kann die vom Harvester hinzugefügte Leistung über P_{out} - P_{in} berechnet werden. Für die Spannungen wird der Zeitmittelwert verwendet. Bei R_L=100 Ω ist das Ergebnis - 0.072397 V. An dem negativen Vorzeichen erkennt man, dass P_{in} größer ist als P_{out}, daraus folgt, dass die Energie, die in der Schaltung verloren geht größer ist als die von dem Harvester hinzugefügte Energie.

5 Diskussion

Die Messergebnisse verschiedener Messungen sind im Bezug auf die Leistung trotz der Streuungen ziemlich ähnlich. Die Streuungen kommen daher, dass die Einspannung und die Kabel immer in einer etwas anderen Konfiguration sind, und so auch die Resonanzfrequenz etwas anders ist. Ich habe mich bemüht, nach jedem Einspannen die Resonanzfrequenz auf 0,5 Hz genau einzustellen. Die Position der Kabel verändert sogar die Dämpfung. Das inkonsistente Beschleunigungsverhalten des Tisches war suboptimal.

Die mit der Simulation berechneten Spannungen, Leistungen und Dämpfungen waren etwa um den Faktor 10 zu groß. Dafür, dass die Materialien und auch die Form zwischen dem simulierten Modell und den realen Versuchskörpern nicht übereinstimmen, sind die Werte dennoch in guter Nähe. Auch, dass der Unterschiedsfaktor der verschiedenen Werte fast gleich ist, zeigt, dass die Simulation einen guten Bezug zur Realität hat. Bei der optimalen Länge liefern Messung und Simulation die gleichen Ergebnisse. Unterschiede zwischen Balken 1 und Balken 2 sind mit den Daten nicht eindeutig erkennbar.

Der Harvester ist zu schwach, um den verwendeten IC zu betreiben. Der IC selbst ist für seine Anwendung als konstante Spannungsquelle ungeeignet, da die Ausgangsspannung zu stark von dem Lastwiderstand abhängt.

Die ermittelten Leistungswerte waren zwar enttäuschend, aber wenn man sie mit Werten der Literatur vergleicht, sind sie erstaunlich ähnlich. Ein im Volumen des Piezoelements um den Faktor 100 größerer Harvester mit ähnlichem Aufbau aus der Literatur erreicht Leistungen von 1 mW [9]. Bei der besten Messung erreichte mein Harvester 8,75 µW (Bild 3-32), was ebenfalls fast ein Faktor 100 ist.

In einem zukünftigen besseren Modell sollten die Harvester anstelle einer variablen Länge eine fixe Länge besitzen. Die Kabel sollten irgendwie in den Balken und dessen Befestigung eingearbeitet sein. Der Vibrationstisch sollte anstelle einer einstellbaren Amplitude der Eingangsspannung die Amplitude der Ausgangsbeschleunigung einstellen und konstant halten können. Um die Simulation vergleichbar zu machen, ist ein piezoelektrisches Material mit ausführlichem Datenblatt notwendig.

Im nächsten Schritt könnte in der Simulation eine Verknüpfung der Coupled Field Harmonic Analyse mit einem elektrischen Schaltkreis gemacht werden, um die Ergebnisse der Messungen mit der Simulation zu vergleichen. Sowohl im Modell als auch beim realen Harvester könnte man die Piezofolie mit dem elektromagnetischen Harvester verknüpfen. Das Verhalten von Leistung und Spannung in Abhängigkeit vom Lastwiderstand kann in einem größeren Widerstandsbereich noch besser erforscht werden. Dabei könnte auch der Zusammenhang mit ζ herausgefunden werden.

6 Zusammenfassung

Es wurde ein Modell nach dem Vorbild eines hybriden Harvesters in Ansys aufgebaut. Dabei wurde die Länge des Piezoelements variiert. Es wurde eine optimale Länge ermittelt. In den späteren Messungen, von realen PE Harvestern wurden drei Längen gemessen. Die Daten bestätigen die Simulation darin, dass eine Länge der Piezofolie der halben Länge des biegbaren Teils des Balkens optimal für maximale Leistung ist. Eine kleinere Fläche führt zu höheren Spannungen aber die Leistung sinkt.

In der Simulation wurden die Parameter der *e*-Matrix verändert. Die Parameterstudie hat ergeben, dass hohe Werte der Piezomatrix-Parameter e_{31} und e_{33} wichtig sind.

Es wurden verschiedene weitere Simulationen und Messungen zur Bestimmung von Größen, wie z. B. Leistung, Spannung und Dämpfung bei verschiedenen Bedingungen, unter anderem verändertem Lastwiderstand und veränderter Frequenz durchgeführt. Mit Messungen und Simulationen zusammen lassen sich die erreichbaren Werte bei optimalen Bedingungen, also bei Resonanzfrequenz, optimaler Länge und gegebenenfalls optimalen Lastwiderstand für Leistung auf den Mikrowattbereich eingrenzen und für die Dämpfung ζ auf einen Bereich zwischen 0,01 und 0,04. Die gemessene Spannung lag immer zwischen 5 und 10 V. Der optimale Lastwiderstand liegt im Megaohmbereich. Es stellt sich heraus, dass das Verhalten von Spannung und der daraus berechneten Leistung in Abhängigkeit vom Lastwiderstand nicht dem physikalischen Zusammenhang $U(R)=U_0-\left(\frac{R_i U_0}{R_i+R}\right)$ folgt. Ein Verändern von $U_0(R)=U_{0\text{theoretisch}}-k\,R$ mit dem Korrekturfaktor k verbessert den Fit auf die Daten in einem kleinen Bereich um das Optimum enorm. k steht im Zusammenhang mit ζ.

Anhang

A Fit Kurven und Parameter der Frequenzgänge der Auslenkungen

Fitparameter des Kontroll Balkens:
A = 0,320289 µm

ζ = 0,005554

ω_0 = 209,425 rad/s

f_0 = 33,3310 Hz

k/m = 43859 1/s²

c/m = 2,3262 1/s

Bei Balken 1 ergab sich: