider System miteinander und mit aus der Literatur bekannten Energy Harvestern.

## 6.1 Elektrostatisches Energy Harvesting System

Zuerst werden die Messergebnisse des Elektrostatischen Systems vorgestellt. Diese werden diskutiert und mit der Simulation verglichen.

### 6.1.1 Messergebnisse des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems

Die Messergebnisse des Elektrostatischen Systems wurden getrennt nach Spannung, Kapazität und elektrischer Energie betrachtet.

#### Spannungsverlauf

Für jedes Testmodul wurde der Spannungsverlauf an einem Lastwiderstand von  $1\text{ M}\Omega$  mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Jedes Testmodul zeigte dabei einen ähnlichen Spannungsverlauf mit jeweils einem Spannungsspeak bei Vergrößerung und bei Verringerung des Abstands  $d_2(t)$ . Der bei Vergrößerung des Abstands  $d_2(t)$  entstehende negative Spannungsverlauf ist für jede Variation der Lagenanzahl in Abbildung 6.1 dargestellt. Wie in der Simulation (Abbildung 4.7) ist auch bei der Messung ein Spannungsspeak zu beobachten, der indirekt proportional zur Lagenanzahl  $n$  ist. Die Dauer des Spannungsspeaks ist direkt proportional zur Lagenanzahl  $n$ . Die Amplitude des gemessenen Spannungsspeaks ist allerdings geringer als die berechneten Werte.

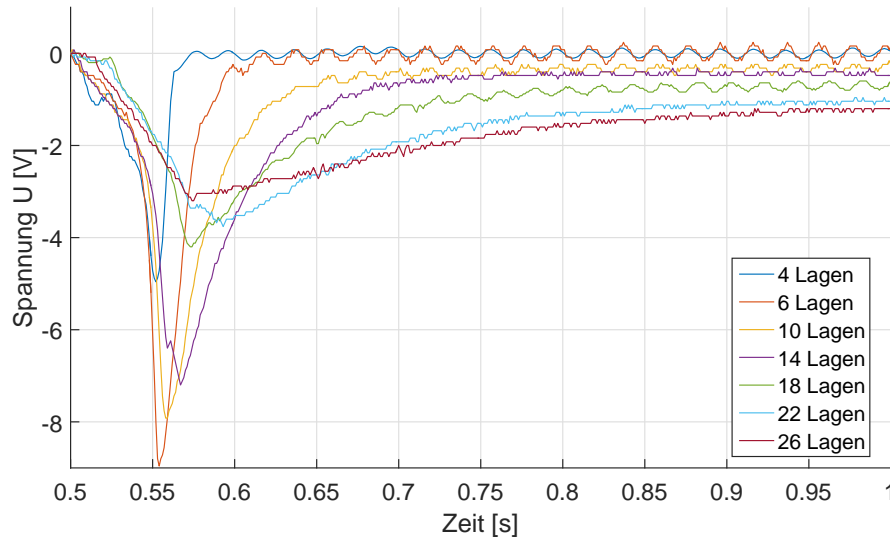


Abbildung 6.1: Gemessener Spannungsverlauf  $U(t)$  des Elektrostatischen Energy Harvesters bei unterschiedlicher Anzahl an Lagen  $n$  an einem Lastwiderstand  $R$  von  $1\text{ M}\Omega$

## Kapazität

Für jede Lagenanzahl wurde die minimale und maximale Kapazität der fünf Testmodule gemessen und der Mittelwert berechnet. Die Mittelwerte  $C_{min,mess}(n)$  und  $C_{max,mess}(n)$  der minimalen und maximalen Kapazität weichen für alle Lagenkonfigurationen deutlich von den theoretisch berechneten Kapazitäten  $C_{min,sim}(n)$  und  $C_{max,sim}(n)$  ab (s. Abbildung 6.2). Die gemessene minimale Kapazität  $C_{min,mess}(n)$  war größer als erwartet. Im Gegensatz zu den berechneten Werten  $C_{min,sim}(n)$  war ein annähernd linearer Anstieg mit zunehmender Lagenanzahl feststellbar. Die gemessene maximale Kapazität  $C_{max,mess}(n)$  war deutlich geringer als die theoretischen Werte  $C_{max,sim}(n)$ . Die gemessene maximale Kapazität stieg, ebenso wie die berechneten Werte, linear mit Zunahme der Lagenanzahl. Die messbare Kapazitätsänderung  $\Delta C(n) = C_{max}(n) - C_{min}(n)$  war durch die geringere maximale und die größere minimale Kapazität deutlich geringer als theoretisch möglich. Es müssen also im System auftretende parasitäre serielle und parallel Kapazitäten  $C_{par,s}(n)$  und  $C_{par,p}(n)$  berücksichtigt werden, auf die in 6.1.2 näher eingegangen wird.

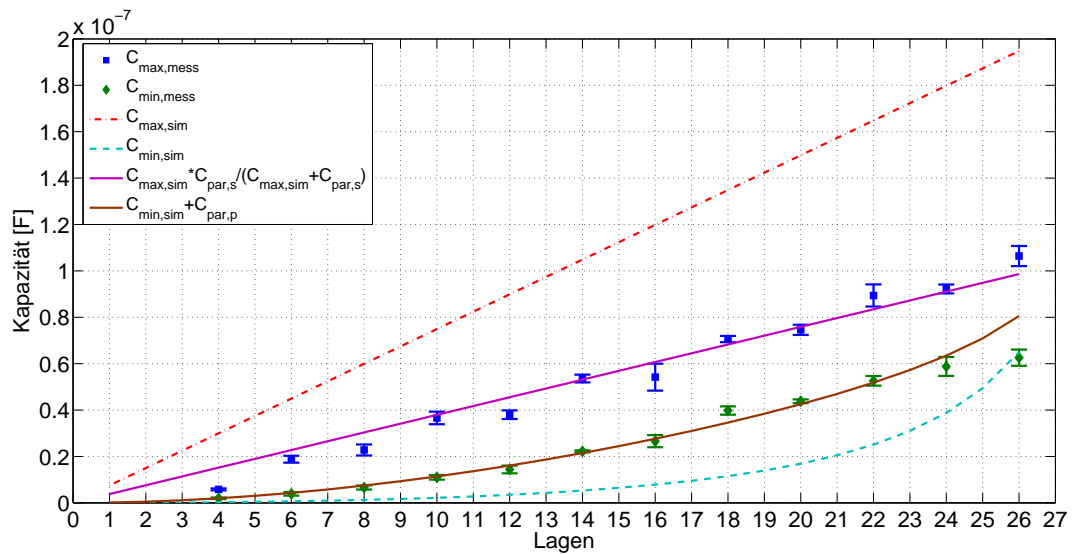


Abbildung 6.2: Gemessene (Punkt) und berechneten (Linien) minimale und maximale Kapazitäten  $C_{min}$  und  $C_{max}$  des Elektrostatischen Systems über der Anzahl an Lagen  $n$

## Energie

Die Testmodule wurden mit der in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Messvorrichtung mit einer Kraft von  $50\text{ N}$  mit einer Frequenz von  $1\text{ Hz}$  belastet. Dabei wurden an jedes Testmodul unterschiedliche Lastwiderstände  $R$  ( $0,5$ ;  $1$ ;  $10$ ;  $20$ ;  $50$  und  $100\text{ M}\Omega$ ) angeschlossen und je  $10$  Belastungszyklen ausgewertet. Die elektrische Energie wurde für jeden Messzyklus aus dem Spannungsverlauf  $U(t)$  am jeweiligen Lastwiderstand  $R$  mit Hilfe der Formel 4.18 berechnet. Für jede Lagenkonfiguration wurde der Mittelwert für die elektrische Energie  $E$  aus den Messwerten aller fünf Testmodule gebildet und die Standardabweichung berechnet. Abbildung 6.3 zeigt die elektrische Energie  $E$  bei unterschiedlichen Lastwiderständen  $R$  von  $0,5$  bis  $100\text{ M}\Omega$ . Die höchste Energiewandlung wurde mit einem 10-lagigen Modul unter Verwendung eines Lastwiderstands von  $10\text{ M}\Omega$  erreicht. Auch bei den Modulen mit 4 bis 12 Lagen lieferte ein Lastwiderstand von  $10\text{ M}\Omega$  die höchste Energiewandlung. Bei Modulen mit mehr als 12 Lagen war die höchste Energiewandlung hingegen bei  $1\text{ M}\Omega$  zu beobachten. Durch Variation der Druckkraft  $F$  auf die Testmodule wurde untersucht, welchen Einfluss die Druckkraft auf die Energieumwandlung hatte. Abbildung 6.4 zeigt die Energiewandlung eines 14-lagigen Moduls bei

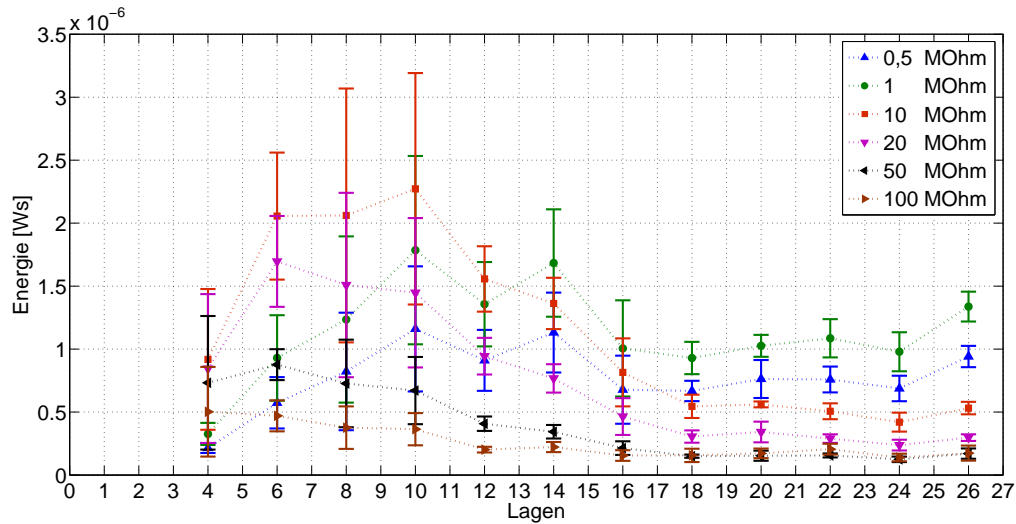


Abbildung 6.3: Mittlere elektrische Energie  $E$  des Elektrostatischen Systems für unterschiedliche Lastwiderstände  $R$  über der Anzahl an Lagen  $n$

einem Lastwiderstand von  $1\text{ M}\Omega$  in Abhängigkeit der Kraft  $F$ . Die minimale Kraft, die bei dem verwendeten Messaufbau notwendig war, betrug  $50\text{ N}$ . Damit konnte die in Abbildung 5.5 gezeigte Halterung gleichbleibend bewegt werden. Wurde die Kraft erhöht, stieg die gewandelte Energie an. Ab einer Kraft von  $290\text{ N}$  stagnierte die Energiewandlung schließlich trotz steigender Kraft.

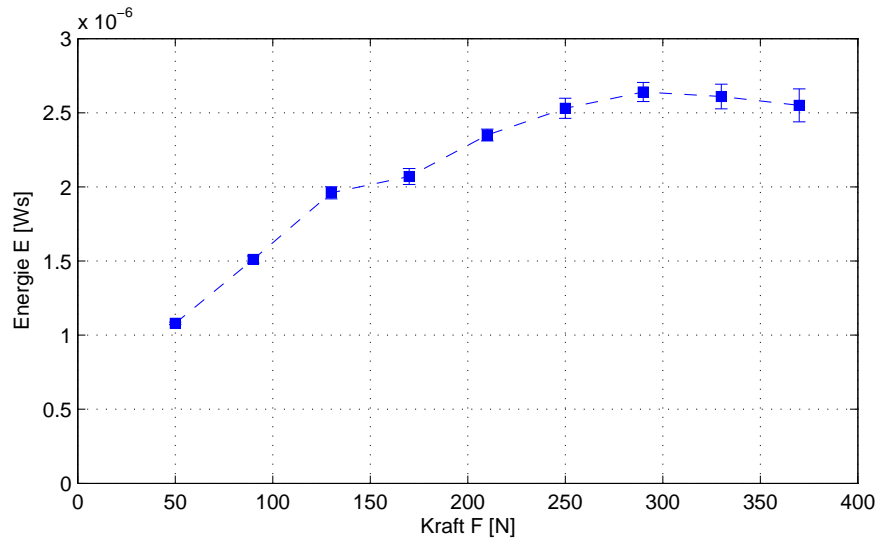


Abbildung 6.4: Energiewandlung des Elektrostatischen Systems in Abhängigkeit der Druckkraft  $F$

### 6.1.2 Diskussion des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems

Die gemessenen Werte und Verläufe der Spannung  $U(t, n)$ , der minimalen und maximalen Kapazität ( $C_{min, mess}(n)$  und  $C_{max, mess}(n)$ ) und der Energie  $E(n)$  bestätigen das durch die Simulation vorhergesagte Verhalten des Systems. Es konnte eine optimale Konfiguration hinsichtlich der Anzahl der Lagen in Abhängigkeit des Lastwiderstands beobachtet werden. Im Vergleich zur Simulation fielen die Messwerte allerdings geringer aus. Besonders deutlich wurde dies bei den Lastwiderständen von 0,5 und 1  $M\Omega$ : Hier weicht die Messkurve deutlich von der Kurve der Simulation ab (vgl. Abbildung 4.8). Der Einfluss der Lagenanzahl zeigte für die anderen Werte der Lastwiderstände einen ähnlichen Verlauf wie die in Kapitel 4.2.3 simulierten Werte, obwohl die Energiewandlung niedriger ausfiel.

Eine Erhöhung der Druckkraft  $F$  zeigte eine Steigerung der elektrischen Energie. Durch die höhere Druckkraft wird das System stärker zusammengedrückt, wodurch eine größere maximale Kapazität erreicht wurde. Dieser Steigerung war allerdings eine Grenze gesetzt, so dass bei einer weiteren Steigerung der Druckkraft, keine höhere elektrische Energie messbar war.

Auf der Basis der vorliegenden Messdaten konnte die Simulation erweitert und angepasst werden, um das System korrekt zu beschreiben. Es konnten mehrere Fakto-

ren bestimmt werden, die in das Modell zur Berechnung mit einfließen müssen. Ein ausschlaggebender Faktor, der die potentielle Energiewandlung limitierte, war die deutlich geringere Kapazitätsänderung  $\Delta C(n)$ . Diese wurde durch die geringere maximale und die größere minimale Kapazität ( $C_{min}(n)$  und  $C_{max}(n)$ ) im Vergleich zur Simulation hervorgerufen (s. Kapitel 6.1.1). Für die deutlich abweichende maximale Kapazität  $C_{max,mess}(n)$  war eine parasitäre serielle Kapazität  $C_{s,par}(n)$  verantwortlich, die durch die nicht vollständige Kompression der Testmodule bei maximaler Druckkraft entstand. Die Aluminiumfolien lagen bei maximaler Druckkraft nicht zu hundert Prozent auf den PVDF-Folien auf, so dass ein Luftspalt zwischen den Lagen verblieb. Die parasitäre serielle Kapazität  $C_{s,par}(n)$  beschreibt diesen verbleibenden Luftspalt.

Bei der minimalen Kapazität  $C_{min}(n)$ , bei den auseinandergezogenen Testmodulen war eine parasitäre parallele Kapazität  $C_{par,p}(n)$  maßgeblich. Diese entstand durch die ungleichförmige Bewegung der Folien zueinander. Wurde das Testmodul auseinandergezogen, so wurde ein Teil der Aluminiumlagen nicht mitbewegt. Dadurch entstand die parasitäre parallele Kapazität  $C_{par,p}(n)$ , wodurch die minimale Kapazität deutlich größer wurde. Der Anteil der Folienfläche, der nicht bewegt wurde ( $C_{par,p}(n)$ ) und zu einer größeren minimalen Kapazität führte, war abhängig von der Lagenanzahl eines Moduls. Je mehr Lagen ein Modul hatte, desto größer war der Anteil der Folienfläche, der nicht bewegt wurde. Der Grund hierfür war die Verringerung des maximalen Lagenabstands  $d_{2,max}(n)$  bei zunehmender Lagenanzahl  $n$ . Wurde ein Testmodul auseinandergezogen, so bewegte sich jede Folienlage, bedingt durch den Aufbau als Hexentreppe, zuerst an einer der vier Seiten. Bei nur geringen Bewegungsspannen ( $d_{2,max} = \text{klein}$ ) blieb ein Großteil der Fläche daher unbewegt. Dieser Zusammenhang kann mit einem empirisch ermittelten Faktor  $x = 0,015n$  erfasst werden.

Die maximale Kapazität  $C_{max}(n)$  wurde im Experiment beeinflusst durch die parasitäre serielle Kapazität  $C_{par,s}(n)$ , die durch einen verbleibenden Luftspalt zwischen PVDF- und Aluminiumfolie, bei Kompression der Testmodule entstand. Der mittlere verbleibende Luftspalt zwischen beiden Folien entsprach dabei in etwa  $2 \mu m$ . Durch die Berücksichtigung der parasitären Kapazitäten konnten die minimale und die maximale Kapazität annähernd korrekt berechnet werden (vgl. Abbildung 6.2). Anhand des Spannungsverlaufs  $U(t, n)$  und der Energie  $E(n)$  in Abhängigkeit der Lagen konnte des Weiteren festgestellt werden, dass die Module einen nicht zu

vernachlässigenden parasitären parallelen und seriellen Widerstand  $R_{par,p}(n)$  und  $R_{par,s}$  aufweisen. Der parallele parasitäre Widerstand  $R_{par,p}(n)$  entstand durch den spezifischen Oberflächen- und Volumenwiderstand von PVDF. Er war indirekt proportional zur Elektrodenfläche und damit zur Lagenanzahl  $n$ . Der parasitäre serielle Widerstand  $R_{par,s}$  wurde hingegen durch Leitungs- und Kontaktwiderstände des Systems hervorgerufen. Neben den parasitären Kapazitäten und Widerständen war für die geringere Energiewandlung zusätzlich ausschlaggebend, dass die Oberflächenladungsdichte  $\sigma$  der verwendeten PVDF-Folie nicht den von Feng [15] gemessenen Wert entsprach, sondern geringer war.

Unter Berücksichtigung der genannten Faktoren konnte die Energiewandlung in der Simulation korrekt berechnet werden. Abbildung 6.5 zeigt die an die Messwerte an-

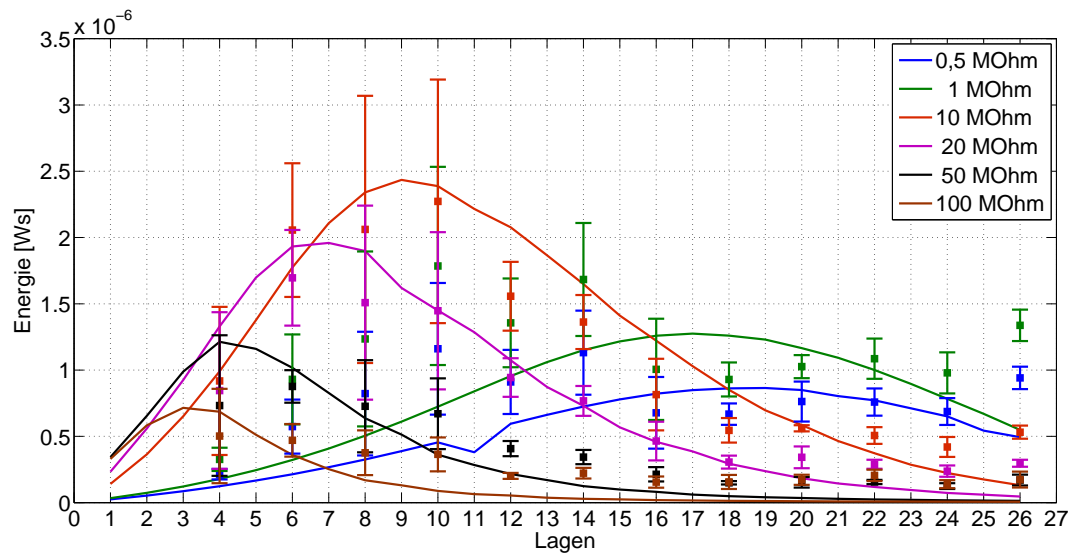


Abbildung 6.5: Simulierte Energie (durchgehende Linien) des Elektrostatiscchen Systems mit empirisch angepassten Parametern im Vergleich zu den Messwerten (Punkte)

gepasste Simulation. Für die geänderten bzw. eingeführten Parameter wurden die in Tabelle 6.1 angegebenen Werte verwendet.



Parameter	Formel/Wert	Anmerkung
$C_{par,s}(n)$	$C_{par,s}(n) = \epsilon_0 \frac{nA}{2\mu m}$	Im Mittel bleibt ein Luftspalt von $2\mu m$ zwischen PVDF- und Aluminiumfolie, d.h. $d_{2,min} = 2 \mu m$ und $C_{max}(n) = \frac{C_1(n)C_{par,s}(n)}{C_1(n)+C_{par,s}(n)}$
$C_{par,p}(n)$	$C_{par,p}(n) = 0,015n \frac{C_1(n)C_{par,s}(n)}{C_1(n)+C_{par,s}(n)}$	Abhängig von der Lagenanzahl bewegt sich ein Teil der Aluminiumfolie nicht, d.h. $C_{min}(n) = C_{par,p}(n) + (1 - 0,015n) \frac{C_1(n)C_{2,min}(n)}{C_1(n)+C_{2,min}(n)}$
$R_{par,p}(n)$	$R_{par,p}(n) = \frac{R_{vol}(n)R_{ober}(n)}{R_{vol}(n)+R_{ober}(n)}$	Der parasitäre parallele Widerstand ist indirekt proportional zur Lagenanzahl $n$
$R_{vol,p}(n)$	$R_{vol,p}(n) = 10^{14} \frac{d_1}{nA}$	Der parasitäre Widerstand durch den spezifischen Volumenwiderstand von PVDF $r_V = 10 * 10^{14} \Omega cm$
$R_{ober,p}(n)$	$R_{ober,p}(n) = 10^{13} \frac{0,25cm}{n5cm}$	Der parasitäre Widerstand durch den spezifischen Oberflächenwiderstand von PVDF $r_O = 10^{13} \Omega$ (Länge 5 cm, Randbreite 0,25 cm)
$R_{par,s}$	$R_{par,s} = 500k\Omega$	Parasitärer serieller Widerstand durch Kontakt- und Leitungswiderstände
$\sigma$	$\sigma = 0,6 * 10^{-5} \frac{C}{m^2}$	Die Oberflächenladungsdichte entspricht nicht dem in [15] bestimmten Wert

Tabelle 6.1: Empirisch ermittelte Parameter für die in Abbildung 6.5 simulierten Werte [32][38]

**Einfluss des maximalen Abstands  $d_4$** 

Die angepasste Simulation wurde herangezogen, um die Energie und die optimale Lagenanzahl für weitere Werte der maximalen Dicke  $d_4$  zu berechnen. In Tabelle 6.2 sind für unterschiedliche Werte von  $d_4$  die optimale Lagenanzahl  $n$ , der jeweils passende Lastwiderstand  $R$  und die damit erzielbare maximale Energie  $E$  aufgeführt. Es zeigte sich ein linearer Einfluss der maximalen Dicke  $d_4$  auf die Energie – je

<b>Dicke</b> $d_4$ [mm]	<b>Energie</b> $E$ [ $10^{-6}Ws$ ]	<b>optimale La-</b> <b>genanzahl</b> $n$	<b>Widerstand</b> $R$ [ $M\Omega$ ]
0,5	1,07	4	9,8
1	2,14	9	4,4
1,5	3,21	13	3,1
2	4,28	17	2,3
2,5	5,35	22	1,8
3	6,42	26	1,5
3,5	7,49	30	1,3
4	8,56	35	1,1

Tabelle 6.2: Einfluss der maximalen Dicke  $d_4$  auf die optimale Lagenanzahl  $n$  und die maximal generierbare Energie  $E$

größer  $d_4$ , umso größer die Energiewandlung. Auch die optimale Lagenanzahl stieg mit zunehmender Dicke linear an. Der optimale Lastwiderstand nahm hingegen bei größer werdenden Dicken  $d_4$  nichtlinear ab. Der lineare Einfluss der maximalen Dicke  $d_4$  auf die Energiewandlung bei den gegebenen Randbedingungen (u.a. Dicke der PVDF- und Aluminiumfolie, mechanische Belastungsfrequenz) kann auf die lineare Änderung der Fläche zurückgeführt werden. So ändert sich mit dieser auch die Kapazität des Systems linear. Somit steigt die Energie linear an, wenn jeweils der optimale Lastwiderstand verwendet wird. Die nichtlineare Änderung des Lastwiderstands wird durch die notwendige Anpassung der Zeitkonstante ( $\tau = RC$ ) des Kondensatorsystems hervorgerufen.

## 6.2 Piezoelektrisches Energy Harvesting System

Im Folgenden werden die Messergebnisse des Piezoelektrischen Systems präsentiert. Diese werden diskutiert und mit der Simulation verglichen.

### 6.2.1 Messergebnisse des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems

Die Messergebnisse des Piezoelektrischen Systems werden getrennt nach Kapazität, mechanischer Dehnung, Leerlaufspannung und elektrischer Energie betrachtet. Anders als beim Elektrostatischen System konnte bei den Piezoelektrischen Wickelkondensatoren der optimale Lastwiderstand  $R$  über die Kapazität  $C_0$  bestimmt werden, da diese bei mechanischer Belastung weitestgehend konstant blieb. Der Lastwiderstand wurde so gewählt, dass  $R = \frac{1}{\omega C_0}$  entsprach. Wenn auf das Wickelkondensator-Scharnier-System eine Druckkraft  $F$  wirkte, so wurde über das Scharnier eine Dehnkraft  $F_x$  auf den Wickelkondensator übertragen. Diese war abhängig von den geometrischen Größen der Wickelkondensatoren und der Scharniere und konnte mit Gleichung 4.55 und den Daten der Wickelkondensatoren und Scharniere aus Kapitel 5.2.2 berechnet werden. Die resultierende Dehnkraft  $F_x$  entsprach hier ca. 77% der auf das Scharniergelenk wirkenden Kraft  $F$ .

Kraft auf Scharniergelenk [N]	Dehnkraft am Wickelkondensator [N]
80	62
160	124
240	186
320	248
400	310

Tabelle 6.3: Resultierende Dehnkraft in den Wickelkondensatoren durch eine an den Scharniergelenk wirkende Kraft; berechnet mit Gleichung 4.55 und Wickelkondensator- und Scharnierdaten aus Kapitel 5.2.2

## Kapazität

Die Messung der Kapazität ergab einen deutlich geringeren Wert als theoretisch angenommen. Die Kapazität  $C_{0,mess}$  der Wickelkondensatoren stieg linear mit der Anzahl an Wicklungen, wobei auch hier die Zunahme deutlich geringer war als theoretisch möglich wäre. Der Grund für die im Vergleich zur Theorie niedrige

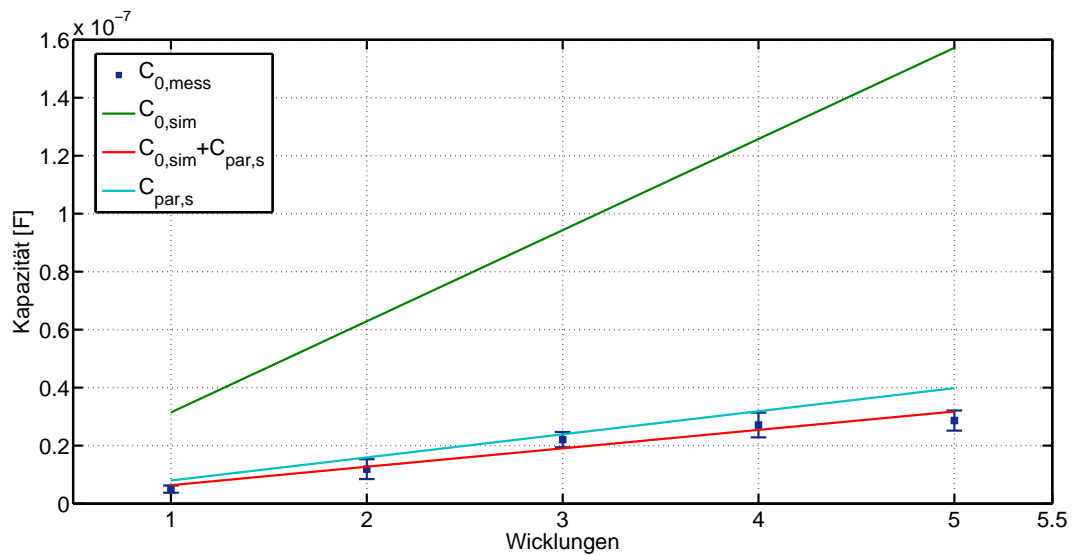


Abbildung 6.6: Kapazität der Wickelkondensatoren; Theoretischer Wert  $C_{0,sim}$ , Messung  $C_{0,mess}$ , angepasste Berechnung  $C_{0,sim} + C_{par,s}$ , parasitäre Kapazität  $C_{par,s}$

Kapazität  $C_{0,mess}$  der Wickelkondensatoren war eine parasitäre serielle Kapazität, die durch einen verbleibenden Luftspalt zwischen PVDF- und Aluminiumfolie entstand. Aus den Messwerten  $\bar{C}_{0,mess}$  und der theoretisch ermittelten Kapazität  $C_{0,sim}$  konnte die parasitäre serielle Kapazität  $C_{par,s}$  berechnet werden. Die Berechnungen zeigten, dass ein mittlerer Luftspalt von  $4 \mu m$  zwischen jeder PVDF- und Aluminiumfolie bestand. Die Auswirkungen der parasitären seriellen Kapazität wurden umso größer, je mehr Wicklungen ein Kondensator besaß (vgl. Abbildung 6.6). Durch die Reihenschaltung der parasitären Kapazität des Luftspalts  $C_{par,s}$  und der Kapazität  $C_0$  der PVDF-Folie dominierte jeweils die kleinere von beiden ( $C_{par,s} \approx 25\%$  von  $C_0$ ). Hierdurch erklärt sich die geringe Vergrößerung der Gesamtkapazität bei zunehmender Wicklungsanzahl. In Tabelle 6.4 sind die Werte der theoretisch berechneten Kapazität  $C_{0,sim}$ , der Mittelwert der gemessenen Kapazität  $\bar{C}_{0,mess}$  und der aus dem Unterschied resultierenden parasitären seriellen Kapazität  $C_{par,s}$  für jede

<b>w</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
$C_{0,sim}[nF]$	31,4	62,9	94,3	125,7	157,2
$\bar{C}_{0,mes}[nF]$	$5 \pm 25\%$	$12 \pm 29\%$	$22 \pm 12\%$	$27 \pm 16\%$	$29 \pm 12\%$
$C_{par,s}[nF]$	8	15,9	23,9	31,9	39,8

Tabelle 6.4: Berechnete  $C_{0,sim}$  und gemessene Kapazität  $C_{0,mes}$  der Wickelkondensatoren und die aus dem Unterschied resultierende parasitäre Kapazität  $C_{par,s}$

Anzahl an Wicklungen zusammengefasst.

### Dehnung

Durch die Messuhr an der pneumatischen Presse konnte die Höhenänderung des Wickelkondensator-Scharnier-Systems in Abhängigkeit der Druckkraft  $F$  gemessen werden. Aus dieser Höhenänderung konnte mit den entsprechenden Gleichungen 4.52 und 4.57 und den geometrischen Daten der Wickelkondensatoren und der Scharniere die daraus resultierende mechanische Dehnung der Wickelkondensatoren berechnet werden. Abbildung 6.7 zeigt die mechanische Dehnung  $\Delta S$  der Wickelkondensatoren bei unterschiedlichen Dehnkräften  $F$ . Die Dehnung  $\Delta S$  war indirekt proportional zur Anzahl der Wicklungen  $w$ , das heißt es war eine Verringerung der Dehnung mit zunehmenden Wicklungen messbar. Deutlich wird dies in Abbildung 6.7 für eine Kraft ab 124 N. Die maximale Dehnung lag bei fast 0,008 bei Kondensatoren mit 5 Wicklungen, die mit 310 N belastet wurden. Bei Kondensatoren mit weniger Wicklungen wäre die Dehnung vermutlich noch größer ausgefallen, aber voraussichtlich noch unterhalb der Belastungsgrenze der PVDF-Folie von  $S_B = 0,05$  [32].

### Leerlaufspannung

Zur Messung der Leerlaufspannung wurden die Wickelkondensatoren an einen 10 GΩ Lastwiderstand angeschlossen. Theoretisch ist eine Abnahme der Leerlaufspannung mit zunehmender Anzahl an Wicklungen bei gleichbleibender mechanischer Druckkraft zu erwarten. Abbildung 6.8 zeigt zum einen, dass die Leerlaufspannung  $U_{LL}$  nahezu konstant für alle Wicklungen war, wenn die Dehnkraft 62 N betrug. Bei einer Dehnkraft von 124 N war eine Abnahme der Leerlaufspannung mit zunehmender Wicklungsanzahl messbar. Für höhere Dehnkräfte liegen nur für Wickel-

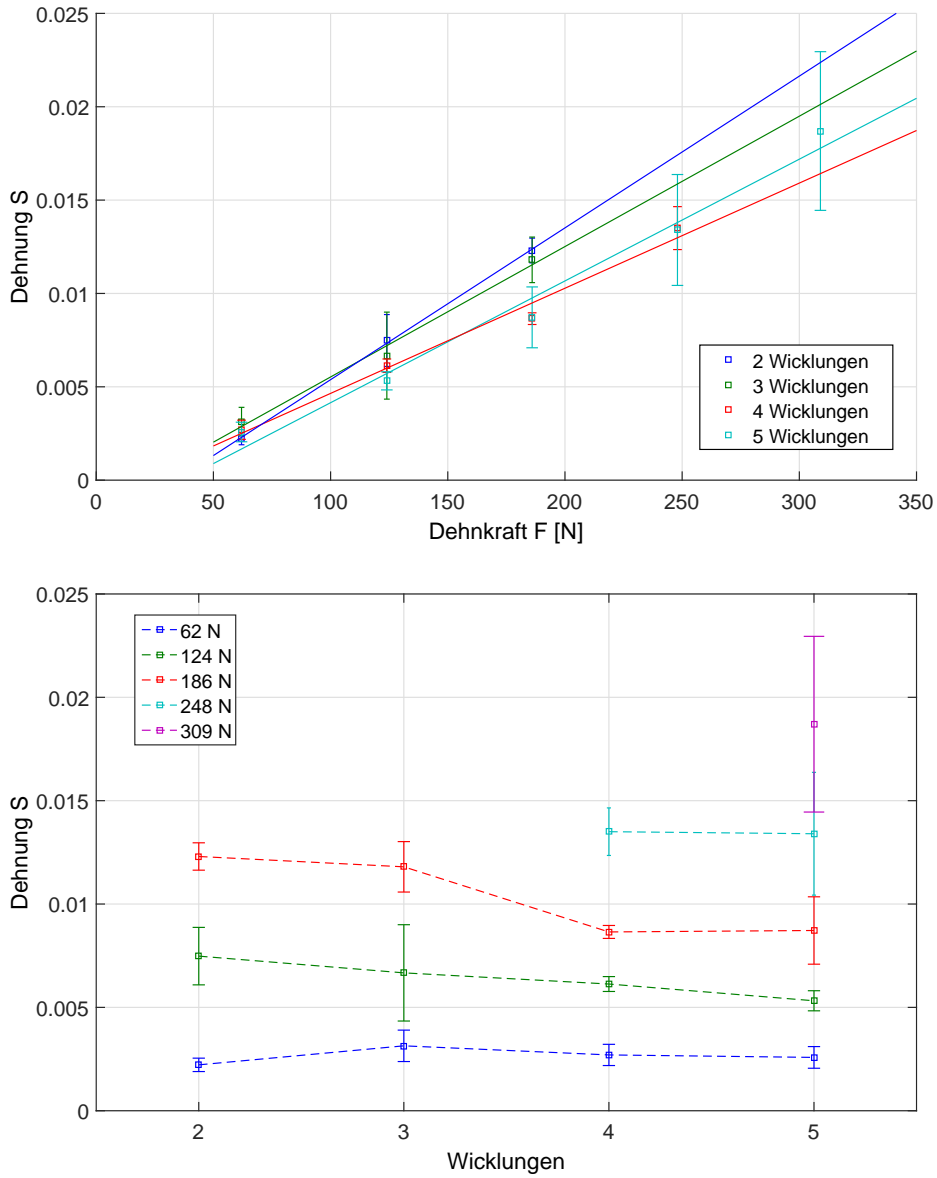


Abbildung 6.7: Dehnung  $S$  der Wickelkondensatoren. Diagramm oben: Dehnung  $S$  in Abhängigkeit der Dehnkraft  $F$  für unterschiedliche Wicklungen  $w$ . Diagramm unten: Dehnung  $S$  in Abhängigkeit der Wicklungen  $w$  für unterschiedliche Dehnkräfte  $F$

kondensatoren mit 5 Wicklungen Messdaten vor. In Abbildung 6.8 ist im oberen Diagramm die Leerlaufspannung  $U_{LL}$  über der Anzahl der Wicklungen  $w$  für unterschiedliche Dehnkräfte  $F$  aufgetragen. Im unteren Diagramm von Abbildung 6.8 ist die Leerlaufspannung  $U_{LL}$  über der Dehnkraft  $F$  für unterschiedliche Wicklungen  $w$  aufgetragen.

### **Energie**

Zur Messung der Energie wurde jeder Wickelkondensator 20 Mal mit der jeweiligen Dehnkraft  $F$  und einer Frequenz von 1 Hz belastet. Hierbei wurde das Spannungssignal am Lastwiderstand gemessen und die resultierende Energie berechnet. Bei den Werten in Abbildung 6.9 handelt es sich um die Mittelwerte aller Wickelkondensatoren der entsprechenden Konfiguration. Die Abbildung 6.9 zeigt die Energie der Wickelkondensatoren mit 2, 3, 4 und 5 Wicklungen bei unterschiedlichen Dehnkräften  $F$ . Es ist eine deutliche Zunahme der Energiewandlung bei steigenden Dehnkräften zu sehen. Eine Kraft von 62 N liefert keine bedeutende Energiewandlung, da die Verluste durch das Scharnier hier scheinbar zu groß sind und nur eine geringe Dehnung des Wickelkondensators erreicht wird. Die Messwerte bei höheren Dehnkräften weisen sehr große Schwankungen auf. Ein Problem ist, dass mit zunehmender Kraft die mechanische Zerstörung der Wickelkondensatoren wahrscheinlicher wurde. Die Kondensatoren konnten dabei umso höhere Kräfte aushalten, je mehr Wicklungen sie aufwiesen. Kondensatoren mit nur einer Wicklung wurden bereits bei einer Krafteinwirkung von 62 N zerstört. Die Ergebnisse der funktionsfähigen Wickelkondensatoren zeigten des Weiteren eine umso geringere Energiewandlung, je mehr Wicklungen diese hatten.

### **Ausfallmechanismen**

Die bereits angesprochene mechanische Zerstörung der Wickelkondensatoren resultierte aus der geringen Belastbarkeit der Schweißnähte. Wurde die Schweißnaht zerstört, konnte über das Scharnier im Inneren keine Dehnung mehr in den Wickelkondensatoren erzeugt werden. Je mehr Wicklungen die Kondensatoren aufwiesen, desto größer konnte die Dehnkraft sein ohne eine Zerstörung der Schweißnaht hervorzurufen. Der Grund hierfür ist, dass sich die Dehnkraft auf alle Lagen eines

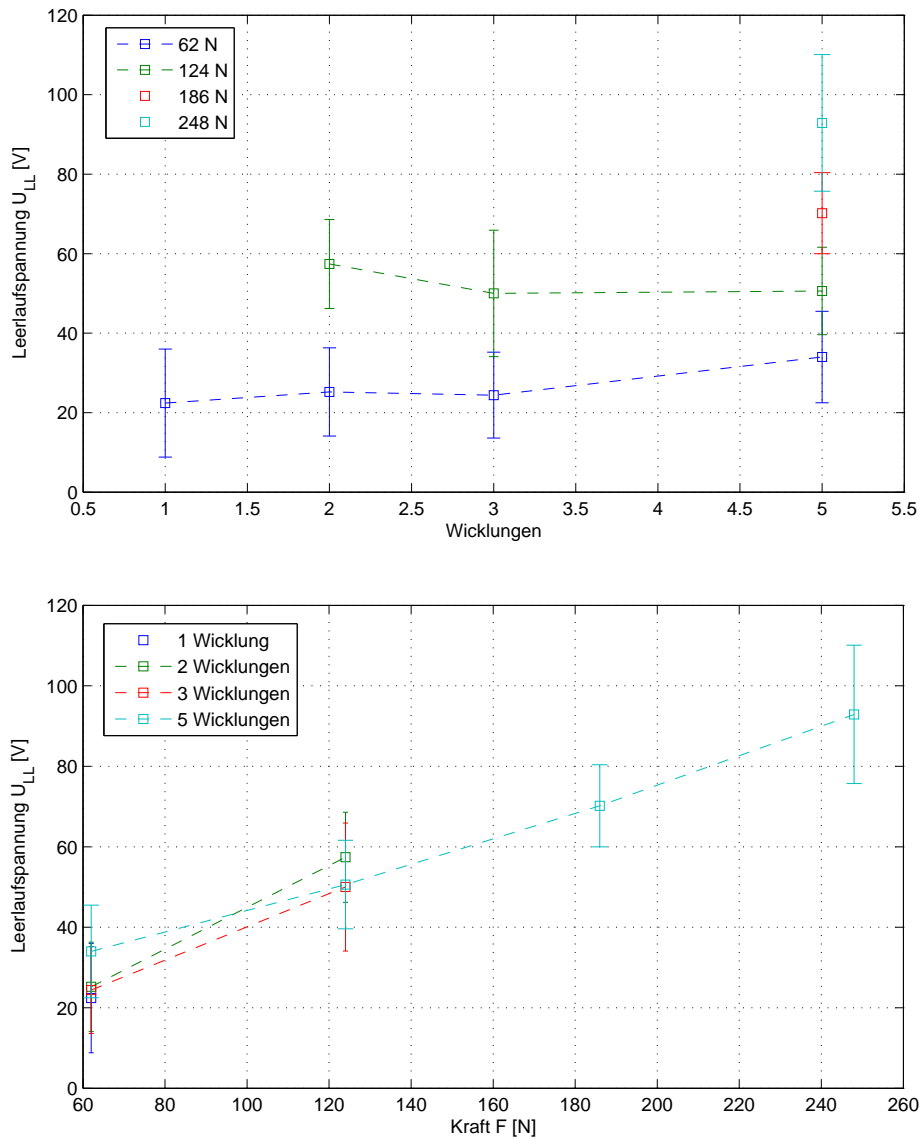


Abbildung 6.8: Leerlaufspannung  $U_{LL}$  der Wickelkondensatoren. Diagramm oben: Leerlaufspannung in Abhängigkeit der Wicklungen  $w$ . Diagramm unten: Leerlaufspannung in Abhängigkeit der  $F$  [16]



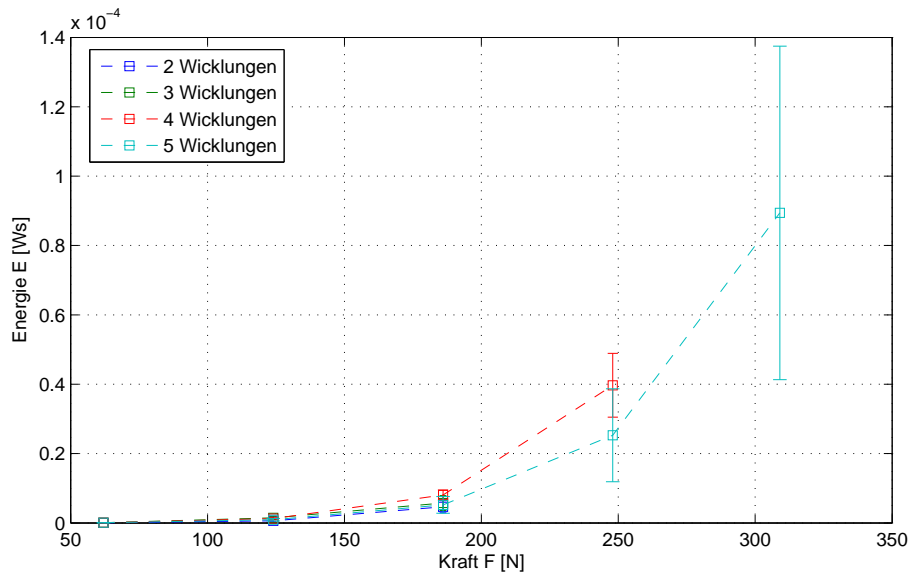


Abbildung 6.9: Elektrische Energie  $E$  des Piezoelektrischen Systems für unterschiedliche Wicklungen  $w$  in Abhängigkeit der Dehnkraft  $F$  [16]

Wickelkondensators verteilt, wodurch die mechanische Spannung an der Schweißnaht verringert wurde.

### 6.2.2 Diskussion des Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems

Der mechanische Ausfall der Wickelkondensatoren in der Versuchsreihe wirkte sich negativ auf die Datenauswertung aus. So konnten einige Daten nicht aufgenommen werden (Bsp.: Dehnkräfte größer als 62 N bei Kondensatoren mit 1 Wicklung). Des Weiteren unterlagen die gemessenen Werte teilweise starken Schwankungen. Diese Faktoren erschwerten die Identifikation der entscheidenden Parameter, die in der mathematischen Formulierung angepasst werden mussten, um das reale Verhalten der Wickelkondensatoren exakt beschreiben zu können.

Die parasitäre Kapazität war der Grund, weshalb die gemessene Leerlaufspannung nur geringfügig durch die Wickelkonfigurationen beeinflusst wurde, wenn die Dehnkraft konstant gehalten wurde. Die Leerlaufspannung war abhängig von der Kapazität der Kondensatoren und der Ladungsgeneration durch den piezoelektrischen Effekt. Die Kapazität stieg mit Zunahme der Wicklungen, wurde aber maßgeblich durch die parasitäre Kapazität  $C_{par,s}$  beeinflusst. Hierdurch war der Anstieg

der Kapazität durch die Erhöhung der Wicklungsanzahl deutlich geringer. Die Ladungsgeneration durch den piezoelektrischen Effekt war konstant, unabhängig von der Anzahl der Wicklungen. Somit war der Einfluss der Wicklungen auf die Leerlaufspannung, ebenso wie die Kapazitätsänderung, deutlich geringer als theoretisch angenommen werden konnte.

Die Messwerte des Hubs gaben Aufschluss darüber, wie stark die Wickelkondensatoren bei mechanischer Belastung gedehnt wurden. Die Dehnung war indirekt proportional zur Anzahl der Wicklungen  $w$  und direkt proportional zur Größe der Dehnkraft  $F(t)$ . Die Abhängigkeit der Dehnung von der Anzahl der Wicklungen war im Experiment geringer als theoretisch berechenbar. Es scheint, dass durch das Scharnier im Inneren des Kondensators keine vollständige Dehnung der äußeren Wicklungen erreicht werden konnte, da diese zu locker gewickelt waren. Des Weiteren zeigte die Messung, dass es zu mechanischen Verlusten in der Kraftübertragung vom Scharniergelenk auf die Wickelkondensatoren kam. Dieser Verlust ließ sich mit etwa  $60\text{ N}$  abschätzen. Mithilfe des Parameters  $x$  konnte der Einfluss der Wicklungsanzahl und mit dem Parameter  $y$  die mechanischen Kraftverluste in der Berechnung berücksichtigt werden, um sie an die tatsächlichen Messwerte anzupassen. Wurde der Parameter  $x$  mit  $x = \frac{3}{2+w}$  und  $y$  mit  $y = 1 - \frac{60}{F}$  berücksichtigt, ergaben sich die in Abbildung 6.10 abgebildeten Kurven. Die Energie wurde mit den angepassten Parametern  $x$  und  $y$  und unter Berücksichtigung der parasitären Kapazitäten mit Gleichung 4.60 neu berechnet. Die so berechnete elektrische Energie ist in Abbildung 6.11 im Vergleich zu den Messwerten dargestellt. Der Vergleich der Messwerte und der angepassten Berechnung zeigt, dass Gründe für eine geringe Energiewandlung zum einen die parasitäre Kapazität und zum anderen mechanische Verluste des Scharniers und eine ungleichmäßige Dehnung der Wickelkondensatoren sein können. In Tabelle 6.5 sind die verwendeten Größen für die modifizierte Simulation zusammengefasst. Die Energiewandlung des Piezoelektrischen Systems ist am größten, wenn möglichst wenige Wicklungen mit einer möglichst großen Dehnkraft beaufschlagt werden. Die Messungen zeigten allerdings, dass neben der Energiewandlung die mechanische Stabilität des Systems zu berücksichtigen ist. So wurden die Kondensatoren mit nur einer Wicklung bereits bei geringen Dehnkräften zerstört. Durch mehr Wicklungen konnte eine deutlich größere mechanische Stabi-

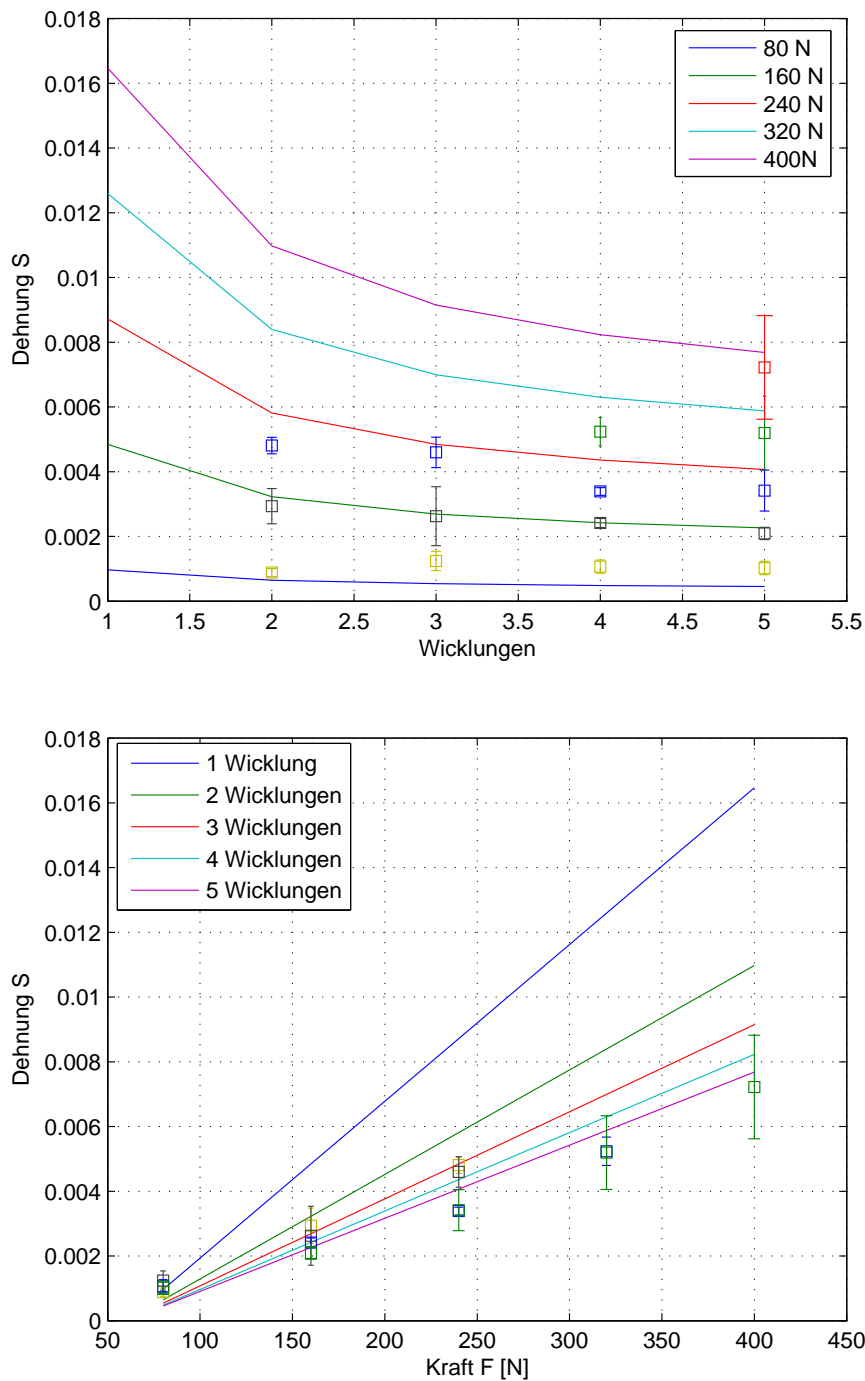


Abbildung 6.10: Gemessene (Punkte) und mit angepassten Parametern  $x$  und  $y$  berechnete (Linien) Dehnung der Wickelkondensatoren. Diagramm oben: Dehnung  $S$  in Abhängigkeit der Kraft  $F$  für unterschiedliche Wicklungen  $w$ . Diagramm unten: Dehnung  $S$  in Abhängigkeit der Wicklungen  $w$  für unterschiedliche Kräfte  $F$

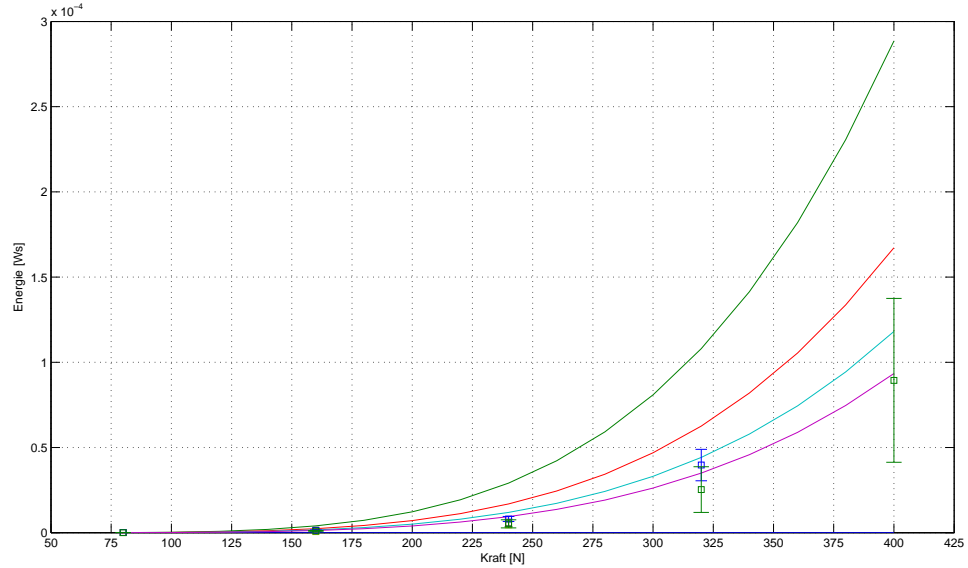


Abbildung 6.11: Gemessene (Punkte) und berechnete Energie (Linien) des Piezoelektrischen Systems für unterschiedliche Wicklungen  $w$  über der Kraft  $F$

Parameter	Formel/Wert	Anmerkung
$C_{par,s}$	$C_{par,s} = \frac{C_{par}}{2} = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 n A}{4 \mu m}$	Im Mittel bleibt ein Luftspalt von je $4 \mu m$ zwischen PVDF- und Aluminiumfolie
$x$	$x = \frac{3}{2+w}$	Durch das Scharnier werden nicht alle Wicklungen des Wickelkondensators gedehnt
$y$	$y = 1 - \frac{60}{F}$	Nur ein Teil der auf das Scharniergelenk wirkenden Kraft $F$ trägt zur Generation von elektrischer Energie bei.

Tabelle 6.5: Empirisch ermittelte Parameter für die in Abbildung 6.11 simulierten Werte

lität erreicht werden. So wurde die maximale Dehnung der PVDF-Folie verringert und die mechanischen Kräfte auf die Schweißnaht reduziert. Es muss also je nach Anwendungsbereich ein Kompromiss zwischen maximaler Energiewandlung und mechanischer Stabilität gefunden werden, um langlebige Systeme zu erhalten. Zuerst muss allerdings die Schweißtechnik noch optimiert werden, da diese eine große Schwachstelle ist. Die Schweißnaht erfüllt eine essentielle Funktion, da diese die Wickelkondensatoren bei mechanischer Belastung zusammenhalten muss. Ein Versagen der Schweißnaht bedeutet somit auch ein Totalausfall des Systems, da keine Energiewandlung mehr stattfinden kann.

### 6.3 Vergleich

Nachfolgend werden das Elektrostatische und das Piezoelektrische System miteinander und anschließend mit Energy Harvester Systemen aus der Literatur verglichen.

#### 6.3.1 Vergleich des Elektrostatischen und Piezoelektrischen Energy Harvesting Systems

Ein Vergleich beider Energy Harvesting Methoden kann prinzipiell hinsichtlich unterschiedlicher Gesichtspunkte erfolgen. Darunter zählen neben der maximalen Energiewandlung  $E_{el}$  und des Systemvolumens  $V_{sys}$  weitere Faktoren wie die maximale Energiedichte (Energie pro PVDF-Volumen  $\frac{E_{el}}{V_{PVDF}}$  oder Gesamtvolumen  $\frac{E_{el}}{V_{sys}}$  des Systems). Weiterhin können beide Systeme hinsichtlich der Komplexität des Aufbaus oder der Ausfallsicherheit verglichen werden. In Tabelle 6.6 sind die maximal gemessenen Werte der Energie und der auf das PVDF- und das Gesamtvolumen normierten Energie für beide Systeme angegeben sowie mit welcher Konfiguration diese erzielt wurden.

Parameter	Einheit	Elektrostatisch	Piezoelektrisch
Energie	$10^{-6} \text{ Ws}$	2,1 (8 Lagen)	89,4 (5 Wicklungen)
Energie / PVDF-Volumen	$10^{-6} \frac{\text{Ws}}{\text{cm}^3}$	4,9 (6 Lagen)	72,2 (5 Wicklungen)
Energie / Gesamtvolumen	$10^{-6} \frac{\text{Ws}}{\text{cm}^3}$	0,9 (10 Lagen)	22,2 (5 Wicklungen)

Tabelle 6.6: Maximale Energie, Energie/PVDF-Volumen und Energie/ Gesamtvolumen des Elektrostatischen (Kraft  $F = 50 \text{ N}$ ) und des Piezoelektrischen Systems (Kraft  $F = 310 \text{ N}$ )

Der Vergleich beider Systeme anhand der Werte in Tabelle 6.6 zeigt, dass mit dem Piezoelektrischen System mehr elektrische Energie generiert werden konnte. Dies kann zu einem großen Teil durch die größere mechanische Eingangsenergie und außerdem durch die, dem piezoelektrischen Effekt zugrunde liegende, höhere Energiewandlungseffizienz erklärt werden. Wie in Kapitel 6.1.2 festgestellt wurde, kann zwar eine Erhöhung der elektrischen Ausgangsenergie des Elektrostatischen Systems durch eine höhere mechanische Eingangsenergie erreicht werden, diese würde allerdings immer noch deutlich unter der des Piezoelektrischen Systems liegen. Es lässt sich also eine bessere Energiewandlung des Piezoelektrischen Systems ab einer gewissen minimalen Eingangsenergie feststellen, die für dieses notwendig ist. Unterhalb dieser minimalen Eingangsenergie ist keine bedeutende Energiewandlung des Piezoelektrischen Systems messbar. Ein Vergleich der Messwerte des Elektrostatischen ( $2,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ws}$  bei  $50 \text{ N}$ ) und des Piezoelektrischen Systems ( $< 0,1 \cdot 10^{-6} \text{ Ws}$  bei  $62 \text{ N}$ ) zeigt dies. Es scheint daher sinnvoll, beide Systeme bei unterschiedlichen Rahmenbedingungen einzusetzen. Das Elektrostatische System könnte in Bereichen, in denen nur eine geringe mechanische Energie zur Verfügung steht, eingesetzt werden. Das Piezoelektrische System ist hingegen bei ausreichender mechanischer Eingangsenergie zu bevorzugen.

Die Komplexität und der Ausfallsicherheit des Elektrostatischen Systems sind geringer als die des Piezoelektrischen Systems. Das Piezoelektrische System benötigt ein zusätzliches Hilfselement in Form eines Scharniers. Dieses muss exakt auf den Folienwickelkondensator abgestimmt sein, um ein stabiles System zu gewährleisten. Des Weiteren ist die Stabilität der Schweißnaht eine notwendige Voraussetzung für die Funktion, da ein Versagen zu einem Totalausfall des Systems führt.

Das Elektrostatische System benötigt hingegen kein weiteres Hilfselement. Hier muss lediglich eine Bewegung der einzelnen Lagen zueinander für die Funktion sichergestellt sein.

### 6.3.2 Vergleich mit anderen Energy Harvesting Systems

Ein Vergleich der Systeme mit den im Stand der Technik behandelten Methoden (vgl. Kapitel 2) ist nur mit Einschränkungen möglich. Durch die für alle Systeme sehr unterschiedlichen Randbedingungen sind allgemeingültige Aussagen schwierig. Die Belastungszyklen bzw. die Belastungsfrequenzen können sehr unterschiedlich sein, ebenso die mechanische Eingangsenergie und die vorherrschenden Kräfte. Ebenso ist die Größe der unterschiedlichen Systeme nicht einheitlich. Des Weiteren wurde für den Großteil der Methoden keine Angabe bezüglich der Energie, sondern lediglich eine Angabe der Leistung gegeben. Im Folgenden wird zum Vergleich die Energie und die Leistung auf das Gesamt- oder das PVDF-Volumen normiert verwendet.

#### Elektrostatisches System

In Tabelle 6.7 ist die Leistung der Elektrostatischen Systeme auf das Gesamtvolumen normiert und die Frequenz der mechanischen Anregung angegeben. Die normierte elektrische Leistung des Elektrostatischen Systems liegt mit  $\approx 1 \frac{W_s}{cm^3}$  in der Größenordnung anderer Elektrostatischer Systeme, die vergleichbare Randbedingungen haben. Die höhere normierte Leistung der Systeme von Vu-Cong et al. und Chiu et al. ist durch die Verwendung von Elektreten mit sehr hohen Oberflächenladungsdichten bedingt [67] [8]. Die nicht normierte Gesamtleistung des Elektrostatischen Energy Harvesters ist mit ca.  $1\mu W$  teilweise um eine Größenordnung geringer als die vergleichbarer Systeme aus der Literatur. Hauptsächlich kann dies auf die geringe Oberflächenladungsdichte der PVDF-Folie und die geringe Frequenz der mechanischen Anregung zurückgeführt werden.

System	Leistung / Volumen [ $\frac{\mu W}{cm^3}$ ]	Frequenz [Hz]	Aufladung des Kon- densators durch
<b>Eigenes System</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	Elektret (PVDF-Folie)
Vu-Cong et al. [67]	6	1	Elektret (FEP-Folie)
Tashiro et al. [64]	1,3	6	Spannungsquelle
Chiu et al. [8]	5,5	120	Elektret ( $SiO_2/SiN$ )
Chiu et al. [10]	0,27	20	Elektret (Parylene-C)

Tabelle 6.7: Vergleich Elektrostatischer Energy Harvester Systeme anhand der Leistung pro Gesamtvolumen und der Belastungsfrequenz

### Piezoelektrisches System

Die generierte elektrische Energie des Piezoelektrischen Systems ist um den Faktor zwei größer im Vergleich zum System von Nakajima. Bezogen auf das PVDF-Volumen kann eine fast dreimal höhere Energiegewinnung festgestellt werden. Die Effizienz des Piezoelektrischen Systems ist in Relation bedeutsam größer, da die mechanische Druckkraft bei der Untersuchung von Nakajima 2,5 mal höher war [42].

Allerdings zeigt der Vergleich mit den von Starner, Wang und Zhao entwickelten Energy Harvesting Systemen für Schuhe, dass noch eine erhebliche Steigerung der Energiewandlung möglich sein sollte. Die gewandelte Energie ist teilweise um den Faktor 20 größer, wobei berücksichtigt werden muss, dass die mechanische Eingangsenergie bei diesen Systemen durch die höhere Druckkraft und die dadurch verursachte mechanische Dehnung deutlich größer war.



System	Energie [ $mWs$ ]	Energie / PVDF- Volumen [ $\frac{mWs}{cm^3}$ ]	Kraft [N]
<b>Eigenes System (Boden)</b>	<b>0,09</b>	<b>0,07</b>	<b>400</b>
Nakajima et al. (Boden) [42]	0,045	0,025	1000
Starner et al. (Schuh) [61]	1,3	0,4	735
Wang et al. (Schuh) [69]	5	1,8	735
Zhao et al. (Schuh) [72]	1	1	735

Tabelle 6.8: Vergleich Piezoelektrischer Energy Harvester Systeme anhand der Energie pro Schritt und Energie pro Gesamtvolumen\*Schritt und der mechanischen Kraft

## 7 Zusammenfassung und Fazit

Die Technik von Folienwickelkondensatoren wurde erfolgreich adaptiert, um Energy Harvesting Systeme zu entwickeln. Die Systeme wandeln die mechanische Energie von dynamischen Druckkräften entweder auf Grundlage des piezoelektrischen oder des elektrostatischen Wandlungsprinzips. Hierzu wurden Folienwickelkondensatoren mit PVDF-Folie als dielektrisches Material hergestellt. Für beide Arten der Energiewandlung waren spezielle Modifikationen der Folienwickelkondensatoren notwendig. So setzte die Nutzung des elektrostatischen Wandlungsprinzips auf eine wiederholbare Änderung des Folienabstands und das piezoelektrische Wandlungsprinzip auf eine Dehnung der PVDF-Folie bei einer Beaufschlagung mit Druckkräften. Die Untersuchung des elektrostatischen Wandlungsprinzips erfolgte mit einem speziellen Aufbau in Form einer „Hexentreppe“, wodurch eine kontrollierbare Änderung des Folienabstands erreicht wurde. Die Nutzung des piezoelektrischen Quereffekts der PVDF-Folie wurde durch die Integration eines Scharnierelements innerhalb des Folienwickels erreicht. Durch dieses Scharnierelement wurde der Folienwickelkondensator bei Druckbelastung gedehnt.

Für beide Wandlungsprinzipien wurden eine analytische Beschreibung der Systeme in Abhängigkeit der Geometrie und der grundlegenden physikalischen Zusammenhänge hergeleitet. Mithilfe der analytischen Beschreibung konnte die Energiewandlung für beide Wandlungsprinzipien mit Hilfe von numerischen Verfahren in MATLAB berechnet werden.

Ausgehend von den theoretischen Berechnungen wurden die elektrostatische und piezoelektrische Energiewandlung experimentell untersucht. Es wurde ein Versuchsaufbau hergestellt, der eine Untersuchung von Testsystemen unter kontrollierten Bedingungen ermöglichte.

Die Auswertung der experimentellen Daten zeigte, dass die Energiewandlung mit beiden Prinzipien praktisch umsetzbar und grundsätzlich ähnlich dem simulierten

Verhalten ist. Durch die weitere Analyse der Messergebnisse konnten die Parameter identifiziert werden, die die Energiewandlung entscheidend beeinflussten.

Es konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, durch die Anpassung dieser Parameter in den analytischen Gleichungen die Energiewandlung für beide Effekte in der richtigen Größenordnung zu berechnen. Die Größe der Parameter konnte anhand der aus dem Experiment gewonnenen Daten empirisch gewonnen werden.

Die experimentellen Daten zeigten deutliche Unterschiede beider Methoden hinsichtlich der Energiewandlung. Das Elektrostatische System erzeugte deutlich weniger Energie als das Piezoelektrische System. Es konnte jedoch mittels des elektrostatischen Effekts mit deutlich niedrigeren Druckkräften eine Energiewandlung erzielt werden. Die Energiewandlung des Elektrostatischen Systems zeigte zwar eine Steigerung durch eine Erhöhung der mechanischen Eingangsenergie, diese war jedoch nur sehr begrenzt. Ab einer bestimmten Druckkraft konnte eine Stagnation festgestellt werden, ab der eine weitere Druckkraftherhöhung keine weitere Steigerung der Energie bewirkte.

Im Gegensatz dazu bewirkte die Erhöhung der mechanischen Eingangsenergie bei dem Piezoelektrischen System eine deutliche Steigerung der erzeugten elektrischen Energie. Daher sollte für eine größtmögliche Energiegenerierung die Druckkraft, im Rahmen der mechanischen Stabilität des Systems, maximiert werden.

Des Weiteren konnten für beide Systeme Parameter bestimmt werden, die eine optimale Energiewandlung gewährleisten. Die Anzahl der Lagen oder Wicklungen spielte für beide Methoden eine entscheidende Rolle. Für die piezoelektrische Energiewandlung ist es prinzipiell optimal, wenn der Folienwickelkondensator nur eine Wicklung aufweist. Die experimentelle Überprüfung zeigte allerdings, dass durch mehr Wicklungen eine größere mechanische Stabilität des Systems erzielt werden kann. Zusätzlich wird dabei eine geringere Dehnung des Systems bei gleicher Kraft hervorgerufen. Für eine praktische Umsetzung dieses Systems ist daher ein Kompromiss zwischen mechanischer Stabilität und Energiewandlung zu finden.

Das Elektrostatische System zeigte nur bis zu einer von den Randbedingungen beeinflussten Anzahl an Lagen eine Verbesserung der Energiewandlung. Die optimale Anzahl wurde maßgeblich durch die maximale Dicke des Systems und durch die Lastimpedanz beeinflusst.

## 8 Ausblick

Im Folgenden werden mögliche Verbesserungen und Erweiterungen für die Energy Harvesting Systeme behandelt.

Ein entscheidendes Kriterium für eine große Energiewandlung mit einem Elektrostatischen Energy Harvester nach dem hier behandelten Prinzip ist eine große Kapazitätsänderung. Daher sollte die maximale Kapazität möglichst groß sein. Erreicht werden kann dies, indem die Elektretfolie eine große Dielektrizitätszahl und eine minimale Dicke besitzt. Eine weitere Vergrößerung der Kapazität könnte durch eine dünnere Elektretfolie realisiert werden, da ein System mit mehreren Lagen bei gleichbleibender maximaler Dicke möglich ist. Zusätzlich ist eine ebenfalls möglichst dünne Elektrodenfolie oder die Verwendung einer Elektretfolie mit einseitiger Metallisierung von Vorteil. Eine einseitig metallisierte Elektretfolie könnte darüber hinaus auch die parasitäre serielle Kapazität verringern, da einseitig kein Luftspalt zwischen Elektret und Elektrode aufgetreten würde. Eine weitere Möglichkeit die Kapazität zu vergrößern, ist es, die Folienfläche in Breite und/oder Länge zu erweitern. Abschließend ist auch die Verwendung eines anderen Elektret-Materials denkbar. So könnte beispielsweise PET- oder PTFE-Folie eingesetzt werden, um niedrige Kosten oder eine höhere Kapazität zu erreichen.

Eine Verbesserung der Wickeltechnik könnte mit der Verwendung zusätzlicher Folienlagen erreicht werden, die zwischen Elektret- und Elektrodenfolie gewickelt wird und deutlich schmaler als diese ist. Hierdurch könnte ein definierter Abstand zwischen Elektret- und Elektrodenfolie gewährleistet werden. Zusätzlich ist es möglich, das Elektrostatische System als Ganzes luftdicht zu verschließen. Wird dabei eine definierte Luftmenge eingeschlossen, so kann diese nach der Beaufschlagung mit einer Druckkraft die Folienlagen wieder in ihre Ursprungsposition drücken [45].

Denkbar ist ebenfalls der Einsatz einer zusätzlichen dielektrischen Folie, die aus einem anderen Material besteht. So könnte zusätzlich eine Energiewandlung durch

die Nutzung des Triboelektrischen Effekts erfolgen. Diese Folie sollte dabei aus einem Material bestehen, das in der Triboelektrischen Reihe möglichst weit entfernt vom Elektret-Material ist, um einen großen Effekt zu gewährleisten [11]. Darüber hinaus kann dieser Effekt durch eine mikrostrukturierte Oberfläche der Folien deutlich vergrößert werden [14].

Das Prinzip des Piezoelektrischen Energy Harvesters kann ebenso durch verschiedene Maßnahmen weiterentwickelt beziehungsweise verbessert werden. Hier kann einerseits der Folienkondensator und andererseits das mechanische Scharnierelement modifiziert werden.

Um eine langzeitstabile Funktion des Systems zu gewährleisten, muss die Schweißtechnik deutlich verbessert werden. Dazu ist es denkbar zum einen mehrere Schweißnähte nacheinander oder zusätzlich mehrere längsseitige Schweißnähte am kompletten Umfang des Folienwickels zu setzen. Des Weiteren sollte statt der thermischen eine auf Ultraschall basierende Schweißung implementiert werden, da diese hinsichtlich der Schweißparameter wie Tiefe, Dauer und Temperatur der Schweißnaht deutlich besser kontrollierbar ist [13]. Um eine größere Dehnung des Folienkondensators bei geringerer Kräfteinwirkung zu erzielen, könnte das Material der Elektroden verändert werden. Würde ein Material mit niedrigem Emodul für die Elektroden verwendet, so würde der Energieverlust durch dessen Dehnung verringert. Das Scharnierelement könnte modifiziert werden, so dass die notwendige Dehnung des Folienkondensators bei geringerem Hub zu erreichen ist. Hierfür könnte ein Scharnierelement mit ungleichen Scharnierschenkeln zielführend sein.

Diese und weitere Erweiterungen oder Modifizierung könnten genutzt werden, um sowohl das Elektrostatische als auch das Piezoelektrische Energy Harvesting System zu verbessern und eine kommerzielle Umsetzung zu erreichen.

# Literaturverzeichnis

- [1] AKAYDIN, H. D. ; ELVIN, N. ; ANDREOPOULOS, Y. : Energy Harvesting from Highly Unsteady Fluid Flows using Piezoelectric Materials. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 21 (2010), Nr. 13, S. 1263–1278. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X10366317>. – DOI 10.1177/1045389X10366317. – ISSN 1045–389X
- [2] BEEBY, S. P. ; TUDOR, M. J. ; WHITE, N. M.: Energy harvesting vibration sources for microsystems applications. In: *Measurement Science and Technology* 17 (2006), Nr. 12, S. R175–R195. <http://dx.doi.org/10.1088/0957-0233/17/12/R01>. – DOI 10.1088/0957-0233/17/12/R01. – ISSN 0957–0233
- [3] BEEBY, S. P. ; WHITE, N. M.: *Energy harvesting for autonomous systems*. Norwood, Mass. : Artech House, 2010 (Artech House series smart materials, structures, and systems). – ISBN 9781596937192
- [4] BOISSEAU, S. ; DESPESE, G. ; AHMED, B. : Electrostatic Conversion for Vibration Energy Harvesting. Version: 2012. <http://dx.doi.org/10.5772/51360>. In: LALLART, M. (Hrsg.): *Small-Scale Energy Harvesting*. InTech. – DOI 10.5772/51360. – ISBN 978-953-51-0826-9
- [5] BONNET, M. : *Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung: Eigenschaften, Verarbeitung und Praxiseinsatz polymerer Werkstoffe*. 1. Auflage. Wiesbaden : Vieweg, F, 2008 (Studium Technik). – ISBN 3834803499
- [6] BREZET, J. C. ; VAN DOORN, A. J. ; VAN DONGEN, S. ; RANDAG, A. ; JANSEN, A. J. ; JANSEN, J. W. ; LOMONOVA, E. A. ; PAULIDES, J. J. H.: *Floor suitable for generating, converting and/or storing energy*. 2009

- [7] BROWN, R. ; MEASUREMENT SPECIALTIES, I. (Hrsg.): *Power Generation Using Piezofilm*. 1991
- [8] CHIU, Y. ; BARGAYO, R. P. ; HONG, H. : Stacked electret energy harvesting system fabricated with folded flexible printed circuit board. In: *Proc Power MEMS 2012* (2012), S. 149–152
- [9] CHIU, Y. ; LEE, Y. : Flat and robust out-of-plane vibrational electret energy harvester. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 23 (2013), Nr. 1, S. 015012. <http://dx.doi.org/10.1088/0960-1317/23/1/015012>. – DOI 10.1088/0960-1317/23/1/015012. – ISSN 0960-1317
- [10] CHIU, Y. ; WU, S. : Flexible electret energy harvesters with parylene electret on PDMS substrates. In: *Journal of Physics: Conference Series* 476 (2013), S. 012037. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/476/1/012037>. – DOI 10.1088/1742-6596/476/1/012037. – ISSN 1742-6588
- [11] DIAZ, A. F. ; FELIX-NAVARRO, R. M.: A semi-quantitative triboelectric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties. In: *Journal of Electrostatics* 62 (2004), Nr. 4, S. 277–290. <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2004.05.005>. – DOI 10.1016/j.elstat.2004.05.005. – ISSN 03043886
- [12] ERTURK, A. ; INMAN, D. J.: *Piezoelectric energy harvesting*. Hoboken, N.J. : Wiley, 2013. – ISBN 9781119991359
- [13] FAHRENWALDT, H. J. ; SCHULER, V. ; TWRDEK, J. : *Praxiswissen Schweißtechnik: Werkstoffe, Prozesse, Fertigung*. 5., vollst. überarb. Aufl. 2014. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014. – ISBN 978-3-658-03141-1
- [14] FAN, F. ; LIN, L. ; ZHU, G. ; WU, W. ; ZHANG, R. ; WANG, Z. L.: Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films. In: *Nano letters* 12 (2012), Nr. 6, S. 3109–3114. <http://dx.doi.org/10.1021/nl300988z>. – DOI 10.1021/nl300988z. – ISSN 1530-6992
- [15] FENG, T. J. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Electret effect of PVDF film: Bachelorarbeit*. München, Januar 2013

- [16] FINSTERBUSCH, R. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Untersuchung von Energiewandlung und möglichen Ausfallmechanismen von PVDF-Folienwickelgeneratoren: Masterarbeit*. München, September 2014
- [17] FUKADA, E. : *Phase transitions*. Bd. v. 18, no. 3-4: *Ferroelectric polymers*. New York : Gordon and Breach, 1989. – ISBN 9780677258805
- [18] GRANSTROM, J. ; FEENSTRA, J. ; SODANO, H. A. ; FARINHOLT, K. : Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps. In: *Smart Materials and Structures* 16 (2007), Nr. 5, S. 1810–1820. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/16/5/036>. – DOI 10.1088/0964-1726/16/5/036. – ISSN 0964-1726
- [19] GUIGON, R. ; CHAILLOUT, J. ; JAGER, T. ; DESPESE, G. : Harvesting raindrop energy: experimental study. In: *Smart Materials and Structures* 17 (2008), Nr. 1, S. 015039. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/17/01/015039>. – DOI 10.1088/0964-1726/17/01/015039. – ISSN 0964-1726
- [20] HAMMES, P. C. A.: *Infrared matrix sensor using PVDF on silicon: Theory, design, fabrication and testing of pyroelectric sensors using PVDF*. Delft, Netherlands : Delft University Press, 1994. – ISBN 90-6275-980-7
- [21] HARB, A. : Energy harvesting: State-of-the-art. In: *Renewable Energy* 36 (2011), Nr. 10, S. 2641–2654. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.014>. – DOI 10.1016/j.renene.2010.06.014. – ISSN 09601481
- [22] HEAVISIDE, O. : *Electrical papers: In two volumes*. London [u.a.] : Macmillan, 1892
- [23] HOFFMANN, H. : *Eine experimentelle Studie zur Systematik der Nutzung von Rumpfschwingungen beim menschlichen Gehen*. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Diss., 2001
- [24] IEEE: *176-1987*. <http://dx.doi.org/10.1109/IEEESTD.1988.79638>
- [25] IVERS-TIFFÉE, E. ; MÜNCH, W. v.: *Werkstoffe der Elektrotechnik: Mit 40 Tabellen*. 10., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden : Teubner, 2007 (Lehrbuch : Elektrotechnik). – ISBN 9783835100527



- [26] JAGAU, M. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Polarisation von Polyvinylidenfluorid: Bachelorarbeit*. München, Mai 2011
- [27] JEAN-MISTRAL, C. ; BASROUR, S. ; CHAILLOUT, J.-J. : Comparison of electroactive polymers for energy scavenging applications. In: *Smart Materials and Structures* 19 (2010), Nr. 8, S. 085012. <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/19/8/085012>. – DOI 10.1088/0964-1726/19/8/085012. – ISSN 0964-1726
- [28] JEFIMENKO, O. D. ; WALKER, D. K.: Electrostatic Current Generator Having a Disk Electret as an Active Element. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* IA-14 (1978), Nr. 6, S. 537-540. <http://dx.doi.org/10.1109/TIA.1978.4503588>. – DOI 10.1109/TIA.1978.4503588. – ISSN 0093-9994
- [29] KAWAI, H. : The Piezoelectricity of Poly (vinylidene Fluoride). In: *Japanese Journal of Applied Physics* 8 (1969), Nr. 7, S. 975-976. <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.8.975>. – DOI 10.1143/JJAP.8.975. – ISSN 0021-4922
- [30] KEMBALL-COOK, L. ; TUCKER, P. : *Energy Harvesting*. 2011
- [31] KINNINGER, L. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Energy Harvesting mit Paketen aus gewickelten Polyvinylidendifluorid: Bachelorarbeit*. München, Juli 2001
- [32] KUREHA CORPORATION: *KF Piezofilm: PVDF Piezofilm*. November 2010
- [33] LEUCHT, K. : *RPB-electronic-Taschenbücher*. Bd. 149: *Kondensatorenkunde für Elektroniker: Eine ausführliche Darstellung der Kondensatoren und ihrer Kennwerte, Bauformen und speziellen Eigenschaften, Anwendungsbeispiele und Kennzeichnungssysteme*. München : Franzis, 1981. – ISBN 3-7723-1491-0
- [34] LI, S. ; LIPSON, H. : Vertical-Stalk Flapping-Leaf Generator for Wind Energy Harvesting. In: *ASME 2009 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, September 21-23, 2009, S. 611-619
- [35] LIM, W. T. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Electrostatic energy harvesting using the electret effect of PVDF film: Bachelorarbeit*. München, November 2013

- [36] LOVINGER, A. J.: Ferroelectric Polymers. In: *Science* 220 (1983), Nr. 4602, S. 1115–1121. <http://dx.doi.org/10.1126/science.220.4602.1115>. – DOI 10.1126/science.220.4602.1115. – ISSN 0036–8075
- [37] <http://www.mathworks.de> aufgerufen am 26.10.2015
- [38] MEASUREMENT SPECIALTIES, I. : *Piezo Film Sensors: Technical Manual*. <http://www.meas-spec.com>
- [39] MITCHESON, P. D. ; YEATMAN, E. M. ; RAO, G. K. ; HOLMES, A. S. ; GREEN, T. C.: Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. In: *Proceedings of the IEEE* 96 (2008), Nr. 9, S. 1457–1486. <http://dx.doi.org/10.1109/JPROC.2008.927494>. – DOI 10.1109/JPROC.2008.927494. – ISSN 0018–9219
- [40] MURAYAMA, N. : Persistent polarization in poly(vinylidene fluoride). I. Surface charges and piezoelectricity of poly(vinylidene fluoride) thermoelectrets. In: *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition* 13 (1975), Nr. 5, S. 929–946. <http://dx.doi.org/10.1002/pol.1975.180130505>. – DOI 10.1002/pol.1975.180130505. – ISSN 00981273
- [41] MUSGRAVE, P. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Summary of Results with Double Cymbal Device: Technischer Report*. München, August 2013
- [42] NAKAJIMA, T. ; OKAYA, K. ; OHTA, K. ; FURUKAWA, T. ; OKAMURA, S. : Performance of Piezoelectric Power Generation of Multilayered Poly(vinylidene fluoride) under High Mechanical Strain. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 50 (2011), Nr. 9, S. 09ND14. <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.50.09ND14>. – DOI 10.1143/JJAP.50.09ND14. – ISSN 0021–4922
- [43] NG, Y. N. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Piezoelectric Multilayer Energy Harvester: Bachelorarbeit*. München, Dezember 2012
- [44] <http://www.ni.com/> aufgerufen am 26.10.2014
- [45] ONG, L. H. W. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Wounded Electrostatic Energy Harvester with PVDF Films Using Air to Protect its Structure: Bachelorarbeit*. München, Dezember 2013

- [46] PAUL, S. ; PAUL, R. : *Grundlagen der Elektrotechnik und Elektronik*. 4., neu bearb. Aufl. Berlin : Springer, 2010- (Springer-Lehrbuch). – ISBN 9783642241574
- [47] <http://www.pavegen.com> aufgerufen am 27.10.2014
- [48] PRIYA, S. : Advances in energy harvesting using low profile piezoelectric transducers. In: *Journal of Electroceramics* 19 (2007), Nr. 1, S. 167–184. <http://dx.doi.org/10.1007/s10832-007-9043-4>. – DOI 10.1007/s10832-007-9043-4. – ISSN 1385-3449
- [49] ROUNDY, S. ; WRIGHT, P. K. ; RABAEY, J. M.: *Energy Scavenging for Wireless Sensor Networks: With Special Focus on Vibrations*. Boston, MA : Springer US, 2004. – ISBN 978-1-4615-0485-6
- [50] RUSCHMEYER, K. : *Kontakt & Studium*. Bd. 460 : Werkstoffe: *Piezokeramik: Grundlagen, Werkstoffe, Applikationen*. Expert-Verl. <http://www.worldcat.org/oclc/75487051>. – ISBN 3-8169-1152-8
- [51] SAAM, M. ; SCHWESINGER, N. (Hrsg.): *Der pyroelektrische Effekt in Polyvinylidenfluorid: Bachelorarbeit*. München, Januar 2012
- [52] SAZONOV, E. ; NEUMAN, M. R.: *Wearable sensors: Fundamentals, implementation and applications*. San Diego, CA : Academic Press, 2014. – ISBN 9780124186668
- [53] SCHEDUKAT, N. : *Herstellung, Garn- und Struktureigenschaften von Polyvinylidenfluorid (PVDF)*. Aachen : Shaker-Verl., 2009 (Textiltechnik/ Textile Technology). – ISBN 3832285059
- [54] SCHEWE, H. : Piezoelectricity of Uniaxially Oriented Polyvinylidene Fluoride. In: *1982 Ultrasonics Symposium*, 1982, S. 519–524
- [55] SCHWESINGER, N. ; DEHNE, C. ; ADLER, F. : *Lehrbuch Mikrosystemtechnik: Anwendungen, Grundlagen, Materialien und Herstellung von Mikrosystemen*. München : Oldenbourg, 2009. – ISBN 3486579290
- [56] SESSLER, G. M.: Electrostatic Microphones with Electret Foil. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 35 (1963), Nr. 9, S. 1354.

- <http://dx.doi.org/10.1121/1.1918697>. – DOI 10.1121/1.1918697. – ISSN 00014966
- [57] SESSLER, G. M. ; BROADHURST, M. G.: *Topics in applied physics*. Bd. v. 33: *Electrets*. 2nd enl. ed. Springer-Verlag <http://www.worldcat.org/oclc/15054697>. – ISBN 3–540–17335–8
- [58] SHEN, D. ; CHOE, S. ; KIM, D. : Analysis of Piezoelectric Materials for Energy Harvesting Devices under High-g Vibrations. In: *Japanese Journal of Applied Physics* 46 (2007), Nr. 10A, S. 6755–6760. <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.46.6755>. – DOI 10.1143/JJAP.46.6755. – ISSN 0021–4922
- [59] SMIT, M. : *Sustainable dance club*. <http://www.sustainabledanceclub.com>. – <http://www.sustainabledanceclub.com> aufgerufen am 04.10.2015
- [60] SODANO, H. A.: Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries. In: *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 16 (2005), Nr. 10, S. 799–807. <http://dx.doi.org/10.1177/1045389X05056681>. – DOI 10.1177/1045389X05056681. – ISSN 1045–389X
- [61] STARNER, T. ; PARADISO, J. A.: Human Generated Power for Mobile Electronics. In: *Low Power Electronics Design*, CRC Press, 2004, S. 1–35
- [62] STATISTISCHES BUNDESAMT, ZWEIGSTELLE BONN: *Durchschnittliche Körpermaße der Bevölkerung (Größe in m, Gewicht in kg). Gliederungsmerkmale: Jahre, Deutschland, Alter, Geschlecht: Mikrozensus - Fragen zur Gesundheit*. [www.gbe-bund.de](http://www.gbe-bund.de). Version: 2009
- [63] STOTT, J. R. ; HUTTON, W. C. ; STOKES, I. A.: Forces under the foot. In: *Journal of Bone & Joint Surgery, British Volume* 55 (1973), Nr. 2, S. 335–344
- [64] TASHIRO, R. ; KABEI, N. ; KATAYAMA, K. ; TSUBOI, E. ; TSUCHIYA, K. : Development of an electrostatic generator for a cardiac pacemaker that harnesses the ventricular wall motion. In: *Journal of Artificial Organs* 5 (2002), Nr. 4, 0239–0245. <http://dx.doi.org/10.1007/s100470200045>. – DOI 10.1007/s100470200045. – ISSN 1434–7229

- [65] TAYLOR, G. W. ; BURNS, J. R. ; KAMMANN, S. A. ; POWERS, W. B. ; WELSH, T. R.: The Energy Harvesting Eel: a small subsurface ocean/river power generator. In: *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 26 (2001), Nr. 4, S. 539–547. <http://dx.doi.org/10.1109/48.972090>. – DOI 10.1109/48.972090. – ISSN 03649059
- [66] VINSON, J. : *Untersuchungen zur Struktur- und Zugspannungsabhängigkeit der pyro- und dielektrischen Eigenschaften von PVDF*. Darmstadt, Technischen Universität Darmstadt, Diss., 1994
- [67] VU-CONG, T. ; JEAN-MISTRAL, C. ; SYLVESTRE, A. ; BAR-COHEN, Y. : Autonomous dielectric elastomer generator using electret. In: *SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring*, SPIE, 2013 (SPIE Proceedings), S. 86870H
- [68] WADA, Y. ; HAYAKAWA, R. : *A model theory of piezo- and pyroelectricity of poly(vinylidene fluoride) electret*. <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00150198108238681>. Version: 07.02.2011
- [69] WANG, G. : *Piezoelectric energy harvesting utilizing human locomotion*. Minnesota, University Of Minnesota, Diss., Juli 2010. <http://purl.umn.edu/93638>
- [70] WÜST, J.: *Ferroelektrische Eigenschaften von elektronenbestrahltem PVDF*. Darmstadt, TU Darmstadt, Diss., 1998. <http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/408/>
- [71] ZEUS INDUSTRIAL PRODUCTS, INC.: *Introduction to Fluoropolymers: Technical Whitepaper*. 2006
- [72] ZHAO, J. ; YOU, Z. : A Shoe-Embedded Piezoelectric Energy Harvester for Wearable Sensors. In: *Sensors* 14 (2014), Nr. 7, 12497–12510. <http://dx.doi.org/10.3390/s140712497>. – DOI 10.3390/s140712497. – ISSN 1424–8220

# Veröffentlichungen

- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Piezoelectric energy harvesting from floor using wounded PVDF films. IFMIC 2014, 2014
- Bischur, E. ; Schwesinger, N.: Electret properties of PVDF film material: flexible and lightweight energy harvesting device. Proc. SPIE 9057, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2014, 90571X (March 10, 2014); doi:10.1117/12.2045089.
- Bischur, E.; Michel, S.; Schwesinger, N: Intentionally imperfect sensors for measuring mechanical parameters. ICST 2013, 2013,
- Bischur, E. ; Schwesinger, N.: Piezoelectric PVDF film energy harvester for powering a wireless sensor system. Proc. SPIE 8688, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2013, 868804 (April 10, 2013); doi:10.1117/12.2009610.
- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Energy harvesting from floor using organic piezoelectric modules. Power Engineering and Automation (PEAM), 2012
- Michel, S.; Bischur, E.; Schwesinger, N.: Nature like Acceleration Sensor / Inclinator of Organic Polymers. IEEE Sensors 2012, 2012, 1-4
- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Piezoelektrische Multilayer-generatoren aus PVDF-folie. MikroSystemTechnik Kongress 2012, VDE Verlag, 2011, 379-382
- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Piezoelectric energy harvester from ground floor. ICPEE, 2011

- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Piezoelectric energy harvester under parquet floor. Proc. SPIE 7977, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2011, 79770M (April 27, 2011); doi:10.1117/12.880419.
- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Generation elektrischer Energie in Parkettbden. Symposium Holz Innovativ, 2011
- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Energy Harvesting from Ground - Possibilities and Technical Realisation. IDTechEx  $\acute{U}$  Energy Harvesting and Storage Europe 2011, 2011
- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Plane PVDF-foil modules for energy harvesting of dynamic weight forces. ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (SMASIS2011), 2011ASME 2011 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, Volume, 753-757
- Schwesinger, N.; Bischur, E.: Energy Harvesting Using Organic Piezoelectric Transducers in the Floor. 2011 SEEEI Conference, 2011
- Bischur, E.; Pobering, S.; Menacher, M.; Schwesinger, N.: Flow driven vibration energy harvester. ASME 2010 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems, 2010SMASIS 2010, 523-528
- Bischur, E.; Pobering, S.; Menacher, M.; Schwesinger, N.: Piezoelectric energy harvester operating in flowing water. Proc. SPIE 7643, Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2010, 76432Z (April 12, 2010); doi:10.1117/12.847532.
- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Energy harvesting in floors. PowerMEMS 2010, 2010, 387-390
- Bischur, E.; Schwesinger, N.: Energiewandlung im Bodenbereich mittels piezoelektrischer PVDF-Wandlermodule. Energieautarke Sensorik 2010 - Mikrosensorik mit autarker Energieversorgung und drahtloser Signalbertragung, VDE Verlag, 2010Vortrge des 6. GMM-Workshops, 23-29

# Symbol- und Abkürzungsverzeichnis

## Symbole

Symbol	Definition	Einheit
$A$	Elektrodenfläche einer Lage	$m^2$
$A_{Q,A}$	Querschnittsfläche der Aluminiumfolie	$m^2$
$A_{Q,P}$	Querschnittsfläche der PVDF-Folie	$m^2$
$A_w$	Elektrodenfläche einer Wicklung	$m^2$
$a, b$	Schenkellängen des Scharniers	$mm$
$d_1$	Dicke der PVDF-Folie	$\mu m$
$d_2$	Dicke des Luftspalts	$\mu m$
$d_3$	Dicke der Aluminiumfolie	$\mu m$
$d_4$	Gesamtdicke des Elektrostatischen Energy Harvesting Systems	$mm$
$d_{31}$	Piezoelektrischer Querladungskoeffizient	$\frac{C}{N}$
$d_{33}$	Piezoelektrischer Lngsladungskoeffizient	$\frac{C}{N}$
$E$	Energie	$Ws$
$E_1$	Elektrisches Feld in der PVDF-Folie	$\frac{V}{m}$
$E_2$	Elektrisches Feld im Luftspalt	$\frac{V}{m}$
$F$	Kraft	$N$
$h$	Höhe des Scharniers	$mm$
$n$	Lagenanzahl	—
$R$	Widerstand	$\Omega$
$R_{par,p}$	parallele parasitäre Widerstände	$\Omega$
$R_{par,s}$	serielle parasitäre Widerstände	$\Omega$
$S_{1,A}$	mechanische Dehnung in der Aluminiumfolie	—
$S_{1,P}$	mechanische Dehnung in der PVDF-Folie	—



$\sigma$	Gesamte Oberflächenladungsdichte	$\frac{C}{m^2}$
$\sigma_{i1}$	Oberflächenladungsdichte feste Elektrode	$\frac{C}{m^2}$
$\sigma_{i2}$	Oberflächenladungsdichte bewegliche Elektrode	$\frac{C}{m^2}$
$T_{1,A}$	mechanische Spannung in der Aluminiumfolie	$\frac{N}{m^2}$
$T_{1,P}$	mechanische Spannung in der PVDF-Folie	$\frac{N}{m^2}$
$U$	elektrische Spannung	V
$u_S$	Umfang des Scharniers	mm
$u_W$	Umfang des Wickelkondensators	mm
$w$	Anzahl der Wicklungen	—
$\epsilon_{33}$	Dielektrizitätskonstante von PVDF	$\frac{As}{Vm}$
$\epsilon_r$	relative Dielektrizitätszahl von PVDF	—
$\epsilon_0$	Dielektrizitätskonstante von Vakuum	$\frac{As}{Vm}$
$Y_A$	Emodul der Aluminiumfolie	GPa
$Y_P$	Emodul der PVDF-Folie	GPa

## Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
$BaTiO_3$	Bariumtitanat
FEP	Perfluorethylenpropylen
EH	Energy Harvesting
LCR-Meter	Impedanz-, Kapazitäts- und Widerstandsmessgerät
MIT	Massachusetts Institute of Technology
PDMS	Polydimethylsiloxan
PET	Polyethylenterephthalat
PP	Polypropylen
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVD	Physikalische Gasphasenabscheidung
PVDF	Polyvinylidenfluorid
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
RMS	Quadratisches Mittel
$SiO_2$	Siliziumoxid

SiN      Siliziumnitrid



# Danksagung

Ich möchte mich bei allen bedanken die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. Norbert Schwesinger für die Möglichkeit an seinem Institut zu arbeiten und seine Unterstützung und Hilfe bei dieser und allen weiteren Arbeiten.

Des Weiteren danke ich Prof. Dr. Paolo Lugli für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ich danke allen Mitarbeitern der Professur für Mikrostrukturierte Mechatronische Systeme und des Lehrstuhls Technische Elektrophysik für die tolle Arbeitsatmosphäre und ihre alltägliche Mitwirkung, insbesondere Sandy Zähringer, Stefan Schaub und Maximilian Spornraft.

Auch danke ich allen Studenten die zu dieser Arbeit beigetragen haben.

Günter Beckmann für sein Interesse an diesem Thema und seine tatkräftige Förderung dieser Forschung.

Nicht zuletzt möchte ich mich besonders bei meiner Frau, meinen Eltern und Geschwistern für das Korrekturlesen, ihre Ermunterung und ihren Rückhalt bedanken.